

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Системний
аналіз, управління та
інформаційні технології**

№ 1 (11) 2024

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: System
analysis, control and
information technology**

No. 1 (11) 2024

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2024

Kharkiv
NTU "KhPI", 2024

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2024. — № 1 (11) 2024. — 110 с. — ISSN 2079-0023.

Видання публікує нові наукові результати в області системного аналізу та управління складними системами, отримані на основі сучасних прикладних математичних методів і прогресивних інформаційних технологій. Публікуються роботи, пов'язані зі штучним інтелектом, аналізом великих даних, сучасними методами високопродуктивних обчислень у системах підтримки прийняття рішень.

Для науковців, викладачів вищої школи, аспірантів, студентів та спеціалістів у галузі системного аналізу, управління та комп'ютерних технологій.

Edition publishes new scientific results in the field of system analysis and control of complex systems, based on the application of modern mathematical methods and advanced information technology. Works related to artificial intelligence, big data analysis and modern methods of high-performance computing in decision support systems are publishing.

For scientists, teachers of higher education, post-graduate students, students and specialists in the field of systems analysis, management and computer technology.

Ідентифікатор медіа R30-01544, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 16.10.2023 № 1075.

Мова статей – українська, англійська.

Наказом МОН України № 1643 від 28 грудня 2019 року «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 18 грудня 2019 року» «Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології» внесено до категорії Б «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук».

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

Офіційний сайт видання: <http://samit.khpi.edu.ua/>

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Головний редактор

Годлевський М. Д., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заступник головного редактора

Куценко О. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії

Ахієзер О. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

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

Бентаєб Ф., доц., Ліонський університет-2, Франція

Богомолів С., доц., Австралійський національний

університет, Австралія

Галуза О. А., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Дорофєєв Ю. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Керстен В., проф., Гамбурзький технологічний

університет, Німеччина

Любчик Л. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Москаленко В. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Павлов О. А., проф., НТУ «ХПІ», Україна

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

Ткачук М. В., проф., ХНУ ім. В. Н. Каразіна, Україна

Хайрова Н. Ф., проф., НТУ «ХПІ», Україна

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

Шаронова Н. В., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний секретар

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

Editorial

Editor-in-chief

Godlevskiy M. D., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Deputy editor-in-chief

Kutsenko O. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members

Akhiezer O. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Bezmenov M. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Bentayeb F., Associate Professor, University of Lyon-2, France

Bogomolov S., Assistant Professor, Australian National

University, Australia

Galuza O. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Dorofiev Yu. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kersten Wolfgang, Prof., Hamburg University of Technology,

Germany

Lyubchik L. M., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Moskalenko V. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Pavlov O. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

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

Tkachuk M. V., prof., V. N. Karazin KhNU, Ukraine

Khairova N. F., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Cherednichenko O. O., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Sharonova N. V., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Executive secretary

Bezmenov M. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 6 від 5 липня 2024 р.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY

DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.01

UDC 004:519.24:681.3.06

A. A. PAVLOV, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, Professor of Informatics and Software Engineering Department; e-mail: pavlov.fiot@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>

M. N. HOLOVCHENKO, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, Senior Lecturer of Informatics and Software Engineering Department; e-mail: ma4ete25@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-8046>

V. V. DROZD, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Bachelor of Informatics and Software Engineering Department, Kyiv, Ukraine, e-mail: drozdllera@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0418-1139>

AN ADAPTIVE METHOD FOR BUILDING A MULTIVARIATE REGRESSION

We propose an adaptive method for building a multivariate regression given by a weighted linear convolution of known scalar functions of deterministic input variables with unknown coefficients. As, for example, when multivariate regression is given by a multivariate polynomial. In contrast to the general procedure of the least squares method that minimizes only a single scalar quantitative measure, the adaptive method uses six different quantitative measures and represents a systemically connected set of different algorithms which allow each applied problem to be solved on their basis by an individual adaptive algorithm that, in the case of an active experiment, even for a relatively small volume of experimental data, implements a strategy of a statistically justified solving. The small amount of data of the active experiment we use in the sense that, for such an amount, the variances of estimates of unknown coefficients obtained by the general procedure of the least squares method do not allow to guarantee the accuracy acceptable for practice. We also proposed to significantly increase the efficiency of the proposed by O. A. Pavlov. and M. M. Holovchenko modified group method of data handling for building a multivariate regression which is linear with respect to unknown coefficients and given by a redundant representation. We improve it by including some criteria and algorithms of the adaptive method for building a multivariate regression. For the multivariate polynomial regression problem, the inclusion of a partial case of the new version of the modified group method of data handling in the synthetic method proposed by O. A. Pavlov, M. M. Golovchenko, and V. V. Drozd, for building a multivariate polynomial regression given by a redundant representation, also significantly increases its efficiency.

Keywords: multivariate regression, integral measure, adaptive algorithm, regression analysis, expert coefficients, linear programming.

1. Introduction. In recent years, the authors have been working in the field of regression analysis, namely developing efficient methods for building univariate and multivariate regressions (MR) which are linear in relation to unknown coefficients [1, 2, 3]. The conducted critical analysis of existing universal methods for building an MR [4–20] showed that this problem is still relevant in both theoretical and applied aspects. The new approach implemented in this paper consists in that the universal adaptive method proposed by the authors (which includes six different criteria and four algorithms based on the outlined methodology of their use) allows to create an individual algorithm for an efficient solution of each individual applied problem.

2. The adaptive method for building an MR.

2.1. Formulation of the problem. The BR model looks like

$$Y(\bar{x}) = \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}) + E, \quad (1)$$

where $\bar{x} = (x_1, \dots, x_m)^T$ is a vector of deterministic input variables;

E is a random variable, its mathematical expectation is $ME = 0$, its variance $\text{Var}(E) = \sigma^2 < \infty$, the value of $\text{Var}(E)$ is known or its efficient estimate is known;

$\psi(\bar{x})$ are known numerical scalar functions of the vector argument \bar{x} . In [1], such functions were the components of a multidimensional polynomial.

According to the results of an active experiment $(\bar{x}_i \rightarrow y_i, i = \overline{1, n})$ we need to estimate the value of the unknown coefficients $\theta_j, j = \overline{1, L}$.

2.2. Measures of deviation of experimental data from the regression model used by the adaptive method.

2.2.1. A classical measure implemented by the general scheme of the least squares method (LSM). A vector of estimates $\hat{\theta}_1$ of unknown components of the vector

$\theta = (\theta_1, \dots, \theta_L)^T$ minimizes the next measure:

$$\min_{\theta_j, j=\overline{1, L}} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right)^2. \quad (2)$$

© Pavlov A. A., Holovchenko M. N., Drozd V. V., 2024



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under an international license [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



It is known that

$$\hat{\theta}_1 = (A^T A)^{-1} A^T y, \quad (3)$$

where

$$A = \begin{pmatrix} \psi_1(\bar{x}_1) & \cdots & \psi_L(\bar{x}_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \psi_1(\bar{x}_n) & \cdots & \psi_L(\bar{x}_n) \end{pmatrix}, \quad y = (y_1, \dots, y_n)^T.$$

As is known [21], the estimates $\hat{\theta}_1$ are linear, unbiased, efficient in the class of linear estimates (Markov's theorem). One can propose a statistically significantly more efficient linear estimate of the vector θ than the estimate obtained by the LSM only in the case when the structure of the algorithm for finding the linear estimate is adaptive, not fixed, that is, it depends on the input data and intermediate results of its execution. This is the main methodological idea that formed the basis of the proposed adaptive method.

2.2.2. *Minimization of the sum of modules.* Looks like

$$\min_{\theta_j, j=1, L} \sum_{i=1}^n \left| y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right|. \quad (4)$$

Remark 1. The use of measure (4) in its explicit form is inefficient due to Markov's theorem.

2.2.3. *A measure that minimizes the module of the sum of differences.* Looks like

$$\min_{\theta_j, j=1, L} \left| \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) \right|. \quad (5)$$

We recommend using it in explicit form only if it is known that the density function $f(x)$ of the random variable E is symmetrical about the ordinate axis.

2.2.4. *The measure of MR deviations from experimental data realized with a given probability.* For exact values of $\theta_j, j = 1, L$, the following is met:

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (6)$$

where ε_i is the i -th realization of the random variable E .

A random variable $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i$ (E_i are independent copies of E) for $n \geq 20$ on the basis of a partial case of the scalar limit theorem practically has a normal distribution with parameters $M\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i\right) = 0, \text{Var}\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i\right) = \frac{\sigma^2}{n}$. Let us find $t_{n,\alpha,\sigma}$, for which

$$P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i\right| \leq t_{n,\alpha,\sigma}\right) = 1 - \alpha, \quad (7)$$

where α is set experimentally, we recommend choosing an $\alpha \leq 0.1$. Then

$$t_{n,\alpha,\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \Phi_0^{-1}\left(\frac{1-\alpha}{2}\right), \quad (8)$$

where $\Phi_0^{-1}(x)$ is the inverse Laplace transform and σ is the arithmetic root of $\text{Var}(E)$ or its efficient estimate. Then

the measure 2.2.4 is the condition for $\theta_j, j = \overline{1, L}$, which is met with the probability $1 - \alpha$:

$$\left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) \right| \leq t_{n,\alpha,\sigma}. \quad (9)$$

Remark 2. Additional fifth and sixth measures are implemented when we know the density function $f(x)$ of the random variable E or the $f(x)$ is known with the known with the accuracy of the values of its numerical parameters. From the methodological point of view, it is convenient to introduce them later (see subsections 2.3.5, 2.3.6).

2.3. *Algorithms of the adaptive method.* 2.3.1. *The first algorithm (the first version).* The first step. Find the following estimate $\hat{\theta}_1$:

$$\hat{\theta}_1 = (A^T A)^{-1} A^T y.$$

The second step. Solve the following problem of linear programming (LP):

$$\min \sum_{i=1}^n z_i, \quad (10)$$

$$-z_i \leq y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \leq z_i, \quad z_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n},$$

$$-n \cdot t_{n,\alpha,\sigma} \leq \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) \leq n \cdot t_{n,\alpha,\sigma}. \quad (11)$$

The variables of the LP problem (10), (11) are $\theta_j, j = \overline{1, L}, z_i, i = \overline{1, n}$. Let us denote by $\hat{\theta}_2$ the optimal solution of the LP problem (10), (11).

The third step. The solution of the first algorithm is $\hat{\theta}_1$ if

$$\left| \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \hat{\theta}_{1j} \psi_j(\bar{x}_i) \right) \right| \leq n \cdot t_{n,\alpha,\sigma} \quad (12)$$

and $\hat{\theta}_2$ if condition (12) is not fulfilled.

2.3.2. *The first algorithm (the second version).* It differs from the algorithm of subsection 2.3.1 in the second step, in which we solve the following LP problem:

$$\min \sum_{i=1}^n (u_i^+ + u_i^-), \quad (13)$$

$$y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) = u_i^+ - u_i^-, \quad u_i^+ \geq 0, u_i^- \geq 0, \quad i = \overline{1, n},$$

$$-n \cdot t_{n,\alpha,\sigma} \leq \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) \leq n \cdot t_{n,\alpha,\sigma} \quad (14)$$

The variables of the LP problem (13), (14) are $\theta_j, j = \overline{1, L}, u_i^+, u_i^-, i = \overline{1, n}$.

Remark 3. The LP problem (13), (14) is solved by the simplex method, since only in this case the fulfillment of the conditions $\forall i u_i^+ \cdot u_i^- = 0$ is guaranteed. Whence, the optimal functional values for the LP problems (10), (11) and (13), (14) are the same. The advantage of the LP problem (13), (14) over the problem (10), (11) is that in its standard form it has n variables and equations less.

2.3.3. *The second algorithm (the first version).* The vector $\hat{\theta}_3$ of estimates of unknown components of the vector θ is a solution to the next LP problem:

$$\min z, \tag{15}$$

$$-z \leq \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) \leq z, \quad z \geq 0 \tag{16}$$

where the variables of the LP problem (15), (16) are $\theta_j, j = \overline{1, L}, z$.

2.3.4. *The second algorithm (the second version).* $\hat{\theta}_3$ is a solution to the following LP problem:

$$\min(u^+ + u^-), \tag{17}$$

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) = u^+ - u^-. \tag{18}$$

The variables of the LP problem (17), (18) are $\theta_j, j = \overline{1, L}, u^+, u^-$.

Remark 4. We recommend using the second algorithm when it is known that the density function of the random variable E is symmetric about the ordinate axis and $L \ll n$.

2.3.5. *The first hybrid algorithm of the adaptive method.* The hybrid method is used only when the density function of the random variable E is known at least with the accuracy of the values of its numerical parameters, and the number of tests n allows sufficiently precise test of the complex hypothesis by the χ^2 statistic.

The first step. Find the estimates $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3$.

The second step. Find the values sequence $\hat{\theta}_4(\omega_{1,l}, \omega_2)$, $0 < a = \omega_{1,1} < \omega_{1,2} < \dots < \omega_{1,k_1} = b, \omega_{1,l} - \omega_{1,l-1} = \text{const}, l = \overline{2, k_1}, \omega_2 = \text{const} > 0$ as solutions to the following LP problems (the first version):

$$\min \left(\omega_{1,l} \sum_{i=1}^n z_i + \omega_2 z \right), \tag{19}$$

$$-z_i \leq y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \leq z_i, \quad i = \overline{1, n},$$

$$-z \leq \sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) \leq z \tag{20}$$

or the LP problems (the second version):

$$\min \left\{ \omega_{1,l} \sum_{i=1}^n (u_i^+ + u_i^-) + \omega_2 (z^+ + z^-) \right\}, \tag{21}$$

$$y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) = u_i^+ + u_i^-; \quad u_i^+ \geq 0, u_i^- \geq 0, i = \overline{1, n},$$

$$\sum_{i=1}^n \left(y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) = z^+ - z^-; \quad z^+, z^- \geq 0. \tag{22}$$

The variables of the LP problem (19), (20) are $\theta_j, j = \overline{1, L}, z_i, i = \overline{1, n}, z$, and for the LP problem (21), (22) $\theta_j, j = \overline{1, L}, u_i^+, u_i^-, i = \overline{1, n}, z^+, z^-$.

Remark 5. The LP problem (21), (22) can be solved only by the simplex method.

The third step. For each of $k_1 + 3$ found vector estimates $\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \hat{\theta}_3, \hat{\theta}_4(\omega_{1,l}, \omega_2), l = \overline{1, k_1}$, find estimates of realizations of the random variable E as

$$y_i - \sum_{j=1}^L \hat{\theta}_{p,j} \psi_j(\bar{x}_i), \quad i = \overline{1, n}, \quad p = \overline{1, k_1 + 3}.$$

For $p > 3$ $\hat{\theta}_p = \hat{\theta}_4(\omega_{1,p-3}, \omega_2), p = \overline{4, k_1 + 3}$. The estimate of the components of an unknown vector θ is the vector $\hat{\theta}_p, p = \overline{1, k_1 + 3}$, with which the χ^2 statistic for testing the simple or complex hypothesis about the density function of the random variable E has the minimum value.

Remark 6. Let χ_p^2 be the realization of the χ^2 statistic for the estimate found by the hybrid algorithm. Then, if $P(\chi^2 \geq \chi_p^2) > 0.05$, then the solution is unreliable, otherwise, the realization of the $\chi^2 - \chi_p^2$ statistic belongs to the feasible region with significance level 0.05, and the smaller the value of χ_p^2 (provided that $\chi_p^2 \geq r - 2$, where r is the number of degrees of freedom of the χ^2 statistic), the more reliable is the vector θ of estimates of the components of the unknown vector found by the hybrid algorithm.

2.3.6. *The second hybrid algorithm of the adaptive method.* It is used when the distribution of the random variable E is known. Let us denote $v_{|E|} = M|E|, \hat{v}_{|E|}$ is a practically exact estimate of $v_{|E|}$ obtained as a result of simulation modeling, not related to tests on the regression model (1).

Remark 7. $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i|$ is a consistent sampling characteristic for estimating the unknown vector $v_{|E|}$, where $E_i, i = \overline{1, n}$, are independent copies of the random variable E . That is, it coincides with $v_{|E|}$ with a probability of 1 when $n \rightarrow \infty$. Whence, with a sufficiently large one $n, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\varepsilon_i|$ in absolute magnitude differs from $v_{|E|}$ by a sufficiently small value, where ε_i is the result of the i -th test on the random variable E (i -th test on the regression model (1)).

The estimate of the vector θ by the second hybrid algorithm. $\hat{\theta}_5(\omega_l), 0 < a_2 = \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_{k_2} = b_2, \forall \omega_l - \omega_{l-1} = \text{const}$, is the solution to the following LP problem:

$$\min \sum_{i=1}^n z_i, \tag{23}$$

$$-z_i \leq y_i - \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \leq z_i, \quad z_i \geq 0, \quad i = \overline{1, n},$$

$$-\omega_l \leq \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i - \hat{v}_{|E|} \leq \omega_l,$$

$$-n \cdot t_{n,\alpha,\sigma} \leq \sum_{j=1}^L \left(y_i - \theta_j \psi_j(\bar{x}_i) \right) \leq n \cdot t_{n,\alpha,\sigma}. \tag{24}$$

The variables of the LP problem (23), (24) are $z_i, i = \overline{1, n}, \theta_j, j = \overline{1, L}$. Further, the description of the second hybrid algorithm coincides with the corresponding description of the first hybrid algorithm.

Remark 8. $b_2 - a_2$ can be a sufficiently small number (see *Remark 7*). That is, for true values of θ_j , $j = \overline{1, L}$, there is small enough ω_j , in which condition (24) is fulfilled (under the assumption that $\hat{v}_{|E|} \approx v_{|E|}$).

3. Algorithm for reducing the number of components of the expression (1) for an MR given by a redundant representation. A necessary condition for using algorithms of the adaptive method is that L is significantly less than n . We can offer the following algorithm for reducing the value of L for a fixed set of experimental data.

The first step. Regression (1) is fictitiously increased by one $m+1$ -th deterministic input variable x_{m+1} , that is,

$$Y(\bar{x}) = \sum_{j=1}^L \theta_j \psi_j(\bar{x}) + \theta_{m+1} x_{m+1} + E, \quad (25)$$

where $\theta_{m+1} = 0$. Data of the experiment ($\bar{x}_i \rightarrow y_i, i = \overline{1, n}$) are replaced by $\left(\left(x_{1i}, \dots, x_{mi}, \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m x_{ji} \right) \rightarrow y_i, i = \overline{1, n} \right)$.

The second step. Find the estimates of θ_j by the LSM, $j = \overline{1, L+1}$, at $\theta_{m+1} \equiv 0$.

The third step. By the cluster analysis algorithm [2] the set of coefficients $\{\theta_j, j = \overline{1, L+1}\}$ is divided into two classes M_1 and M_2 [2], θ_{L+1} should belong to M_2 . Otherwise, the algorithm stops.

Remark 9. We can change the values of $x_{L+1,i}$, $i = \overline{1, n}$, and repeat steps 1–3. The necessary condition for the continuation of the algorithm is $\theta_{L+1} \in M_2$.

The fourth step. Exclude all terms, which coefficients belong to M_2 , from expression (25).

The fifth and subsequent steps of the algorithm. Repeat steps 1–3 for the new expression of the MR (provided that for each iteration the coefficient for the fictitious input variable belongs to the class M_2) until only the coefficient for the fictitious input variable will remain in the class M_2 . The resulting expression of the MR statistically significantly does not contain terms that insignificantly affect the output variable, and the difference between the number of tests n and the number of MR members can be significantly reduced if really the MR was given by a redundant representation. This will lead to an increase in the efficiency of using the adaptive method.

4. Active experiment. Finding the analytical expression of the density function of the random variable E and the estimate of its variance. We consider the case when an active experiment can be carried out in sufficient quantity at a fixed value of the deterministic input variables \bar{x}_f . The number of tests should be sufficient to test the complex hypothesis about the density function of an arbitrary random variable by the χ^2 statistic, as well as for efficient estimation of the variance of a random variable.

4.1. Finding the analytical expression of the density function of a random variable E . The first step. Find a

sample of the volume n of realizations of the random variable $E + \sum_{j=1}^L \theta_j \bar{x}_f$. They are the values of the output variable from the experiment ($\bar{x}_f \rightarrow y_i, i = \overline{1, n}$).

The second step. By the values of $y_i, i = \overline{1, n}$, build a histogram, the geometric expression of which allows to deduce a complex hypothesis about the density function of the random variable $E + \sum_{j=1}^L \theta_j \bar{x}_f$, which is checked by the most “hard” χ^2 statistic.

Remark 10. Obviously, a more complex procedure for testing a complex hypothesis can be proposed. If altering the value of $M(E + \forall \text{const})$ affects solely the numerical parameters within the analytical expression that represents the density function for the random variable E , then, in case of acceptance of the complex hypothesis, the problem is considered solved.

4.2. Estimation of $\text{Var}(E)$. As an estimate of the variance of a random variable E , we can take the number

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_j \right)^2$$

because $\text{Var}(E + \forall \text{const}) = \text{Var}(E)$.

5. The use of some provisions of the adaptive method in the modified group method of data handling (MGMDH) [2]. We propose to make the following changes to the general algorithmic scheme of MGMDH [2].

5.1. Using two regular criteria. In the case when the analytical expression of the density function of the random variable E is known with the accuracy of the values of the numerical parameters and is symmetric with respect to the ordinate axis, then we propose when finding by the test sequence of experimental data, that is, data that were not used to find estimates of unknown coefficients of partial descriptions of the sought regression, to use not the single regular criterion which is the residual sum of squares, but two criteria.

The first regular criterion:

$$\sum_{i=n+1}^{n+n_1} \left(y_i - \sum_{j=1}^{r_l} \hat{\theta}_{lj} \psi_{lj}(\bar{x}_i) \right)^2, \quad (26)$$

where the set of coefficients $\{\hat{\theta}_{lj}, j = \overline{1, r_l}\}$ gives the l -th partial descriptions of the sought MR; n is the amount of empirical data used to find estimates $\forall \theta_j, j = \overline{1, r_l}$, of the coefficients of the l -th partial description; n_1 is the number of experimental data in the test sequence.

The second regular criterion:

$$\left| \sum_{i=n+1}^{n+n_1} \left(y_i - \sum_{j=1}^{r_l} \hat{\theta}_{lj} \psi_{lj}(\bar{x}_i) \right) \right|. \quad (27)$$

Thus, in the general case, we get two partial descriptions that claim to be used to find the correct structure of the sought MR, and not a single one.

5.2. The use of the hybrid algorithm. The hybrid algorithm (the first or the second one, depending on the avail-

able information) of the adaptive method is used to find estimates of coefficients for the entire $(n + n_1)$ experimental data set for the found partial description(s). The final estimate of the unknown MR is the one for which the realization of the χ^2 statistic is the smallest [2].

Remark 11. If the symmetry condition of the density function of the random variable E is not fulfilled, then the use of the second regular criterion (27) is redundant.

Remark 12. More detailed recommendations on the use of criteria and algorithms of the adaptive method will be the result of its careful experimental research. Now it can be stated that finding estimates of the MR coefficients with the simultaneous use of several criteria significantly expands the application possibilities of universal methods of regression analysis, in particular those proposed by the authors of the adaptive method.

Conclusions. 1. To estimate the coefficients of an MR which is linear with respect to unknown coefficients, we proposed a universal adaptive method that implements not a single criterion, as in the least squares method, but several criteria. The adaptation consists in the fact that the structure of the algorithm for the final result obtaining is not fixed but depends on the intermediate results of calculations and input data.

2. We considered the possibility of a statistically correct obtaining, based on the results of a special experiment, an analytical expression of the density function of a random variable that affects additively the output variable.

3. We showed how the use of the adaptive method can significantly increase the efficiency of the modified group method of data handling proposed earlier by the authors.

References

- Pavlov A. A., Holovchenko M. N., Drozd V. V. Efficiency substantiation for a synthetic method of constructing a multivariate polynomial regression given by a redundant representation. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 1 (9). С. 3–9. DOI: 10.20998/2079-0023.2023.01.01.
- Pavlov A. A., Holovchenko M. N. Modified method of constructing a multivariate linear regression given by a redundant description. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. № 2 (8). С. 3–8. DOI: 10.20998/2079-0023.2022.02.01.
- Pavlov A., Holovchenko M., Mukha I., Lishchuk K., Drozd V. A modified method and an architecture of a software for a multivariate polynomial regression building based on the results of a conditional active experiment. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2023. Vol. 181. P. 207–222. DOI: 10.1007/978-3-031-36118-0_19.
- Abdulrahman A. T., Alshammari N. S. Factor analysis and regression analysis to find out the influencing factors that led to the countries' debt crisis. *Advances and Applications in Statistics*. 2022. Vol. 78. P. 1–16. DOI: 10.17654/0972361722047.
- Flitman A. M. Towards analysing student failures: neural networks compared with regression analysis and multiple discriminant analysis. *Computers and Operations Research*. 1997. Vol. 24, no. 4. P. 367–377. DOI: 10.1016/s0305-0548(96)00060-3.
- Johnson R. A., Wichern D. W. *Applied multivariate statistical analysis*, 5th edn. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002. 767 p.
- Knowles D., Parts L., Glass D., Winn J. M. Modeling skin and ageing phenotypes using latent variable models in Infer.NET. *Predictive models in personalized medicine workshop, NIPS 2010*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/241194775> (дата звернення: 18.05.2024).
- Lio W., Liu B. Uncertain maximum likelihood estimation with application to uncertain regression analysis. *Soft Computing*. 2020. Vol. 24, no. 13. P. 9351–9360. DOI: 10.1007/s00500-020-04951-3.
- Liu S.S., Zhu Y. Simultaneous maximum likelihood estimation for piecewise linear instrumental variable models. *Entropy*. 2022. Vol. 24, no. 9. P. 1235. DOI: 10.3390/e24091235.
- Ruff L., Vandermeulen R., Goernitz N., Deecke D., Siddiqui S. A., Binder A., Müller E., Kloft M. Deep one-class classification. *Proceedings of the 35th international conference on machine learning, PMLR*. 80. 2018. P. 4393–4402. URL: <http://proceedings.mlr.press/v80/ruff18a/ruff18a.pdf> (дата звернення: 18.05.2024).
- Scott J. T. Factor analysis and regression. *Econometrica*. 1966. Vol. 34. No. 3. P. 552–562. DOI: 10.2307/1909769.
- Buckley J. J., Feuring T. Linear and non-linear fuzzy regression: Evolutionary algorithm solutions. *Fuzzy Sets and Systems*. 2000. Vol. 112. No. 3. P. 381–394. DOI: 10.1016/s0165-0114(98)00154-7.
- Draper N. R., Smith H. *Applied regression analysis*, 3rd edn. New York: Wiley & Sons, 1998. 736 p. DOI: 10.1002/9781118625590.
- Ивахненко А. Г. *Моделирование сложных систем*. Київ: Вища школа, 1987. 63 с.
- Kapanoglu M., Koc I. O., Erdogmus S. Genetic algorithms in parameter estimation for nonlinear regression models: an experimental approach. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 2007. Vol. 77, no. 10. P. 851–867. DOI: 10.1080/10629360600688244.
- Mohan S. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *Journal of hydraulic engineering*. 1997. Vol. 123, no. 2. P. 137–142. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1997)123:2(137).
- Настенко Е. А., Павлов В. А., Бойко А. Л., Носовец Е. К. Многокритериальный алгоритм шаговой регрессии. *Біомедична інженерія і технологія*. 2020. № 3. С. 48–53. DOI: 10.20535/2617-8974.2020.3.195661.
- Öztürk O. B., Başar E. Multiple linear regression analysis and artificial neural networks based decision support system for energy efficiency in shipping. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 243. P. 110209. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110209.
- Rajković D., Jeromela A. M., Pezo L., Lončar B., Grahovac N., Špika A. K. Artificial neural network and random forest regression models for modelling fatty acid and tocopherol content in oil of winter rapeseed. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023. Vol. 115. P. 105020. DOI: 10.1016/j.jfca.2022.105020.
- Tam V. W. Y., Butera A., Le K. N., Da Silva L. C. F., Evangelista A. C. J. A prediction model for compressive strength of CO₂ concrete using regression analysis and artificial neural networks. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 324. P. 126689. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126689.
- Худсон Д. *Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике*. Москва: Мир, 1970. 296 с.

References (transliterated)

- Pavlov A. A., Holovchenko M. N., Drozd V. V. Efficiency substantiation for a synthetic method of constructing a multivariate polynomial regression given by a redundant representation. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI": zb. nauk. pr. Temat. vyp.: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnologiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1 (9), P. 3–9. DOI: 10.20998/2079-0023.2023.01.01.
- Pavlov A. A., Holovchenko M. N. Modified method of constructing a multivariate linear regression given by a redundant description. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI": zb. nauk. pr. Temat. vyp.: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnologiyi* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 2 (8), P. 3–8. DOI: 10.20998/2079-0023.2022.02.01.
- Pavlov A., Holovchenko M., Mukha I. et al. A modified method and an architecture of a software for a multivariate polynomial regression building based on the results of a conditional active experiment. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications*

- Technologies*. 2023. Vol. 181. P. 207–222. DOI: 10.1007/978-3-031-36118-0_19.
4. Abdulrahman A. T., Alshammari N. S. Factor analysis and regression analysis to find out the influencing factors that led to the countries' debt crisis. *Advances and Applications in Statistics*. 2022, vol. 78, pp. 1–16. DOI: 10.17654/0972361722047.
 5. Flitman A. M. Towards analysing student failures: neural networks compared with regression analysis and multiple discriminant analysis. *Computers and Operations Research*. 1997, vol. 24, no. 4, pp. 367–377. DOI: 10.1016/s0305-0548(96)00060-3.
 6. Johnson R. A., Wichern D. W. *Applied multivariate statistical analysis*, 5th edn. Upper Saddle River, Prentice-Hall, 2002. 767 p.
 7. Knowles D., Parts L., Glass D., Winn J. M. Modeling skin and ageing phenotypes using latent variable models in Infer.NET. *Predictive models in personalized medicine workshop, NIPS 2010*. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/241194775> (accessed 18.05.2024).
 8. Lio W., Liu B. Uncertain maximum likelihood estimation with application to uncertain regression analysis. *Soft Computing*. 2020, vol. 24, no. 13, pp. 9351–9360. DOI: 10.1007/s00500-020-04951-3.
 9. Liu S.S., Zhu Y. Simultaneous maximum likelihood estimation for piecewise linear instrumental variable models. *Entropy*. 2022, vol. 24, no. 9, pp. 1235. DOI: 10.3390/e24091235.
 10. Ruff L., Vandermeulen R., Goernitz N., Deecke D., Siddiqui S. A., Binder A., Müller E., Kloft M. Deep one-class classification. *Proceedings of the 35th international conference on machine learning, PMLR 80*. 2018, pp. 4393–4402. Available at: <http://proceedings.mlr.press/v80/ruffl8a/ruffl8a.pdf> (accessed 18.05.2024).
 11. Scott J. T. Factor analysis and regression. *Econometrica*. 1966, vol. 34, no. 3, pp. 552–562. DOI: 10.2307/1909769.
 12. Buckley J. J., Feuring T. Linear and non-linear fuzzy regression: Evolutionary algorithm solutions. *Fuzzy Sets and Systems*. 2000, vol. 112, no. 3, pp. 381–394. DOI: 10.1016/s0165-0114(98)00154-7.
 13. Draper N. R., Smith H. *Applied regression analysis*, 3rd edn. New York, Wiley & Sons, 1998. 736 p. DOI: 10.1002/9781118625590.
 14. Ivakhnenko, A.G. *Modelirovanie slozhnykh sistem* [Complex systems modelling]. Kyiv, Vyshcha shkola Publ., 1987. 63 p.
 15. Kapanoglu M., Koc I. O., Erdogmus S. Genetic algorithms in parameter estimation for nonlinear regression models: an experimental approach. *Journal of Statistical Computation and Simulation*. 2007, vol. 77, no. 10, pp. 851–867. DOI: 10.1080/10629360600688244.
 16. Mohan S. Parameter estimation of nonlinear Muskingum models using genetic algorithm. *Journal of hydraulic engineering*. 1997, vol. 123, no. 2, pp. 137–142. DOI: 10.1061/(asce)0733-9429(1997)123:2(137).
 17. Nastenka E., Pavlov V., Boyko G., Nosovets O. Mnogokriterial'nyy algoritm shagovoy regressii [Multicriteria stepwise regression algorithm]. *Biomedychna inzheneriya i tekhnolohiya*. 2020, no. 3, pp. 48–53. DOI: 10.20535/2617-8974.2020.3.195661
 18. Öztürk O. B., Başar E. Multiple linear regression analysis and artificial neural networks based decision support system for energy efficiency in shipping. *Ocean Engineering*. 2022, vol. 243, p. 110209. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.110209.
 19. Rajković D., Jeromela A. M., Pezo L., Lončar B., Grahovac N., Špika A. K. Artificial neural network and random forest regression models for modelling fatty acid and tocopherol content in oil of winter rapeseed. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2023, vol. 115, p. 105020. DOI: 10.1016/j.jfca.2022.105020.
 20. Tam V. W. Y., Butera A., Le K. N., Da Silva L. C. F., Evangelista A. C. J. A prediction model for compressive strength of CO2 concrete using regression analysis and artificial neural networks. *Construction and Building Materials*. 2022, vol. 324, p. 126689. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126689
 21. Hudson D. J. *Statistics lectures, volume 2: Maximum likelihood and least squares theory*. CERN Reports 64(18). Geneva, CERN, 1964. (Russ. ed.: Hudson D. *Statistika dlja fizikov: Lekcii po teorii veroyatnostej i jelementarnoj statistike*. Moscow, Mir Publ., 1970. 296 p.). DOI: 10.5170/CERN-1964-018.

Received 25.05.2024

УДК 004:519.24:681.3.06

О. А. ПАВЛОВ, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, професор кафедри інформатики та програмної інженерії; e-mail: pavlov.firot@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>

М. М. ГОЛОВЧЕНКО, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, старший викладач кафедри інформатики та програмної інженерії; e-mail: ma4ete25@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-8046>

В. В. ДРОЗД, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, бакалавр кафедри інформатики та програмної інженерії; e-mail: drozdllera@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0418-1139>

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ПОБУДОВИ БАГАТОВИМІРНОЇ РЕГРЕСІЇ

Запропоновано адаптивний метод побудови багатовимірної регресії, що задається зваженою лінійною згортою відомих скалярних функцій від детермінованих вхідних змінних, коефіцієнти при яких є невідомими. Як, наприклад, коли багатовимірна регресія задається багатовимірним поліномом. На відміну від загальної процедури методу найменших квадратів, що мінімізує лише одну скалярну кількісну міру, адаптивний метод використовує шість різних кількісних мір і представляє собою системно зв'язану сукупність різних алгоритмів, що дозволяють кожну прикладну задачу розв'язувати на їх основі індивідуальним адаптивним алгоритмом, який в випадку активного експерименту навіть для порівняно невеликого об'єму експериментальних даних реалізує стратегію статистично обґрунтованого розв'язання. Невеликий об'єм даних активного експерименту використаний в тому сенсі, що для нього дисперсії оцінок невідомих коефіцієнтів, отриманих загальною процедурою методу найменших квадратів, не дозволяють гарантувати допустиму для практики точність. Пропонується також суттєво підвищити ефективність запропонованого Павловим О.А. та Головченко М.М. модифікованого методу групового урахування аргументів побудови багатовимірної регресії, лінійної відносно невідомих коефіцієнтів та заданої надлишковим описом, за рахунок включення в нього деяких критеріїв та алгоритмів адаптивного методу побудови багатовимірної регресії. Для випадку завдання регресії багатовимірним поліномом включення часткового випадку нової версії модифікованого методу групового урахування аргументів в синтетичний метод побудови багатовимірної поліноміальної регресії, заданої надлишковим описом, запропонованого Павловим О.А., Головченко М.М. та Дрозд В.В., також суттєво підвищує його ефективність.

Ключові слова: багатовимірна регресія, інтегральна міра, адаптивний алгоритм, регресійний аналіз, експертні коефіцієнти, лінійне програмування.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Павлов Олександр Анатолійович, Pavlov Alexander Anatolievich

Автор 2 / Author 2: Головченко Максим Миколайович, Holovchenko Maxim Nikolaeovich

Автор 3 / Author 3: Дрозд Валерія Валеріївна, Drozd Valeriia Valeriivna

В. Є. СОКОЛ, кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; e-mail: volodymyr.sokol@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>

М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», директор інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій; м. Харків, Україна; e-mail: Mykhailo.Hodlevskiy@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>

Д. К. МАЛЕЦЬ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, м. Харків, Україна; e-mail: dmytro.malets@cs.khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1980-1401>

ОЦІНКА ЯКОСТІ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІТ-КОМПАНІЇ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ФУНКЦІЇ КОРИСНОСТІ

У роботі процес розробки програмного забезпечення розглядається як об'єкт дослідження, який є слабко структурованою системою. Наведено опис таких систем у вигляді загальних характеристик, до яких відносяться: труднощі побудови аналітичної моделі; неповнота, неточність, недостовірність та невизначеність інформації; еталони, які необхідні для оцінки слабко структурованих систем, доволі часто відсутні; унікальність процесу прийняття рішень; динамічний характер моделей слабко структурованих систем і т. ін. У роботі оцінка якості процесу розробки програмного забезпечення розглядається на основі стандартів моделей зрілості, які можуть мати безперервний та дискретний варіанти. На основі безперервного варіанта проводиться оцінка якості окремих фокусних областей та процесів моделей зрілості. Для цього використовується дискретна бальна шкала першого типу, коли оцінка проводиться за об'єктивним критерієм. Оцінка якості окремих фокусних областей та процесів характеризує локальні критерії оцінки якості всього процесу розробки програмного забезпечення. І тому стоїть задача на їхній основі формування деякої інтегральної оцінки якості. Як один з варіантів реалізації цієї проблеми є дискретна модель зрілості, де шкала для оцінки всього процесу розробки програмного забезпечення має п'ять градацій, які називаються рівнями зрілості. Починаючи з другого рівня, кожна градація характеризується множиною фокусних областей з відповідними рівнями можливості. Наявність такої шкали дозволяє проводити не тільки оцінку якості всього процесу розробки програмного забезпечення, але і вирішувати задачу планування підвищення його якості. Але попередньо необхідно провести аналіз такої шкали з погляду її збалансованості, а саме, щоб відстані на шкалі між градаціями були приблизно однаковими. Тому у роботі проведено аналіз існуючих шкал, які можуть бути запропоновані для експертного оцінювання якості процесу розробки програмного забезпечення. Їхня побудова може бути реалізована на основі функції корисності з використанням формалізованих у роботі локальних критеріїв моделей зрілості. Для цього використовується фундаментальна властивість систем. А саме, залежність корисності (ефективності) складної системи від вкладених ресурсів на інтервалі життєвого циклу, яка зазвичай має вигляд логістичної кривої. Подальші дослідження будуть присвячені використанню цього факту для побудови збалансованої шкали оцінки всього процесу розробки програмного забезпечення на основі моделей зрілості.

Ключові слова: процес розробки програмного забезпечення, якість програмних систем, слабко структурована система, модель зрілості, шкала критерію, локальні критерії, функція корисності, експерти.

Вступ. Одним з недостатньо вивчених об'єктів наукових досліджень є слабко структуровані віртуальні системи, до яких належить процес розробки програмного забезпечення (ПР ПЗ), який є об'єктом дослідження роботи. Тому попередньо дамо опис слабко структурованих систем, для яких характерні задачі підтримки прийняття рішень [1, 2], шляхом їхньої стислої характеристики на прикладі ПР ПЗ.

1. Наявність труднощів побудови аналітичної моделі у зв'язку з вербальним описом більшості моделей оцінки якості ПР ПЗ. Відсутність об'єктивної цільової функції оптимізації всього ПР ПЗ. Формалізувати таку цільову функцію, як правило, доволі важко (іноді практично неможливо) через множини факторів, які можуть впливати на її побудову та функціонування. Іноді незрозуміло, яким чином ці фактори впливають один на одного.

2. Можливість проводити оптимізацію тільки окремих складових слабко структурованих систем. При цьому у загальному випадку це не призводить до оптимальності всієї складної системи.

3. Як правило, опис складних слабко структурованих систем пов'язаний з неповнотою, неточністю, недостовірністю та невизначеністю інформації про її стан. Це безпосередньо відноситься до стану ПР ПЗ ІТ

компанії. Все це призводить до труднощів побудови відповідних адекватних моделей об'єкта дослідження.

4. Доволі часто еталони, які побудовано для оцінки слабко структурованих систем, або відсутні, або побудовані таким чином, що на їхній основі важко оцінити якість окремих складових системи.

5. Процес прийняття рішень в слабко структурованих системах є унікальним і не може бути перенесеним автоматично на інші області. Наприклад, побудова шкали оцінки ПР ПЗ ІТ компанії з урахуванням усіх її особливостей не може бути перенесена автоматично на іншу ІТ-компанію, яка має інші особливості. В цьому випадку можна використовувати тільки ідеологію побудови такої шкали.

6. Як правило, всі моделі слабко структурованих систем поділяються на статичні та динамічні. Модель ПР ПЗ ІТ компанії, як слабко структурованої складної системи, є динамічною і розглядається на деякому плановому періоді. В процесі функціонування ПР ПЗ він змінюється, адаптується до зовнішнього середовища. З метою отримання адекватної моделі об'єкта дослідження пропонується використовувати поняття ковзного планування, при якому розглядається спочатку динамічна модель, яка є основою для побудови

© Сокол В. Є., Годлевський М. Д., Малець Д. К., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Конфлікт інтересів: Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



статичної, більш детальної, на окремому підперіоді планування.

7. Оцінка якості слабко структурованих систем, як правило, пов'язана з окремими експертами або сформованою групою (командою) експертів і тому однією з важливих властивостей таких систем є вплив людського фактора. Експерти мають свої особисті цілі і тому їхня поведінка доволі тяжко враховується.

8. Наступною важливою властивістю ПР ПЗ як слабко структурованої системи є велика розмірність простору, в якому розглядається задача. Це призводить до неможливості звичайного перебору варіантів структури та параметрів системи (структурного та параметричного синтезу). Тому виникає задача розробки алгоритмів спрямованого перебору.

Однією з важливих задач в області інженерії програмного забезпечення є оцінка та планування підвищення якості ПР ПЗ як слабко структурованої віртуальної системи. Тому у подальшому розглянемо більш детально ПР ПЗ: основні визначення науковців, підходи до оцінки якості і на цій основі сформулюємо мету та визначимо постановку задачі дослідження.

Постановка та мета задачі дослідження. Попередньо дамо загальне визначення процесного підходу до вирішення задачі розробки складних систем як засобу наукового дослідження навколишнього світу з метою його практичного перетворення. Необхідно підкреслити, що процесний підхід це набір дій (процесів), які дозволяють перетворити вихідну інформацію/сировину/проміжний продукт у кінцевий продукт/послугу. При цьому множина процесів вибудовується у певній послідовності. Такий підхід будемо розглядати щодо розробки програмних систем. Фактично це те, чим займається інженерія програмного забезпечення. Отже, у подальшому всі досягнення в області процесного підходу розглянемо з погляду розробки програмних продуктів [3–5]. Перед тим, як розглянути основні процеси, які притаманні ПР ПЗ, дамо декілька визначень провідних вчених, які з різних боків розглядають ПР ПЗ.

Необхідно підкреслити, що в роботі [6] було вперше підкреслено необхідність застосування процесного підходу до розробки програмного забезпечення. Саме автор цих досліджень дав наступне визначення процесу розробки програмного забезпечення. Це множина дій, яка відноситься до програмної інженерії і необхідна для перетворення вимог користувачів у програмне забезпечення. Більш детально та розгорнуте визначення ПР ПЗ дається у роботі [7], де підкреслено, що це набір моделей, методів, технологій та практичних процедур, які реалізуються на основі окремих етапів та фаз проєкту ІТ спеціалістами для розробки та супроводу програмного забезпечення. Автор наукового дослідження [8] розглядає процес розробки ПЗ як деяку множину етапів ІТ проєкту, яка включає: формування вимог до ПЗ та їхню обробку бізнес аналітиками, формування архітектури ПЗ, проектування ПЗ, кодування, проведення тестування, супровід ПЗ. Крім цього розглядаються питання забезпечення якості ПЗ, управління ризиками при розробці ПЗ та управління проєктом протягом усього

його життєвого циклу. Всі ці визначення ПР ПЗ збігаються на тому, що це впорядкована сукупність дій (процесів), яка спрямована на розробку програмної системи (програмного продукту).

Тепер перейдемо до вирішення питання, яким чином формується конкретний екземпляр ПР ПЗ. Для вирішення цієї проблеми необхідно відповісти на два питання [9]: 1) з яких етапів (дій, процесів) складається ПР ПЗ; 2) яка послідовність цих етапів і які умови переходу між ними. Визначення переліку процесів, які задіяно у ПР ПЗ, дає відповідь на перше питання. Модель життєвого циклу (ЖЦ) ПР ПЗ – це визначення послідовності процесів ПР ПЗ і відповідь на друге питання. Перейдемо до більш детального розгляду першого та другого питань.

Найбільш загальним є стандарт ISO 9001 [10]. Він спрямований на використання процесного підходу при розробці, впровадженні та покращенні якості складної системи з метою виконання потреб користувачів її послуг.

Підкреслимо основні недоліки стандарту ISO 9001:

- при досягненні організацією вимог стандарту в той же час не дається ніяких рекомендацій щодо покращення якості процесів;
- не дає об'єктивної кількісної оцінки рівня якості процесів (і в тому числі це відноситься до ПР ПЗ). Процес або відповідає стандарту, або ні.
- ще до одного недоліку стандарту необхідно віднести те, що свобода його інтерпретації – ціна за абстракцію, яку було введено з метою можливості використання для великої кількості організацій різного профілю діяльності.

Стисло дамо характеристику стандартам, процеси яких спрямовані на розробку програмного забезпечення. В першу чергу це стандарт ISO/IEC 9126, який основну увагу приділяє визначенню якості програмного забезпечення [11]. Далі це стандарт ISO/IEC 25010 [12], який замінив попередній стандарт. У цьому стандарті приділено більше уваги безпеці.

Наступними є стандарти, які пов'язані з моделями зрілості. В першу чергу це стандарт ISO/IEC 15504 TR Software Process Improvement and Capability dEtermination (SPICE) [13].

В цьому стандарті процес визначення якості ПР ПЗ називається атестацією, яку проводить спеціальна атестаційна комісія, яку очолює провідний атестатор. Стандарт ISO/IEC 15504 TR містить посібник по визначенню компетентності атестатора. Ця еталонна модель визначає високорівневі фундаментальні цілі, які визначають що повинно бути досягнуто, а не те як і коли це досягти.

Наступний стандарт Capability Maturity Model Integration (CMMI) розроблено Інститутом програмної інженерії (Software Engineering Institute, SEI) [14]. Цей стандарт (модель) базується на попередній моделі Capability Maturity Model (CMM).

Рівень якості (зрілості) всього ПР ПЗ відповідно до моделі CMMI визначається на основі наступних процесів (фокусних областей):

1. Виконання моніторингу і контролю проєкту.
2. Планування проєкту.
3. Управління вимогами.
4. Управління угодами з постачальниками.
5. Управління конфігурацією.
6. Вимірювання та аналіз.
7. Забезпечення якості процесу та продукту.
8. Визначення організаційного процесу.
9. Формування організаційного процесу.
10. Організаційне навчання.
11. Інтегроване управління проєктами.
12. Управління ризиками.
13. Інтеграція продукту.
14. Розробка вимог.
15. Технічні рішення.
16. Валідація.
17. Верифікація.
18. Аналіз та вибір рішень.
19. Організаційна ефективність процесу.
20. Кількісне управління проєктами.
21. Управління процесами.
22. Причинно-наслідковий аналіз.

Окремі процеси моделі SPICE та перелічені фокусні області моделі CMMI визначають якість окремих складових ПР ПЗ. Відповідно до наведених стандартів цих моделей зрілості рівень якості процесів і фокусних областей визначається на вербальному рівні. Крім цього, тільки модель CMMI оцінює якість всього ПР ПЗ на основі рівнів зрілості. Але незрозуміло, яким чином корелює якість ПР ПЗ з п'ятьма рівнями зрілості. Для моделі SPICE зовсім відсутня шкала оцінки якості всього ПР ПЗ. Обидві моделі не враховують особливості функціонування ІТ компанії, для якої розглядається ПР ПЗ.

Отже, мета наукової роботи полягає в тому, щоб розробити дієвий засіб для синтезу збалансованої шкали оцінки якості всього ПР ПЗ для моделей зрілості CMMI та SPICE і у подальшому вирішувати питання врахування особливостей функціонування ІТ компанії при побудові таких шкал.

Аналіз шкал критеріїв для експертного оцінювання якості ПР ПЗ. Проведемо аналіз шкал, які можуть бути використані при оцінці слабо структурованої системи, у тому числі ПР ПЗ ІТ-компанії. Розглянемо та проаналізуємо окремих підклас шкал порядку, до якого відносяться бальні шкали двох типів. У першому випадку оцінка експертом проводиться за об'єктивним критерієм, наприклад у вигляді лінгвістичної фрази. Оцінки експертів фактично є деякими флуктуаціями реальних значень. Зазвичай при цьому є загальноприйнятні еталони, що відповідають градаціям шкали, з якими порівнюються об'єкти, які розглядаються. Бальна оцінка другого виду використовується коли не тільки немає загальноприйнятних еталонів, а й сумнівна сама наявність якогось єдиного об'єктивного критерію, суб'єктивними відображеннями якого є оцінки [15]. У подальшому будемо розглядати бальні шкали першого типу і за основу візьмемо шкалу Т. Сааті, яка доволі часто називається фундаментальною шкалою, в якій

лінгвістичні фрази англійською мовою були запропоновані Т. Сааті [16]. Ця шкала використовується у двох видах: з п'ятьма та дев'ятьма градаціями. Шкала з 9-ма градаціями та похідні від неї наведено в табл. 1. На перших етапах своїх досліджень Т. Сааті використовував п'ятибальну шкалу: 1, 3, 5, 7, 9. Необхідно підкреслити, що формування лінгвістичних фраз, які характеризують окремі недоліки шкали, повинні абсолютно однозначно визначити різницю між ступенем переваги між альтернативами, які розглядаються. З іншої сторони, залежно від об'єктів, які оцінюються, може бути використана більш деталізована шкала з більшою кількістю поділок. Тому у подальшому в дослідженнях Т. Сааті використовувались проміжні поділки: 2, 4, 6, 8 (табл. 1).

У наукових дослідженнях було звернуто увагу на те, що цілочисельні шкали (у тому числі шкали Т. Сааті) дають нерівномірний розподіл ваг альтернатив. Тому у [17] було запропоновано наступний підхід. Якщо вважати, що сума вагових коефіцієнтів ρ_1 та ρ_2 двох альтернатив, які порівнюються, дорівнює одиниці, то можна розглянути формування дев'ятибальної шкали наступним чином (табл. 2). У такій шкалі вдалося уникнути нерівномірності. Тому шкала була названа збалансованою. В цьому випадку кожному цілочисельному значенню шкали від 1 до 9 відповідає значення $\alpha = \rho_1/\rho_2$.

Наступним прикладом збалансованої шкали є ступенева шкала, яка була запропонована в роботі [18]. У цьому випадку використовується наступна формула $\alpha = \frac{p-1}{\sqrt{9^{z-1}}}$, де p – кількість поділок шкали, z – ціле число зі шкали Т. Сааті. Слід відзначити ще одну шкалу, яка представлена у роботі [19] і для якої $\alpha = p/(p+1-z)$ (шкала Ма-Чжена).

У роботі [20] проведено дослідження, пов'язане з кількістю градацій шкали і компетентністю експерта. Виявилось, що немає потреби мати багато градацій у тому випадку, коли експерт не має високого рівня компетентності з проблеми, яка розглядається. Один з висновків, який можна зробити, пов'язаний з тим, що експерт повинен сам визначити кількість поділок шкали при виконанні експертизи.

Висновки, які можна зробити з наведеного розгляду бальних шкал першого типу, пов'язані з тим, що необхідно проаналізувати наскільки дискретний варіант моделі зрілості CMMI має збалансовану п'ятибальну шкалу. Необхідність в цьому виникає, якщо вирішується задача планування розвитку ПР ПЗ і бажано мати поділки шкали, які знаходяться приблизно на однаковій відстані одна від другої з погляду якості ПР ПЗ, яку бажано ототожнювати з деякою функцією корисності ПР ПЗ. З іншої сторони, при побудові дискретної моделі на основі еталонної моделі SPICE (аналог дискретного варіанта CMMI) теж виникає проблема побудови збалансованої шкали. Отже, можна визначити, що це одна з проблем при вирішенні задачі планування розвитку ПР ПЗ.

Оцінка якості ПР ПЗ на основі функції корисності. Перед тим як перейти до оцінки якості ПР

Таблиця 1 – Шкала Т. Сааті та її похідні

| Лінгвістична фраза | | Шкала | | | |
|-----------------------------------|------------------------------|----------|--------------|-------------------------------|-----------|
| Англійською | Українською | Т. Сааті | Збалансована | Степенева | Ма-Чжена |
| Числа, поставлені у відповідність | | | | | |
| Equally | Немає переваги | 1 | 1 | $\sqrt[9]{9^0} = 1$ | $9/9=1$ |
| Weakly or slightly preferred | Слабка або незначна перевага | 2 | 11/9 | $\sqrt[9]{9^1} \approx 1,316$ | 9/8 |
| Moderately preferred | Середня перевага | 3 | 3/2 | $\sqrt[9]{9^2} \approx 1,732$ | 9/7 |
| Moderately plus preferred | Більш ніж середня перевага | 4 | 13/7 | $\sqrt[9]{9^3} \approx 2,28$ | $9/6=3/2$ |
| Strongly preferred | Сильна перевага | 5 | 7/3 | $\sqrt[9]{9^4} = 3$ | 9/5 |
| Strongly plus preferred | Більш ніж сильна перевага | 6 | 3 | $\sqrt[9]{9^5} \approx 3,948$ | 9/4 |
| Very strongly preferred | Дуже сильна перевага | 7 | 4 | $\sqrt[9]{9^6} \approx 5,196$ | $9/3=3$ |
| Very, very strongly preferred | Дуже, дуже сильна перевага | 8 | 17/3 | $\sqrt[9]{9^7} \approx 6,839$ | 9/2 |
| Extremely preferred | Надзвичайна перевага | 9 | 9 | $\sqrt[9]{9^8} = 9$ | $9/1=9$ |

Таблиця 2 – Формування збалансованої шкали

| Цілочисельна шкала | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| ρ_1 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 | 0,8 | 0,85 | 0,9 |
| ρ_2 | 0,5 | 0,45 | 0,4 | 0,35 | 0,3 | 0,25 | 0,2 | 0,15 | 0,1 |

ПЗ ІТ-компанії, розглянемо структуру кожної з цих моделей. Модель СММІ має дискретний та безперервний варіанти оцінки. На основі безперервного варіанта проводиться оцінка окремих фокусних областей моделі. Для цього варіанта структура моделі представлена на рис. 1, де \bar{K} – множина категорій фокусних областей, а \bar{I}^k – множина фокусних областей k -ї категорії.

В свою чергу модель SPICE є тільки безперервною і складається з множини окремих процесів. Її ієрархічна структура наведена на рис. 2, де K – множина категорій процесів, а P^k – множина процесів k -ї категорії.

Фактично оцінки якості окремих фокусних областей моделі СММІ та оцінка якості окремих процесів моделі SPICE є локальними оцінками всього ПР ПЗ. Тому на першому етапі необхідно розглянути проблему формалізації окремих локальних критеріїв моделі СММІ та SPICE. З цієї метою на рис. 3 і рис. 4 представлені структури фокусної області моделі СММІ та процесу моделі SPICE. S_i^k – множина цілей i -ї фокусної області, яка належить до k -ї категорії, \bar{J}_i^{ks} – множина практик s -ї цілі, яка належить до i -ї

фокусної області k -ї категорії. J_p^k – множина практик p -го процесу k -ї категорії.

З погляду теорії прийняття рішень для кожного локального об'єкта ПР ПЗ (фокусні області, процеси) розглядаються три групи критеріїв: 1) ступінь досягнення поставленої мети; 2) ресурсні витрати; 3) час.

Отже, при формуванні локальних критеріїв будемо розглядати динамічну задачу з періодом планування $[1, T]$, де T – тривалість планування. Відповідно до [21] будемо розглядати дві групи критеріїв оцінки якості окремих складових моделей зрілості СММІ та SPICE при фіксованому періоді планування.

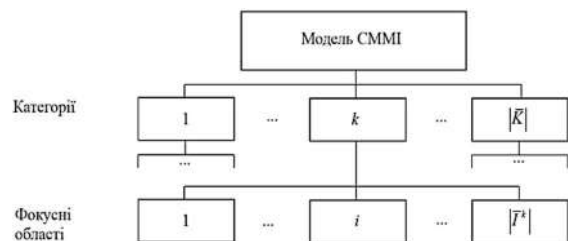


Рис. 1. Ієрархічна структура безперервної моделі СММІ

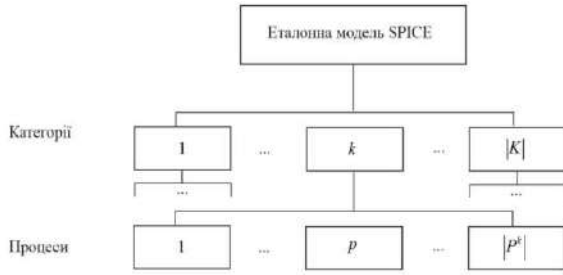


Рис. 2. Ієрархічна структура моделі SPICE

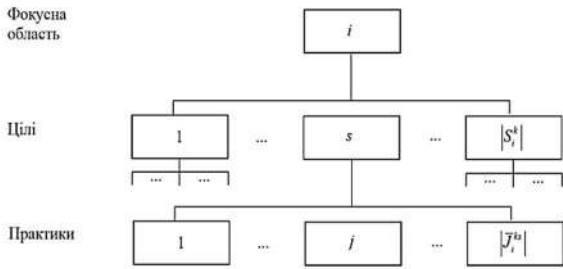


Рис. 3. Структура фокусної моделі СММІ

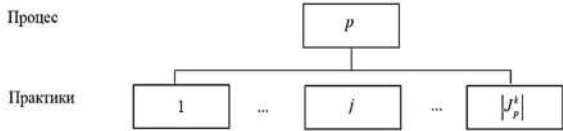


Рис. 4. Структура процесу моделі SPICE

З погляду теорії прийняття рішень для кожного локального об'єкта ПР ПЗ (фокусні області, процеси) розглядаються три групи критеріїв: 1) ступінь досягнення поставленої мети; 2) ресурсні витрати; 3) час.

Отже, при формуванні локальних критеріїв буде розглядати динамічну задачу з періодом планування $[1, T]$, де T – тривалість планування. Відповідно до [21] будемо розглядати дві групи критеріїв оцінки якості окремих складових моделей зрілості СММІ та SPICE при фіксованому періоді плануванні.

З метою формалізації моделі СММІ у роботі [21] введено поняття рівня можливості окремої практики, який відповідає деякій технології, для реалізації якої необхідні ресурси (фінансові, людські). Окремому рівню можливості практики відповідає конкретне значення цілочисельної змінної

$$x_{ij}^{ks}(t) = \overline{0,3}, j \in \bar{J}_i^{ks}, s \in S_i^k, i \in \bar{I}^k, k \in \bar{K}, t \in [1, T].$$

В свою чергу на основі рівнів можливості окремих практик формується рівень можливості s -ї цілі, яка входить в i -ту фокусну область

$$y_i^{ks}(t) = f_i^{ks}(\{x_{ij}^{ks}(t)\}).$$

Далі на основі множини цілей, які водять в i -ту фокусну область формується (визначається) її рівень можливості

$$Z_i^k(t) = F_i^k(\{y_i^{ks}(t)\}).$$

У разі вирішення задачі планування розвитку фокусних областей ПР ПЗ формуються ресурсні критерії, які забезпечують досягнення заданих планових

показників. У роботі [22] розглядаються два види ресурсів: фінансові витрати та час для переходу практик і фокусної області на більш високий рівень можливості, які необхідні для оволодіння нових технологій, інструментів і т. ін.

Одним з підходів визначення функцій f_i^{ks} та F_i^k є згортка окремих оцінок практик з урахуванням вагових коефіцієнтів практик та цілей в межах їхньої фокусної області

$$Z_i^k(t) = \sum_{s \in S_i^k} \rho_i^{ks} \sum_{j \in \bar{J}_i^{ks}} \rho_{ij}^{ks} x_{ij}^{ks}(t),$$

$$i \in \bar{I}^k, k \in \bar{K}, t \in [1, T],$$

де

$${}^1\rho_{ij}^{ks} > 0, j \in \bar{J}_i^{ks}; \sum_{j \in \bar{J}_i^{ks}} {}^1\rho_{ij}^{ks} = 1, s \in S_i^k, i \in \bar{I}^k, k \in \bar{K},$$

$${}^2\rho_i^{ks} > 0, s \in S_i^k, \sum_{s \in S_i^k} {}^2\rho_i^{ks} = 1, i \in \bar{I}^k, k \in \bar{K}.$$

Логічно вважати, що кожна практика, а значить і фокусна область, попередньо мають нульовий рівень можливості. Для досягнення першого, другого та третього рівнів, як було визначено вище, необхідно вкладати ресурси двох типів. Фокусна область може не в повному обсязі володіти деяким рівнем можливості. Тому введемо поняття ступеня володіння i -ю фокусною областю γ -рівня можливості, де $\gamma = 1, 2, 3$. З цією метою введемо нові змінні

$${}^\gamma \bar{x}_{ij}^{ks}(t) = \begin{cases} x_{ij}^{ks}(t) : x_{ij}^{ks}(t) \leq \gamma, \\ \gamma : x_{ij}^{ks}(t) > \gamma, \end{cases}$$

$$j \in \bar{J}_i^{ks}, s \in S_i^k, \gamma = \overline{1,3}, i \in \bar{I}^k, k \in \bar{K}, t \in [1, T]$$

та функцію

$${}^\gamma Z_i^k(t) = \sum_{s \in S_i^k} {}^2\rho_i^{ks} \sum_{j \in \bar{J}_i^{ks}} {}^1\rho_{ij}^{ks} {}^\gamma \bar{x}_{ij}^{ks}(t),$$

$$i \in \bar{I}^k, k \in \bar{K}, t \in [1, T], \gamma = \overline{1,3}.$$

Тоді ступінь володіння i -ю фокусною областю γ -рівня можливості ${}^\gamma \omega_i^{kt}$ визначається наступним чином

$${}^\gamma \omega_i^{kt} = {}^\gamma Z_i^k(t) / \gamma, \gamma = \overline{1,3}. \quad (1)$$

Перейдемо до розгляду питання оцінки якості окремого процесу моделі SPICE. Відповідно до [23] обчислення рівня можливості окремого процесу реалізується наступним чином. Вважається, що кожна практика має п'ять рівнів можливості, які визначаються на основі дев'яти наступних атрибутів: 1) виконання окремої практики; 2) управління виконанням практики; 3) управління робочими продуктами; 4) визначення практики; 5) забезпечення практики ресурсами; 6) вимірювання показників практики; 7) кількісне управління практикою; 8) зміна практики; 9) безперервне управління практикою.

Для кожного атрибута вводиться змінна $X_{pj}^{kt}(\alpha)$, яка визначає ступінь володіння рисою α -атрибута j -ї

практики, p -го процесу k -ї категорії для t -го підпроцесу, $t \in [1, T]$. Відповідно до моделі SPICE вважається, що атрибут має чотири рівні володіння рисою залежно від частоти використання, яка визначається наступним чином:

- 1) N – не володіє [0 % – 15 %];
- 2) P – володіє частково [16 % – 50 %];
- 3) L – володіє в основному [51 % – 85 %];
- 4) F – володіє в основному [86 % – 100 %].

Вважається, що $X_{pj}^{kt}(\alpha) \in \{1, 2, 3, 4\}$, де 1 відповідає букві N , 2 – P , 3 – L , 4 – F . Залежно від рівня володіння рисою кожного атрибута визначається рівень можливості кожної практики. Технологія визначення рівня можливості практики залежно від рівня володіння рисою наведена в табл. 1 роботи [23]. У цій роботі було введено поняття матриці оцінки атрибутів усіх практик кожного процесу моделі SPICE

$$X_p^{kt} = \{X_{pj}^{kt}(\alpha) : \alpha = \overline{1,9}, j \in J_p^k\}, \\ p \in P^k, k \in K, t \in [1, T]$$

та гранична матриця оцінки рівня можливості окремої практики

$$\Lambda = \{\Lambda(\gamma, \alpha), \gamma = \overline{0,5}, \alpha = \overline{1,9}\},$$

яку наведено в табл. 2 роботи [23].

В цій матриці введено допоміжний нульовий рівень можливості, що сповільнює формування так званої матриці «відповідності» $\Phi_p^{kt}(\gamma)$, яка визначає наскільки практика відповідає γ -рівню можливості шляхом порівняння матриці оцінок X_p^{kt} та граничної матриці Λ . Це реалізується наступним чином

$$\Phi_p^{kt}(\gamma) = \begin{cases} \gamma \Phi_{pj}^{kt}(\alpha) = \begin{cases} X_{pj}^{kt}(\alpha) : X_{pj}^{kt}(\alpha) < \Lambda(\gamma, \alpha) \\ \Lambda(\gamma, \alpha) : X_{pj}^{kt}(\alpha) \geq \Lambda(\gamma, \alpha) \end{cases}, \\ \alpha = \overline{1,9}; j \in J_p^k \end{cases},$$

$$p \in P^k, k \in K, t \in [1, T], \gamma = \overline{0,5}.$$

Отже, ми отримали окремі елементи $\gamma \Phi_{pj}^{kt}(\alpha)$ матриці $\gamma \Phi_p^{kt}$, які визначають для кожної j -ї практики p -го процесу ступінь володіння рисою по кожному атрибуту. Далі визначається для кожного p -го процесу інтегральна ступінь володіння рисою по кожному атрибуту з урахуванням вагових коефіцієнтів важливості практик $\{\rho_{pj}^k\}$, які входять до p -го процесу. Це реалізується наступним чином

$$\gamma M_p^{kt} = \left\{ \gamma M_p^{kt}(\alpha) = \sum_{j \in J_p^k} \rho_{pj}^k \cdot \Phi_{pj}^{kt}(\alpha), \alpha = \overline{1,9} \right\}, \\ p \in P^k, k \in K, t \in [1, T], \gamma = \overline{0,5}$$

при умові

$$\rho_{pj}^k > 0, \forall j \in J_p^k, \sum_{j \in J_p^k} \rho_{pj}^k = 1, p \in P^k, k \in K.$$

Якщо розглядати рядки вектору $\Lambda(\gamma) = \{\Lambda(\gamma, \alpha), \alpha = \overline{1,9}\}$, $\gamma = \overline{0,5}$, то для кожного γ -рівня можливості вони будуть визначати еталон досягнення процесом відповідного рівня можливості. Тому у роботі [23] ступінь володіння p -м процесом γ -рівня можливості було запропоновано визначити наступним чином

$$\gamma \Theta_p^{kt} = \|\gamma M_p^{kt}\| / \|\Lambda(\gamma)\|, \gamma = \overline{0,5}, \quad (2)$$

де

$$\|\gamma M_p^{kt}\| = \sqrt{\sum_{\alpha=1}^9 [\gamma M_p^{kt}(\alpha)]^2}; \\ \|\Lambda(\gamma)\| = \sqrt{\sum_{\alpha=1}^9 [\Lambda(\gamma, \alpha)]^2}.$$

Отже, на основі структур фокусної області моделі СММІ (рис. 1, рис. 3), а також процесу моделі SPICE (рис. 2, рис. 4), було сформовано локальні критерії (1) та (2), які визначають якість окремих складових моделі СММІ та моделі SPICE. На основі цих локальних критеріїв моделей зрілості стоїть задача визначити інтегральну якість всього ПР ПЗ ІТ-компанії. Відповідно до дискретної моделі СММІ була визначена бальна шкала з п'ятьма градаціями, кожна з яких визначається як рівень зрілості. Розглядається бальна шкала першого типу, кожна градація якої зазвичай докладно описується. У роботі [24] дано такий опис, а в табл. 3 наведено множини номерів фокусних областей на кожному рівні зрілості. Отже, табл. 3 сумісно з описом фокусних областей, які наведено вище, дають вичерпну характеристику бальної шкали першого типу (рівнів зрілості ІТ-компанії).

Труднощі проблеми оцінювання всього ПР ПЗ ІТ-компанії як об'єкта дослідження полягає в тому, що він характеризується, як це було розглянуто вище, багатьма локальними критеріями (показниками) і неможливо вибрати єдиний критерій, який досить повно характеризує цей об'єкт [15]. У зв'язку з цим виникає необхідність:

1) формування множини локальних критеріїв, які досить повно відображають усі значущі характеристики ПР ПЗ. Щодо моделей СММІ та SPICE формалізація таких локальних критеріїв реалізована;

2) вибору на множині локальних критеріїв метрики, що дозволяє встановлювати на множині варіантів реалізації ПР ПЗ відношення порядку.

Табл. 3 є прикладом вирішення другої задачі, де локальні критерії об'єднані у множини, кожна з яких характеризує деякий рівень якості ПР ПЗ. У цьому випадку використана шкала, де максимальний рівень якості відповідає п'ятому рівню зрілості, а мінімальний – першому. Другий, третій та четвертий рівні є проміжними і неможливо оцінити відстані між різними

Таблиця 3 – Структура дискретної моделі СММІ

| Категорії | | | | Рівні зрілості | | | | |
|----------------------|-----------|----------------------|-----------|----------------|---|---|---|---|
| Управління проєктами | Підтримка | Управління процесами | Інженерія | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| – | – | – | – | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 5 | | | | | | | |
| 2 | 6 | | | | | | | |
| 3 | 7 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | |
| 8 | 10 | 11 | 14 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 9 | | 12 | 15 | | | | | |
| | | 13 | 16 | | | | | |
| | | | 17 | | | | | |
| | | | 18 | | | | | |
| 19 | | 20 | | | | | | |
| | 21 | 22 | | | | | | |

градаціями цієї шкали. Наприклад, наскільки четвертий рівень зрілості (якості) перевищує третій у порівнянні з тим, наскільки третій перевищує другий. Відсутність такої можливості значно ускладнює вирішення задачі планування підвищення рівня якості ПР ПЗ. Тому з метою усунення (ліквідації) цього недоліку пропонується використання теорії корисності [25], яка є основою формування багатокритеріальних скалярних оцінок і передбачає існування кількісної оцінки переваги окремих альтернатив. Це означає, що, якщо альтернативний варіант ПР ПЗ X_1 переважає альтернативний варіант X_2 , то $\bar{F}(X_1) > \bar{F}(X_2)$, де $\bar{F}(X_1)$, $\bar{F}(X_2)$ – значення функції корисності $\bar{F}(X)$. У загальному випадку справедливо і зворотне твердження. Отже, корисність є кількісною мірою «якості» рішень. У зв'язку з цим виникає задача обґрунтування правила (метрики), за яким формується функція корисності в просторі множини локальних критеріїв. З погляду фундаментальної властивості систем у роботі [15] підкреслюється, що залежність корисності (ефективності) складної системи від вкладених ресурсів (фінансових, людських і т. ін.) на інтервалі життєвого циклу зазвичай описується логістичною кривою. Застосуємо цю властивість до побудови дискретної моделі зрілості СММІ. Якщо вважати, що інтервал зміни функції корисності $[0,1]$, то логічним буде прийняти, що п'ятий рівень зрілості відповідає, з погляду функції корисності, одиниці. На рис. 5 наведено варіанти функції корисності залежно від використаних ресурсів R . \bar{P}_i^j , $i = \overline{1,5}$, $j = \overline{1,3}$ – значення функції корисності, де i – рівень зрілості, а j – варіант логістичної кривої; R_i , $i = \overline{1,5}$ – ресурси, необхідні для досягнення i -го рівня зрілості. Для того, щоб не зашарашувати рисунок, на осі $\bar{F}(R(X))$ відзначено тільки перший варіант логістичної кривої.

При такому підході до побудови функції корисності на основі попередніх міркувань неможливо визначити конкретні значення функції корисності на інтервалі $[0,1]$ для кожного рівня зрілості, а значить побудувати збалансовану шкалу оцінки якості ПР ПЗ.

Тому пропонується інший підхід до вирішення цієї проблеми на основі локальних критеріїв (1, 2), моделей зрілості.

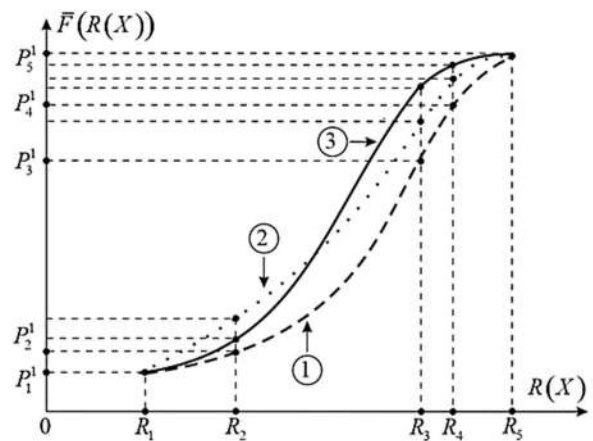


Рис. 5. Варіанти функції корисності

Будемо вважати, що визначені необхідні ресурси до забезпечення максимального рівня можливості кожної фокусної області моделі СММІ та процесу моделі SPICE. Рівні зрілості моделі СММІ з відповідною множиною фокусних областей будемо вважати базовими, які є цілями для підвищення якості ПР ПЗ. Далі на основі використання методології колективного експертного оцінювання визначається ступінь важливості кожного рівня зрілості з погляду якості ПР ПЗ, а також вагові коефіцієнти важливості кожної фокусної області в межах відповідного рівня зрілості. На цій основі реалізується синтез інтегральних функцій корисності для кожного рівня і сумарна функція корисності, для якої кожному об'єму фінансових витрат будуть відповідати конкретні її значення. Це дозволить збільшити кількість градацій шкали дискретної моделі СММІ і синтезувати збалансовану шкалу. При визначенні базових рівнів зрілості для моделі SPICE (аналогічних моделі СММІ) можна використати аналогічний підхід до побудови збалансованої шкали.

Висновки, шляхи подальших досліджень. У роботі ПР ПЗ розглядається як об'єкт дослідження, який є слабо структурованою віртуальною системою. Визначені основні проблеми, які характерні для таких

систем при оцінці та плануванні підвищення їхньої якості на прикладі ПР ПЗ. Для вирішення цих задач базовими обрано моделі зрілості СММІ та SPICE. Проведено аналіз шкал критеріїв для оцінки якості ПР ПЗ і на цій основі запропоновано підхід до побудови збалансованої бальної шкали оцінки якості всього ПР ПЗ ІТ-компанії. Для цього синтезовано локальні критерії оцінки якості ПР ПЗ обох моделей зрілості, які є базою для побудови функції корисності. Це дає можливість сформуванню збалансованих шкал для обох моделей зрілості оцінки якості всього ПР ПЗ.

Подальші дослідження будуть присвячені вирішенню наступних проблем:

- розробці технології формування збалансованої шкали для дискретної моделі СММІ;
- синтезу дискретної моделі SPICE і визначенню її рівнів зрілості на зразок дискретної моделі СММІ;
- розробці технології формування збалансованої шкали для дискретної моделі SPICE;
- синтезу моделі планування підвищення якості ПР ПЗ на основі збалансованої дискретної моделі SPICE.

Список використаної літератури

1. Таран Т. А., Зубов Д. А. *Штучний інтелект*. Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2006. 240 с.
2. Глибовець М. М., Олецкий О. В. *Штучний інтелект*. Київ: КМ Академія, 2002. 366 с.
3. Goodman F. A. *Defining and deploying software processes*. Auerbach Publ., 2006. 221 p.
4. Li T. *An Approach to Modelling Software Evolution Processes*. Berlin-Heidelberg: Springer, 2008. 213 p.
5. Андон Ф. И., Коваль Г. И., Коротун Т. М. *Основы инженерии качества программных систем*. Киев: Академперіодика, 2007. 672 с.
6. Humphrey W. S. *Managing the software process*. Boston, MA: Addison-Wesley, 1989. 512 p.
7. Ambler S. W. *More Process Patterns: Delivering Large-Scale Systems Using Object Technology*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999. 369 p.
8. Прессман Р., Максим Б. *Software Engineering: A Practitioner's Approach*. New York: McGraw-Hill, 2019. 78 p.
9. Madachy R. J. *Software process dynamics*. Hoboken, New Jersey: IEEE Press, Wiley Interscience, 2008. 601 p.
10. Wissenberg N. *History and best practice of the standard for quality management systems DIN EN ISO 9001*. Faculty of Communication and Environment of the Rhine-Waal University of Applied Sciences. 2015. 7 p.
11. Al-Qutaish R. Quality Models in Software Engineering Literature: An Analytical and Comparative Study. *Journal of American Science*. 2010. Vol. 6. 10 p.
12. Estdale J., Georgiadou E. *Applying the ISO/IEC 25010 Quality Models to Software Product*. In: Larrucea X., Santamaria I., O'Connor R., Messnarz R. (eds). *Systems, Software and Services Process Improvement. EuroSPI 2018. Communications in Computer and Information Science*. 2018. Vol. 896. 12 p.
13. Mesquida A., Mas A., Alcover A., Calvo-Manzano J. IT Service Management Process Improvement based on ISO/IEC 15504: A systematic review. *Information & Software Technology*. 2012. Vol. 5. P. 239–247.
14. Lugo J., Bermudez P. A., Piñero P., Bello R.. Project Control and Computational Intelligence: Trends and Challenges. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2017. Vol. 10. P. 320–335.
15. Годлевский М. Д., Малёв Д. К. Синтез функций корисності процесу розробки програмного забезпечення на основі еталонної моделі SPICE. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022. № 2 (8). С. 81–86.
16. Saaty T. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh, PA: RWS Publ., 2000. 477 p.
17. Salo A. A. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1997. Vol. 6. P. 309–319.
18. Lootsdoma F. A. Conflict resolution via pairwise comparison of concessions. *European Journal of Operational Research*. 1989. Vol. 40. P. 109–116.
19. Ma D, Zheng X. 9/9-9/1 Scale Method of the AHP. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the AHP*. Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh. 1991. Vol. 1. P. 197–202.
20. Elliott M. A. Selecting numerical scales for pairwise comparisons. *Reliability Engineering and System Safety*. 2010. Vol. 95. P. 750–763.
21. Годлевский М. Д., Брагинский И. Л. Динамическая модель и алгоритм управления качеством процесса разработки программных систем на основе модели зрелости. *Проблемы информационных технологий*. Херсон: ОЛДИ-Плюс, 2012. С. 6–13.
22. Годлевский М. Д., Голоскокова А. А. Синтез статических моделей планирования улучшения качества процесса разработки программного обеспечения. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2015. № 3/2 (75). С. 23–29.
23. Годлевський М. Д., Голоскокова А. О., Бурлаков Г. О. Динамічна модель планування розвитку підможності процесів еталонної моделі зрілості SPICE. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 10–16.
24. Шеховцов В. А., Годлевський М. Д., Брагинский И. Л. Вербальное описание технологии улучшения качества процесса разработки программного обеспечения. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Темат. вып.: Системный анализ, управление и информационные технологии*. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 29. С. 54–59.
25. Катренко А. В., Пасічник В. В. *Прийняття рішень: теорія та практика*. Львів: Новий Світ – 2000, 2013. 447 с.

References (transliterated)

1. Taran T. A., Zubov D. A. *Shtuchnyy intelekt*. [Artificial Intelligence]. Luhans'k, Vyd-vo SNU im. V. Dalya Publ., 2006. 240 p.
2. Hlybovets' M. M., Olets'kyu O. V. *Shuchnyy intelekt*. [Artificial Intelligence]. Kyiv, KM Akademiya Publ., 2002. 366 p.
3. Goodman F. A. *Defining and deploying software processes*. Auerbach Publ., 2006. 221 p.
4. Li T. *An Approach to Modelling Software Evolution Processes*. Berlin-Heidelberg, Springer Publ., 2008. 213 p.
5. Andon F. Y., Koval' H. Y., Korotun T. M. *Osnovy ynzheneryy kachestva prohrammykh system*. [Fundamentals of Software Systems Quality Engineering]. Kyiv, Akadempriodika Publ., 2007. 672 p.
6. Humphrey W. S. *Managing the software process*. Boston, MA, Addison-Wesley, 1989. 512 p.
7. Ambler S. W. *More Process Patterns: Delivering Large-Scale Systems Using Object Technology*. Cambridge, Cambridge University Press, 1999. 369 p.
8. Pressman R., Maksym B. *Software Engineering: A Practitioner's Approach (9th ed.)*. 2019. 78 p.
9. Madachy R. J. *Software process dynamics*. Hoboken, New Jersey: IEEE Press, Wiley Interscience, 2008. 601 p.
10. Wissenberg N. *History and best practice of the standard for quality management systems DIN EN ISO 9001*. Faculty of Communication and Environment of the Rhine-Waal University of Applied Sciences. 2015. 7 p.
11. Al-Qutaish R. Quality Models in Software Engineering Literature: An Analytical and Comparative Study. *Journal of American Science*. 2010, vol. 6, p. 10.
12. Estdale J., Georgiadou E. *Applying the ISO/IEC 25010 Quality Models to Software Product*. In: Larrucea X., Santamaria I., O'Connor R., Messnarz R. (eds). *Systems, Software and Services Process Improvement. EuroSPI 2018. Communications in Computer and Information Science*. 2018, vol. 896. 12 p.
13. Mesquida A., Mas A., Alcover A., Calvo-Manzano J. IT Service Management Process Improvement based on ISO/IEC 15504: A

- systematic review. *Information & Software Technology*. 2012, vol. 54, pp. 239–247.
14. Lugo J, Bermudez P. A., Piñero P., Bello R. Project Control and Computational Intelligence: Trends and Challenges. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 2017, vol. 10, pp. 320–335.
 15. Hodlevs'kyy M. D., Malets' D. K. Syntez funktsiyi korysnosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennya na osnovi etalonnoyi modeli SPICE. [Synthesis of the utility function of the software development process based on the SPICE reference model]. *Visnyk NTU "KhPI": zb. nauk. pr. Seriya: Sy'stemny'j analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiyi*. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2022, no. 2 (8), pp. 81 – 86.
 16. Saaty T. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh, PA, RWS Publications, 2000. 477 p.
 17. Salo A. A. On the measurement of preferences in the analytic hierarchy process. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*. 1997, vol. 6, pp. 309–319.
 18. Lootsdoma F. A. Conflict resolution via pairwise comparison of concessions. *European Journal of Operational Research*. 1989, vol. 40, pp. 109–116.
 19. Ma D, Zheng X. 9/9-9/1 Scale Method of the AHP. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the AHP*. Pittsburgh, PA: University of Pittsburgh, 1991, vol. 1, pp. 197–202.
 20. Elliott M. A. Selecting numerical scales for pairwise comparisons. *Reliability Engineering and System Safety*. 2010. Vol. 95. Pp. 750–763.
 21. Hodlevs'kyy M. D., Brahyns'kyy Y. L. Dynamichna model' i alhorytm upravlinnya yakystyu protsesu rozrobky prohramnykh system na osnovi modeli zrelosti [A dynamic model and algorithm for quality control of the development process of software systems based on the maturity model]. *Problemy ynformatsyonnykh tekhnolohyy*. Kherson, OLDY-Plyus Publ., 2012, pp. 6–13.
 22. Hodlevs'kyy M. D., Holoskokova A. A. Syntez statychnykh modeley planuvannya polipshennya yakosti protsesu rozrobky prohramnoho zabezpechennya [Synthesis of static planning models for improving the quality of the software development process]. *Skhidno-Yevropeys'kyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy*. Kharkiv, 2015, no. 3/2 (75), pp. 23–29.
 23. Hodlevs'kyy M. D., Holoskokova A. O., Burlakov H. O. Dynamichna model' planuvannya rozvytku pidmnozhyzny protsesiv etalonnoyi modeli zrelosti SPICE [A dynamic development planning model for a subset of processes of the SPICE Maturity Reference Model]. *Visnyk NTU "KhPI": zb. nauk. pr. Seriya: Sy'stemny'j analiz, upravlinnya ta informacijni tehnologiyi*. [Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, control and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 10–16.
 24. Shekhovtsov V. A., Hodlevs'kyy M. D., Brahyns'kyy Y. L. Verbal'noe opysanye tekhnolohyy uluchshennya kachestva protsesa razrabotky prohramnoho obespechenya [Verbal description of technology for improving the quality of the software development process]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2011, no. 29, pp. 54–59.
 25. Katrenko A. V., Pasichnyk V. V. *Prynyattya rishen': teoriya ta praktyka*. [Decision making: theory and practice]. L'viv, Novyy Svit – 2000 Publ., 2013. 447 p.

Надійшло (received) 05.05.2024

UDC 004.4: 519.816

V. YE. SOKOL, Candidate of Technical Sciences, docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Information Technologies, Kharkiv, Ukraine; e-mail: volodymyr.sokol@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>

M. D. GODLEVSKYI, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Director of the Institute of Computer Science and Information Technology, Kharkiv, Ukraine; e-mail: god_asu@kpi.kharkov.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2872-0598>

D. K. MALETS, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Graduate Student, e-mail: dmytro.malets@cs.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1980-1401>

QUALITY ASSESSMENT OF THE SOFTWARE DEVELOPMENT PROCESS OF AN IT COMPANY BASED ON THE USE OF THE UTILITY FUNCTION

The paper considers the software development process as an object of research, which is a poorly structured system. A description of such systems is given in the form of general characteristics, which include: difficulties in building an analytical model; incompleteness, inaccuracy, unreliability and uncertainty of information; benchmarks required for assessing weakly structured systems are often absent; uniqueness of the decision-making process; dynamic nature of models of poorly structured systems, etc. In this paper, the quality assessment of the software development process is considered based on maturity model standards, which can have continuous and discrete variants. The continuous version assesses the quality of the individual focus areas and processes of the maturity models. For this purpose, a discrete point scale of the first type is used, when the assessment is carried out according to an objective criterion. The quality assessment of individual focus areas and processes characterizes the local criteria for assessing the quality of the entire software development process. Therefore, the task is to form some kind of integral quality assessment on their basis. One of the options for solving this problem is a discrete maturity model, where the scale for assessing the entire software development process has five gradations called maturity levels. Starting from the second level, each gradation is characterized by a set of focus areas with corresponding levels of capability. The availability of such a scale allows not only assessing the quality of the entire software development process, but also solving the task of planning to improve its quality. But first, it is necessary to analyse such a scale from the point of view of its balance, namely, that the distances on the scale between the gradations are approximately equal. Therefore, the paper analyses the existing scales that can be proposed for expert assessment for the quality of the software development process. Their construction can be realized on the basis of a utility function using the local criteria of maturity models formalized in this paper. For this purpose, a fundamental property of systems is used. Namely, the dependence of the utility (efficiency) of a complex system on the invested resources over the life cycle interval, which usually takes the form of a logistic curve. Further research will be devoted to using this fact to build a balanced scale for assessing the entire software development process based on maturity models.

Keywords: software development process, quality of software systems, poorly structured system, maturity model, criterion scale, local criteria, utility function, experts.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Сокол Володимир Євгенович / Sokol Volodymyr Yevgenovych

Автор 2 / Author 2: Годлевський Михайло Дмитрович / Godlevskyi Mykhaylo Dmytrovych

Автор 3 / Author 3: Малець Дмитро Костянтинівич / Malets Dmytro Kostyantynovych

DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.03
УДК 004.827

С. Д. КУЗНІЧЕНКО, кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, Одеський державний екологічний університет, м. Одеса, Україна; e-mail: skuznichenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7982-1298>

Д. А. ІВАНОВ, аспірант, Одеський державний екологічний університет, м. Одеса, Україна; e-mail: dmitriy.2112@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8821-0094>

Д. О. КУЗНІЧЕНКО, співробітник логістичної компанії Лайкбас, м. Одеса, Україна; e-mail: kuznichenko.d@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1080-6433>

ВИКОРИСТАННЯ МОДЕЛІ І МЕТОДІВ ГЕОПРОСТОРОВОГО БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РІШЕНЬ ДЛЯ КАРТУВАННЯ РИЗИКУ ДЕГРАДАЦІЇ ҐРУНТІВ

Сучасні методи просторового аналізу і моделювання все частіше використовуються в поєднанні з методами прийняття рішень та теорії нечітких множин. Останні активно інтегруються в середовище географічних інформаційних систем (ГІС), наприклад, таких відомих як ArcGIS чи QGIS, у вигляді окремих інструментів, плагінів чи Python скриптів. Методи прийняття рішень дозволяють структурувати проблему в географічному просторі, а також врахувати знання і судження експертів та переваги особи, що приймає рішення при визначенні пріоритетів альтернативних рішень. У даній роботі надається опис геопросторової моделі багатокритеріального аналізу рішень, яка дозволяє вирішувати широке коло екологічних та соціально-економічних завдань. У роботі наводиться приклад застосування даної моделі для картування ризику деградації ґрунтів в Україні. Згідно з об'єктно-просторовим підходом, властивості території визначаються як результат дії (впливу) множини об'єктів (процесів), що належать цій території. Територія представляється у вигляді двовимірної дискретної сітки, кожна точка якої (локальна ділянка) є альтернативою. Набір локальних ділянок території складає множину альтернатив. Уявлення моделі території як системи об'єктів та зв'язків між ними дозволяє обґрунтувати вибір множини критеріїв (факторів) для оцінювання ризику деградації ґрунтів. Кожний критерій є окремим растровим шаром карти. Для побудови ієрархічної структури прийняття рішень та розрахунку коефіцієнтів важливості критеріїв використовується метод аналізу ієрархій. Для врахування невизначеності в оцінках та судженнях експертів на етапах стандартизації атрибутів альтернатив за різними критеріями та агрегування їх оцінок застосовано експертні функції належності до нечіткої множини та нечіткі квантифікатори. Особливістю запропонованої моделі багатокритеріального аналізу рішень є її низька обчислювальна складність та простота інтеграції у середовище ГІС.

Ключові слова: багатокритеріальний аналіз рішень, метод аналізу ієрархій, геоінформаційна система, просторове моделювання, експертні оцінки, ризик деградації ґрунтів.

Вступ. Деградація земель є серйозною екологічною проблемою, на яку впливають як природні, так і антропогенні фактори. Сьогодні Україна є військово-техногенно напруженим регіоном Європи з негативними наслідками для довкілля загалом та ґрунтового покриття зокрема.

Деградація земель визначається як процес погіршення якості землі, зниження її родючості та зменшення вмісту в ній поживних речовин. За оцінками Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН, близько 20% сільськогосподарських угідь в Україні вже зазнали значної деградації. Військові дії, що тривають, справляють додатковий руйнівний вплив на продуктивність ґрунтів. До основних негативних факторів відносяться воронки від авіабомб і артилерійських обстрілів, заміновані території, знищена важка військова техніка, розливи нафти, випалені території від пожеж, зсувів тощо [1].

Відновлення функціональних властивостей ґрунту та підвищення його продуктивності можливе залежно від типу ґрунту, рівня деградації та ландшафтних умов території. Це вимагає міждисциплінарного та інтегрованого підходу до сталого управління земельними ресурсами. У роботі пропонується підхід до картування ризику деградації земель, що базується на інтеграції моделі та методів багатокритеріального аналізу рішень (з англ. MCDA, Multiple-Criteria Decision Analysis) у ГІС [2, 3].

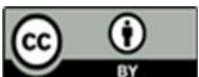
Інтеграція ГІС та багатокритеріального аналізу рішень (БКАР) дозволяє поєднати концепції двох різних галузей та отримати нові шляхи вирішення просторових проблем прийняття рішень.

На фундаментальному рівні інтеграцію ГІС з БКАР можна розглядати як набір методів для перетворення та комбінування геоданих і переваг (оціночних суджень) особи, що приймає рішення (ОПР) з метою отримання інформації для прийняття рішень. З одного боку, ГІС забезпечує зберігання, керування, аналіз та візуалізацію геопросторових даних. З іншого боку, БКАР покращує здатність ГІС вирішувати просторові проблеми прийняття рішень, надаючи теоретичну основу для аналізу та широкий спектр методів.

На елементарному рівні БКАР включає набір альтернатив, які оцінюються на основі суперечливих і неспівмірних критеріїв відповідно до уподобань ОПР. Тобто основними елементами будь-якої багатокритеріальної проблеми прийняття рішень є особи (чи експерти), що приймають рішення, альтернативи та критерії. Модель БКАР складається з трьох основних концепцій: масштабування (або стандартизація) значень, зважування критеріїв та правило комбінування (рішення) [4].

Метою даної роботи є розробка моделі геопросторового багатокритеріального аналізу рішень, адаптованої для оцінки та картування ризику деградації ґрунтів в Україні. Просторовий розподіл ризику деградації ґрунтів визначається за допомогою індексу, що

© Кузніченко С. Д., Іванов Д. А., Кузніченко Д. О., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



базується на факторах (критеріях), які впливають на ризик деградації, зокрема на військово-техногенному факторі. Показано, що уявлення моделі території як системи об'єктів (чи процесів), що впливають на властивості цієї території, та зв'язків між ними, добре узгоджується з математичними основами БКАР.

1. Постановка завдання. В узагальненому вигляді задача прийняття рішення представляється кортежем:

$$\langle A, C, E, W, D \rangle, \quad (1)$$

де $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ – множина альтернатив;

$C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ – набір критеріїв для оцінки альтернатив;

E – процедура оцінювання;

W – система переваг, що містить інформацію про оцінки альтернатив за кожним критерієм;

D – правило рішення визначає процедуру дії над набором альтернатив (відбір, ранжування, сортування тощо).

Якщо розглядати територію як складну систему, то процес прийняття рішення можна звести до оцінки модельного представлення системи та її властивостей, які найбільшою мірою відповідають реальному стану території в заданих умовах. Відповідно до (1) мають бути визначені цілі оцінювання, методи, шкали, критерії оцінювання та процедура оцінювання. Таким чином, технологія прийняття рішень передбачає отримання або генерування альтернатив, їх порівняння за певними критеріями та ранжування залежно від поставлених цілей [5].

Властивості території можна розглядати як результат дії (впливу) процесів або об'єктів, що належать до цієї території:

$$T \subset O \times H, \quad (2)$$

де $O = \{o_j\}, j = \overline{1, m}$ – сукупність об'єктів, що належать до території;

$H = \{h_i\}, i = \overline{1, n}$ – множина елементарних ділянок, на які поділяється територія.

Уявлення моделі території як системи елементів і зв'язків між ними набуває такого вигляду:

$$\begin{matrix} F_{\mu} \\ O \rightarrow P, \end{matrix} \quad (3)$$

де $F_{\mu} = \{F_{\mu_{ij}}\}, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$ – множина функцій, що відображають вплив j -го об'єкта на i -ту елементарну ділянку території;

P – властивість території.

Уявлення території визначається як упорядкована множина властивостей елементарних ділянок:

$$P = \{P_i \mid P_i = \{P_{ij}\}\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

відповідно

$$P_{ij} = P_j \cdot F_{\mu_{ij}}(r_{ij}), \quad (5)$$

де P_j – величина впливу j -го об'єкта на місце його розташування;

$F_{\mu_{ij}}$ – функція поширення впливу цього об'єкта;

r_{ij} – відстань між i -ю точкою (елементарною ділянкою) території та j -м об'єктом.

Вплив сукупності об'єктів (процесів) O на i -ту точку (елементарну ділянку) території визначається шляхом агрегування значень впливу окремих об'єктів (процесів):

$$P_i = F_{\text{AGG}}(P_j \cdot F_{\mu_{ij}}(r_{ij})). \quad (6)$$

У загальному випадку функція агрегування впливу F_{AGG} є нелінійною. Множина елементарних ділянок H є сукупністю точок (пікселів) досліджуваної території. Кожна точка визначається як $i(n\Delta x, m\Delta y)$ відповідно до координат x, y . Таким чином, модель властивостей території є двовимірною дискретною системою:

$$H = \{h_{m,n} \mid m \in M, n \in N\}, \quad (7)$$

де індекси n і m є дискретними значеннями координат положень комірок растра по осі X (множина N) і осі Y (множина M). Для стислості надалі пару чисел m, n позначатимемо єдиним індексом i – номером комірки растра: $H = \{h_i \mid i = \overline{1, N \cdot M}\}$. Враховуючи це, властивість території можна представити у вигляді:

$$P_{x,y} = f_p(x, y). \quad (8)$$

Таким чином, на основі рівняння (8) можна побудувати растр території, де кожна точка містить оцінку властивості території в цій точці як атрибут. Функція впливу F_{μ} залежить від різних властивостей території (таких як рельєф, ухил, тип ґрунту тощо), а також відстані r_{ij} між j -м об'єктом та i -ю точкою території. Функцію F_{μ} можна визначити аналітично, наприклад, на основі рівнянь, що описують відомі фізичні процеси (такі як моделі водної та вітрової ерозії, перенесення забруднення, поширення вогню тощо). Функція F_{μ} також може бути визначена як функція цінності чи функція належності до нечіткої множини на основі експертних оцінок [5].

2. Модель геопросторового багатокритеріального аналізу рішень. Діаграма процесу геопросторового БКАР наведена на рис. 1 і складається з етапів макроаналізу, мікроаналізу та надання рекомендацій.

Макроаналіз – етап попереднього дослідження чи збору інформації. На цьому етапі відбувається збір даних про об'єкти (процеси), що мають суттєвий вплив на властивості території, формуються множини критеріїв та альтернатив з урахуванням обмежень, що накладаються на рішення. Критерій – це загальний термін, що включає як поняття цілі, так і атрибуту [6].

Ціль – це твердження про бажаний стан системи, що розглядається (наприклад, рівень вразливості ґрунтів до прояву ерозійних процесів). Досягнення цілі

вимірюється через кількісні чи якісні оцінки одного або кількох атрибутів. Твердження про бажані оцінки можна інтерпретувати як «чим більше атрибут, тим краще», або «чим менше атрибут, тим краще». Тобто атрибут – це вимірювана кількість або якість географічної сутності або зв'язок між географічними сутностями. Атрибут можна описати як властивість елемента (об'єкта, процесу) географічної системи реального світу (наприклад, систем розподілу фортифікаційних споруд та мінних полів, щільності пожеж, інтенсивності прояву пилових бур тощо).

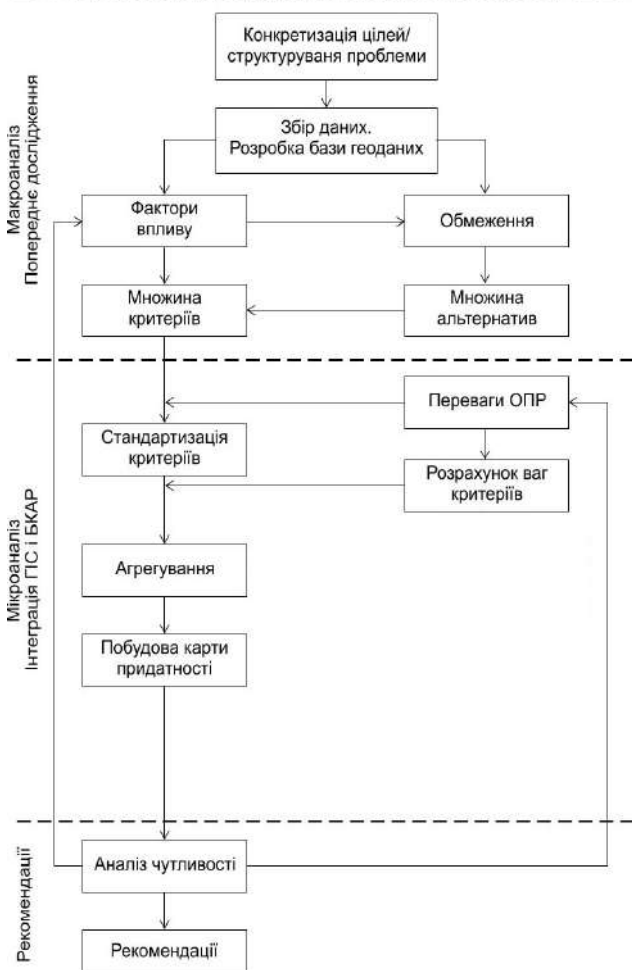


Рис. 1. Діаграма процесу геопросторового БКАР

Зв'язки між цілями та атрибутами мають ієрархічну структуру. Для побудови ієрархічної структури може бути використані концепції, що лежать в основі методу аналізу ієрархій [7]. Найбільш загальні цілі знаходяться на найвищому рівні і можуть бути визначені в термінах більш конкретних цілей нижчих рівнів. Атрибути є кількісно вимірними індикаторами ступеня реалізації відповідних цілей і знаходяться на найнижчому рівні ієрархії. На рис. 2 показано приклад ієрархічної структури задачі прийняття рішення. Верхній рівень ієрархічної структури є загальною метою (наприклад, визначення найкращої просторової моделі оцінки ризику деградації земель). Потім ієрархія опускається від глобальної мети до більш конкретних цілей, доки не буде досягнуто рівня атрибутів.

Декомпозиція об'єктів, що мають суттєвий вплив на рішення, на окремі шари критеріїв передбачає виконання аналізу не лише їх атрибутивної, але і просторової інформації. За геометричними властивостями об'єкти можуть бути точковими, лінійними та полігональними. Так, наприклад, водні об'єкти можуть бути представлені лінійними і полігональними об'єктами (річки і водосховища відповідно), тому необхідно виконати декомпозицію на два окремих шари різної геометрії.

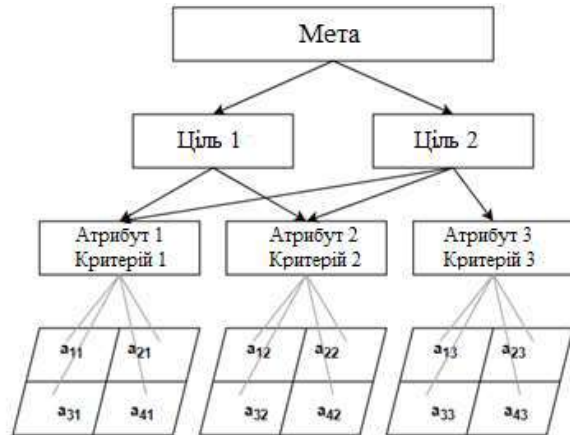


Рис. 2. Загальна ієрархічна структура задачі прийняття рішення

Відповідно до (8) тематичні шари критеріїв повинні бути перетворені в растрову модель даних. Дискретизація векторних шарів може бути виконана з використанням різних методів ГС-аналізу, наприклад, геостатистичної інтерполяції, фрактального аналізу, обчислення відстані за допомогою різних метрик близькості і т. п. Найбільш часто для розрахунку географічних відстаней між об'єктами в просторовому аналізі використовують Евклідову відстань, яка між двома точковими об'єктами $O_1(x_1, y_1)$ і $O_2(x_2, y_2)$ визначається як :

$$d(O_1, O_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (9)$$

У випадку растрової моделі даних відстань від будь-якої комірки растра a до об'єкта O дорівнює мінімальній відстані від цієї комірки до кожної комірки, що покриває об'єкт O :

$$ED(O, a) = \min \left\{ (d(O, a))_k \mid k = \overline{1, n_o} \right\} \quad (10)$$

де n_o – кількість комірок, що покривають об'єкт O .

Таким чином, можна побудувати растр відстаней $R(ED)$, кожна комірка якого містить атрибут, який дорівнює значенню Евклідової відстані ED від неї до найближчого об'єкта, розрахований відповідно (10):

$$R(ED) = \{a_{ij}\} = \left\{ \left((x_i, y_j), ED_{ij} \right) \right\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}, \quad (11)$$

де n – кількість рядків двовимірної сітки растра;

m – кількість стовпців двовимірної сітки растра.

Мікроаналіз (рис. 1) – етап, який передбачає застосування методів прийняття рішень, що засновані на оціночних судженнях та перевагах ОПР чи експертів. Основними важливими кроками цього етапу є стандартизація атрибутів – перетворення в порівнянні одиниці; розрахунок ваг важливості критеріїв; агрегування – об'єднання атрибутів в узагальнену оцінку альтернатив за певними правилами прийняття рішень. На даному етапі часто доводиться стикатися з невизначеністю експертів щодо ступенів відносної важливості (ваг) критеріїв та допустимої стратегії прийняття рішень, тобто форми компромісу між оцінками альтернатив за різними критеріями. Для врахування подібних невизначеностей доцільним є використання апарату теорії нечітких множин та нечіткої логіки.

Стандартизація на основі апарату теорії нечітких множин базується на перетворенні значень атрибутів k -го шару у значення ступені належності до нечіткої множини \tilde{V}_k [8]:

$$\tilde{V}_k = \{(a, \mu_v^k(a)) \mid a \in U\}, \mu_v^k(a) : a \rightarrow [0, 1], \quad (12)$$

де a – значення атрибуту;

U – безперервна множина значень атрибутів;

$\mu_v(a)$ – функція належності, що приймає значення в деякій цілком впорядкованій множині $M = [0, 1]$. Функція належності вказує ступінь належності елемента a нечіткій підмножині \tilde{A} . Чим більше $\mu_v(a)$, тим більшою мірою елемент універсальної множини відповідає властивостям нечіткої підмножини. Як правило, функція належності будується за участю експерта (групи експертів), таким чином, що ступінь належності приблизно дорівнює інтенсивності прояву деякого фактора.

Перетворення атрибутів у нечітку множину, на підставі експертної функції належності, тобто фазифікація, дозволяє побудувати растр k -го критерію, кожний атрибут якого містить значення функції належності $\mu_v^k(a)$, тобто лежить у діапазоні $[0, 1]$:

$$R_k(\tilde{v}(a_i^k)) = \left\{ \left((x_i^k, y_j^k), \mu_v^k(a_{ij}^k) \right) \right\}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}. \quad (13)$$

Важливим кроком етапу мікроаналізу є зважування критеріїв. Вага – це значення, присвоєне критерію, яке вказує на його важливість відносно інших критеріїв, що розглядаються. Найчастіше для розрахунку ваг критеріїв у БКАР застосовують один із трьох методів зважування: ранжування, рейтинг і попарне порівняння. Ці методи вимагають, щоб ОПР вказав свої переваги щодо важливості критеріїв. Чим більша вага, тим важливіший критерій. Вони засновані на припущенні, що переваги ОПР просторово однорідні, тобто розраховується одна вага для кожного критерію. У разі n критеріїв, множина ваг визначається як

$$W = \{w_i \mid \sum w = 1, i = \overline{1, n}\}. \quad (14)$$

Як вже згадувалося раніше, ваги критеріїв можуть бути розраховані методом аналізу ієрархії (МАІ), який

має просту реалізацію і його просто інтегрувати в ГІС. МАІ заснований на парному порівнянні критеріїв за допомогою 9-бальної фундаментальної шкала абсолютних чисел Сааті [7]. За результатами парного порівняння n критеріїв можна побудувати матрицю $A(n \times n)$, у якій кожний елемент a_{ij} – це оцінка парного порівняння i -го критерію з j -м критерієм:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}, \begin{cases} a_{ij} = 1, & i = j, \\ a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, & a_{ij} \neq 0. \end{cases} \quad (15)$$

Для матриці розраховуються власні числа та власні вектори, а також формується вектор локальних пріоритетів. Для контролю узгодженості експертних оцінок використовуються дві пов'язані характеристики: індекс узгодженості С.І. і коефіцієнт узгодженості С.Р. Розумний рівень узгодженості в парних порівняннях становить С.Р. $< 0,10$, тоді як С.Р. $\geq 0,10$ вказує на суперечливі експертні оцінки. Для врахування невизначеностей в оцінках експертів пропонується використовувати модифікований нечіткий МАІ, в якому парні порівняння критеріїв виконуються через лінгвістичні змінні представлені трикутними числами [9].

Після стандартизації атрибутів та розрахунку ваг критеріїв виконується комбінування оцінок критеріїв. Для цього в середовищі ГІС зазвичай використовуються різні оператори агрегування: мінімум, максимум, середнє арифметичне, зважена сума, ОWA оператор Ягера [10].

Використання оператора мінімуму $\Phi(a_1, \dots, a_n) = \min(a_1, \dots, a_n)$ призводить до оцінювання альтернативи на основі лише найнижчого значення атрибуту, тобто є песимістичним підходом до прийняття рішення. Оператор максимуму $\Phi(a_1, \dots, a_n) = \max(a_1, \dots, a_n)$ враховує тільки кращі оцінки атрибутів і є оптимістичним підходом до прийняття рішення [11].

Простим і популярним оператором агрегування, який часто використовується в ГІС є оператор зважена сума:

$$\Phi(a_1, \dots, a_n) = \sum_{j=1}^n w_j a_j, \quad (16)$$

де w_j – ваговий коефіцієнт важливості j -го критерію.

На відміну від попередніх операторів, зважена сума є компенсаційним оператором агрегування, тобто компенсує низькі оцінки за одними критеріями високими оцінками за іншими. Недоліком адитивних операторів агрегування є неможливість відобразити експертну інформацію про бажану допустиму форму компромісу між значеннями альтернатив за різними критеріями.

Рішенням проблеми є застосування ОWA-оператора Ягера з нечіткими квантифікаторами (НК), який дозволяє комбінувати шари карти, зв'язуючи з шарами

два типи ваг: ваги критеріїв $0 \leq w_j \leq 1$ та ваги порядку $0 \leq \tilde{\lambda}_j \leq 1$. Формалізований запис OWA оператора Ягера з НК має наступний вигляд [11]:

$$V(a'_i) = \sum_{j=1}^n \tilde{\lambda}_j b_{ij}, \quad (17)$$

де $V(a'_i)$ – загальна оцінка i -ї альтернативи;

$b_{i1} \geq b_{i2} \geq \dots \geq b_{in}$ – елементи вектора атрибутів

$A = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ впорядковані за зменшенням. Важливим аспектом даного підходу є те, що вага порядку $\tilde{\lambda}_j$ пов'язана з позицією елементів в упорядкованому за зменшенням векторі таким чином, що $\tilde{\lambda}_j$ відповідає найбільшому значенню b_j , а $\tilde{\lambda}_n$ – найменшому.

У випадку, коли для критеріїв заданий набір ваг w_1, w_2, \dots, w_n , вектор ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$ задається у вигляді:

$$\tilde{\lambda}_j = Q\left(\sum_{i=1}^j w_i^b\right) - Q\left(\sum_{i=1}^{j-1} w_i^b\right), \quad (18)$$

де w_i^b – ваги критеріїв, впорядковані у відповідності зі значенням атрибуту b_{ij} .

Можна показати, що у випадку, коли $\tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_2 = \dots = \tilde{\lambda}_n = 1/n$, (17) повністю ідентичний оператору зважена сума (16). За рівнянням (17) можна

отримати широкий спектр операторів агрегування шляхом вибору відповідного вектора ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$: від мінімуму (повна відмова від ризику у випадку, коли $\tilde{\lambda}_1 = \tilde{\lambda}_2 = \dots = \tilde{\lambda}_{n-1} = 0$, $\tilde{\lambda}_n = 1$), до максимуму (прийняття ризику у випадку, коли $\tilde{\lambda}_1 = 1$, $\tilde{\lambda}_2 = \dots = \tilde{\lambda}_n = 0$). Різні комбінації ваг порядку $\tilde{\lambda}_j$ представляються графічно у вигляді нечітких квантифікаторів Q , кожний з яких є відображенням певного ставлення ОПР до ризику (надзвичайно оптимістичного, оптимістичного, помірно оптимістичного, нейтрального, помірно песимістичного, надзвичайно песимістичного). Можливість класифікувати ступень ставлення ОПР до ризику через нечіткі квантифікатори та лінгвістичні змінні робить OWA універсальним оператором агрегування, що реалізує широкий спектр комбінування шарів критеріїв.

3. Адаптація моделі геопросторового багатокритеріального аналізу рішень для оцінки ризику деградації ґрунтів. Багатокритеріальний аналіз починається з побудови ієрархічної структури, визначення цілей та критеріїв. До основних екзогенних геологічних процесів, що спричиняють деградацію земель в Україні, найчастіше відносять вітрову та водну ерозію, засолення ґрунтів [12]. До показників деградації можна також віднести зміну рослинності та ступень еродованості ґрунтів. Крім того, слід враховувати негативний вплив військово-техногенних факторів, що проявляється у вигляді механічної деформації ґрунтового покриву та зміні його фізичних та хімічних властивостей.

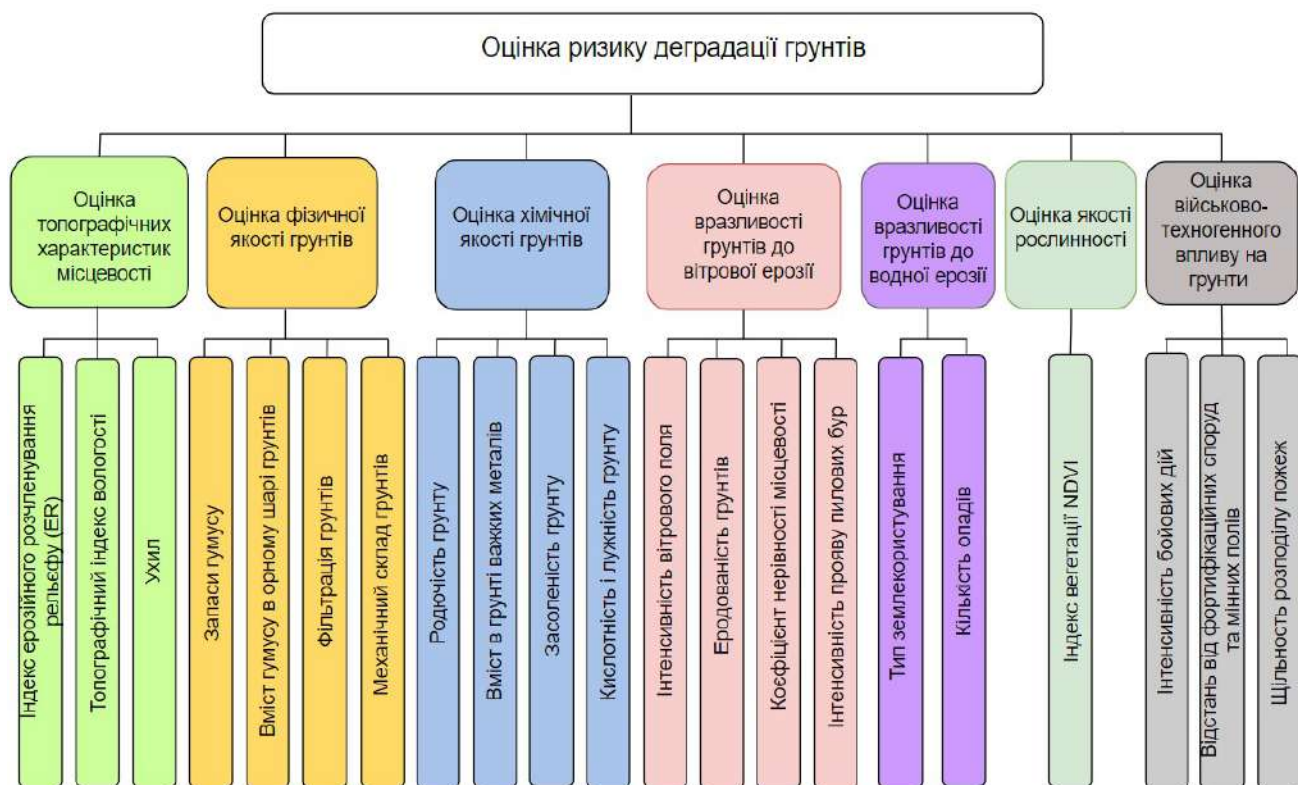


Рис. 3. Ієрархічна структура багатокритеріального аналізу рішень

Ієрархічна структура багатокритеріального аналізу наведена на рис.3. Вона побудована на основі досвіду експертів і безумовно є лише одним з можливих варіантів, тобто спрощеним уявленням безлічі процесів, що впливають на деградацію ґрунтів у реальному світі. Глобальна мета аналізу – оцінка ризику деградації ґрунтів, тобто ранжування альтернатив за ступенем вразливості до деградації ґрунтів. Цілями другого рівня ієрархії виступають складові цього процесу, а саме моделі оцінки вітрової ерозії, водної ерозії, фізичної якості ґрунту, хімічної якості ґрунту, якості та інтенсивності рослинності і т. д. Будемо вважати кожен ціль окремим індексом, що відображає оцінку альтернативи за певною моделлю. Для оцінки кожного з сьомі індексів використовуються певні критерії: окрім мультиспектральних супутникових знімків, допоміжні геодані – цифрова модель рельєфу, різні ґрунтові та кліматичні карти. Тематичні шари критеріїв можуть бути створені на базі відкритої картографічної інформації. Наприклад, для створення шарів, що відображають військово-техногенні критерії, можуть бути використано API інформаційної системи Fire Information for Resource Management System (FIRMS) NASA або European Forest Fire Information System (EFFIS), картографічні дані інституту вивчення

війни (ISW) та архівні супутникові знімки високої роздільної здатності Google Earth. Для розрахунку топографічних характеристик місцевості – цифрова модель рельєфу (DEM), що отримана за даними космічної місії SRTM. Для підготовки кліматичних карт – дані кліматичної бази даних Copernicus.

Дискретизація векторних тематичних шарів може бути виконана з використанням різних методів ГІС-аналізу та геообробки, наприклад, геостатистичної інтерполяції, фрактального аналізу, обчислення відстані за допомогою Евклідової метрики (11) і т. п. На рис.4 наведено приклад побудови растрового шару евклідових відстаней від випалених ділянок, які з'явилися на території Херсонської області вздовж лінії фронту в результаті пожеж за період з лютого 2022 року по січень 2024 року. Дані отримані через інформаційну систему EFFIS. Рівень вразливості точок (елементарних ділянок) визначався на підставі лінійної функції належності $\mu_r(a)$ (13). У результаті була виконана стандартизація атрибутів і отримано перекласифікований растр відстаней, значення якого знаходяться в межах [0,1]. Значення атрибутів вказують на ступінь вразливості ґрунту до деградації під впливом даного фактора. Значення 0 – точка території не відчуває вплив фактора, значення 1 – максимально відчуває,

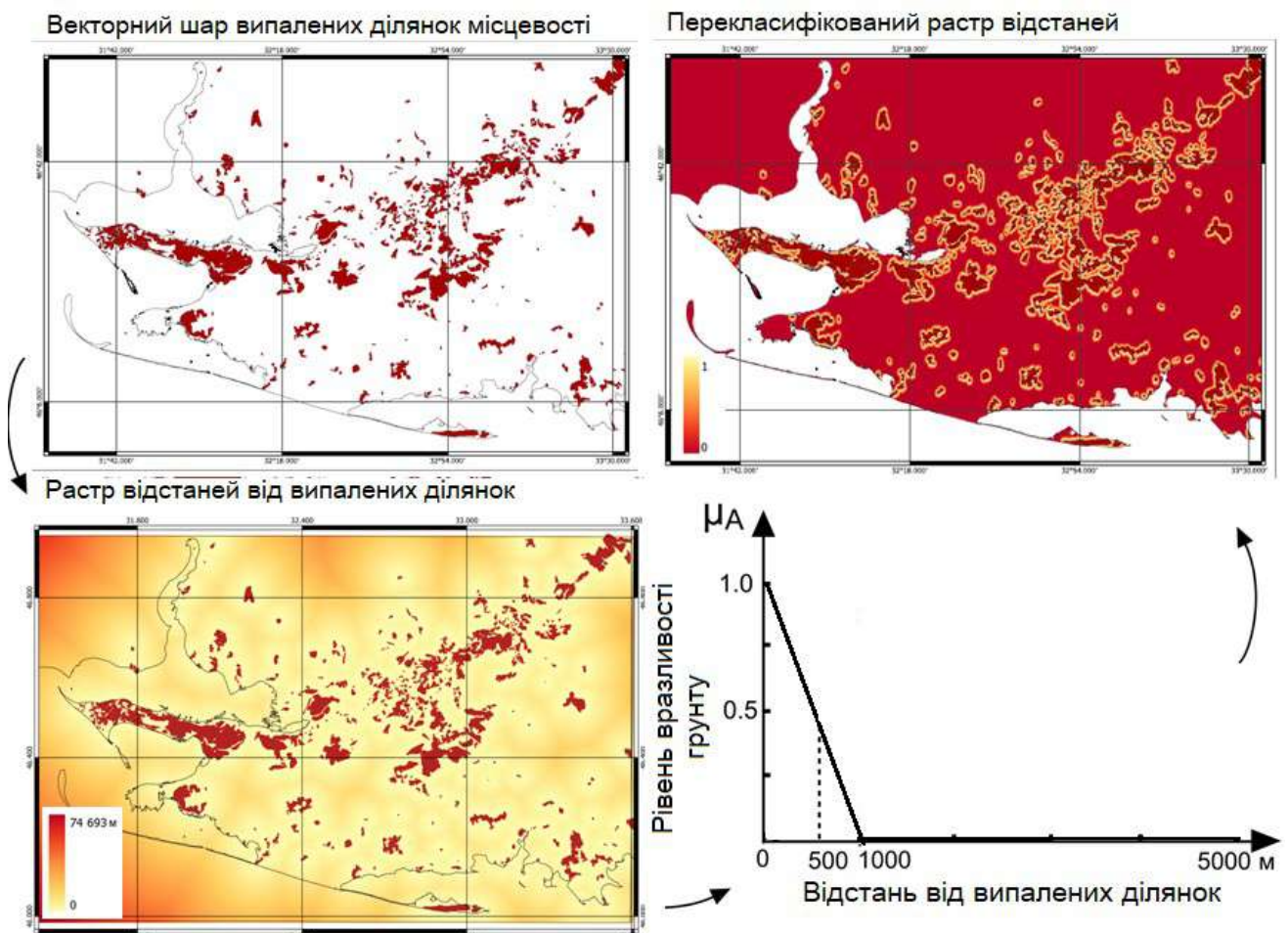


Рис. 4. Етапи стандартизації векторного полігонального шару випалених ділянок місцевості

проміжні значення вказують на різний рівень вразливості.

Розрахунок ваг критеріїв (14) виконується з використанням методу аналізу ієрархій окремо для кожної групи критеріїв, що об'єднані одним з сьома індексів оцінки. Тобто для кожної групи критеріїв будується своя матриця парних порівнянь (15), а також окрема матриця для глобальних індексів ієрархії. Аналогічно агрегування оцінок виконується на кожному рівні ієрархії, окремо для кожної групи критеріїв. Для згортки оцінок може бути використаний будь-який оператор агрегування. Простим з точки зору інтегрування в ГІС та ефективним варіантом є оператор зважена сума (16). У випадку бажання врахувати різні форми компромісу між значеннями альтернатив за різними критеріями та формувати різні стратегії прийняття рішень, рекомендується використовувати OWA-оператор Ягера (17).

Висновки. У роботі вирішено актуальне завдання розробки геопросторової моделі процесу багатокритеріального аналізу рішень, яка може використовуватися у вирішенні різних просторових завдань раціонального управління еколого-економічним розвитком територій. Наводиться приклад використання моделі процесу БКАР для картування ризику деградації земель з метою підтримки планування заходів щодо відновлення функціональних властивостей та продуктивності українських ґрунтів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що запропоновано підхід, який базується на моделі територій та просторово адаптованих методах прийняття рішень. Властивості території оцінюються за функціями впливу об'єктів (процесів), що належать цій території. Показано, що уявлення моделі території як системи об'єктів (чи процесів), що впливають на властивості цієї території, та зв'язків між ними, добре узгоджується з математичними основами БКАР та надає обґрунтування вибору набору критеріїв та альтернатив.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблено технологію геопросторового багатокритеріального аналізу рішень, яка базується на існуючих функціях геообробки інформації та може бути повністю інтегрована в ГІС середовище. Застосування запропонованого підходу дозволить у майбутньому створювати сценарії та програмні засоби для сучасних геоінформаційних систем. Ці інструменти будуть особливо важливими на етапі відновлення економічного потенціалу та відбудови інфраструктури України.

Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні моделі процесу аналізу геопросторових багатокритеріальних рішень з метою врахування різноманітних стратегій прийняття рішень, зокрема в умовах ризику та невизначеності.

Список використаної літератури

1. Голубцов О., Сорокіна Л., Сплодитель А., Чумаченко С. *Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу*. Київ: ГО "Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 32 с.

2. Malczewski J., Rinner C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Springer, New York. 2015, 331 p. DOI: 10.1007/978-3-540-74757-4.
3. Lidouh K. On themotivation behind MCDA and GIS integration. *Multicriteria Decision Making*. 2013. Vol. 3, № 2/3. P. 101–113. DOI:10.1504/IJMCDM.2013.053727.
4. Kuznichenko S., Kovalenko L., Buchynska I., Gunchenko Y., Development of a multi-criteria model for making decisions on the location of solid waste landfills. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol.2, No. 3(92). P. 21–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.129287
5. Kuznichenko S. D. Model of the process of geospatial multi-criteria decision analysis for territorial planning. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022. Vol. 2, P.140–153. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-14>.
6. Kuznichenko S., Buchynska I., Kovalenko L., Gunchenko, Y. Suitable site selection using two-stage GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 1080 AISC, P.214–230. DOI: 10.1007/978-3-030-33695-0_16
7. Saaty T. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation. *New York, NY: McGraw*, 1980. P. 287.
8. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965. Vol. 8, No. 3, P. 338–353.
9. Кузніченко С. Д., Гунченко Ю. О., Бучинська І. В. Нечітка модель обробки геопросторових даних в мультикритеріальному аналізі придатності територій. *Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. Київ: ВІКНУ, 2018. № 61. С.90-102.
10. Yager R. R. Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 1996. Vol.11(1), P. 49–73.
11. Кузніченко С., Бучинська І. Вибір операторів агрегування для багатокритеріальної оцінки придатності територій. *Електронне фахове наукове видання «Кибербезпека: освіта, наука, техніка»*, 2019. Т. 2, № 6. С. 46–56. DOI: 10.28925/2663-4023.2019.6.4656.
12. Stankevich S, Kharytonov N, Dudar T, Kozlova A. *Risk Assessment of Land Degradation Using Satellite Imagery and Geospatial Modelling in Ukraine. Land Degradation and Desertification - a Global Crisis. InTech*, 2016. P.15–25. DOI: 10.5772/62403

References (transliterated)

1. Holubtsov O., Sorokina L., Splodytel A., Chumachenko S. *Vplyv viiny rosii proty Ukrainy na stan ukrainskykh gruntiv. Rezultaty analizu*. [The impact of russia's war against Ukraine on the state of Ukrainian soils. Analysis results]. Kyiv: NGO "Center for Environmental Initiatives "Ekodia", 2023. 32 p. (In Ukr.)
2. Malczewski J., Rinner C. *Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science*. Springer, New York. 2015, 331 p. DOI: 10.1007/978-3-540-74757-4.
3. Lidouh K. On themotivation behind MCDA and GIS integration. *Multicriteria Decision Making*. 2013. Vol. 3, № 2/3. P. 101–113. DOI: 10.1504/IJMCDM.2013.053727.
4. Kuznichenko S., Kovalenko L., Buchynska I., Gunchenko Y., Development of a multi-criteria model for making decisions on the location of solid waste landfills. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018. Vol.2, No. 3(92). P. 21–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.129287
5. Kuznichenko S. D. Model of the process of geospatial multi-criteria decision analysis for territorial planning. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022. Vol. 2, P.140–153. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-14>.
6. Kuznichenko S., Buchynska I., Kovalenko L., Gunchenko, Y. Suitable site selection using two-stage GIS-based fuzzy multi-criteria decision analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020. Vol. 1080 AISC, P.214–230. DOI: 10.1007/978-3-030-33695-0_16
7. Saaty T. The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resources allocation. *New York, NY: McGraw*, 1980. P. 287.
8. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, 1965. Vol. 8, No. 3, P. 338–353.
9. Kuznichenko S.D., Hunchenko Yu.O., Buchynska I.V. Nechitka model obrobky heoprostorovykh danykh v multykryterialnomu analizi prydatnosti terytorii [Fuzzy model of geospatial data processing in multi-criteria analysis of suitability of territories].

Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka [Collection of scientific works of the Military Institute of Taras Shevchenko Kyiv National University]. Kyiv, VIKNU, 2018. № 61. P.90-102.

10. Yager R. R. Quantifier guided aggregation using OWA operators. *International Journal of Intelligent Systems*, 1996. Vol.11(1), P. 49–73.
11. Kuznichenko S., Buchynska I. Vybir operatoriv ahrehuvannia dlia bahatokryterialnoi otsinky prydatnosti terytorii [Selection of aggregation operators for a multi-criteria evolution of suitability of territories]. *Elektronne fakhove naukove vydannia «Kiberbezpeka:*

osvita, nauka, tekhnika» [Electronic professional scientific publication "Cybersecurity: education, science, technology"], 2019. Vol. 2, № 6. P. 46–56. DOI: 10.28925/2663-4023.2019.6.4656. (In Ukr.).

12. Stankevich S, Kharytonov N, Dudar T, Kozlova A. Risk Assessment of Land Degradation Using Satellite Imagery and Geospatial Modelling in Ukraine. *Land Degradation and Desertification - a Global Crisis. InTech*, 2016. P.15–25. DOI: 10.5772/62403

Hadziuvana (received) 14.05.2024

UDC 004.827

S. D. KUZNICHENKO, Candidate of Geographical Sciences (PhD), Docent, Odesa State Environmental University, Associate Professor at the Department of Information Technologies, Odesa, Ukraine; e mail: skuznichenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7982-1298>

D. A. IVANOV, PhD Student, Odesa State Environmental University, Odesa, Ukraine; e mail: skuznichenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1825-0097>

D. O. KUZNICHENKO, LikeBus logistics company, Odesa, Ukraine; e-mail: kuznichenko.d@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1080-6433>

USING THE GEOSPATIAL MULTI-CRITERIA DECISION ANALYSIS MODEL AND METHODS FOR SOIL DEGRADATION RISK MAPPING

Modern methods of spatial analysis and modeling are increasingly being combined with decision-making methods and fuzzy set theory. The latter are actively integrated into the environment of Geographic Information Systems (GIS), such as well-known ones like ArcGIS or QGIS, in the form of separate tools, plugins, or Python scripts. Decision-making methods allow structuring the problem in geographical space, as well as taking into account the knowledge and judgments of experts and the preferences of the decision-maker in determining the priorities of alternative solutions. This paper provides a description of a geospatial multi-criteria decision analysis model, which allows addressing a wide range of ecological and socio-economic issues. An example of applying this model to map soil degradation risk in Ukraine is presented in the paper. According to the object-spatial approach, the properties of a territory are determined as the result of the action (impact) of a set of objects (processes) belonging to this territory. The territory is represented as a two-dimensional discrete grid, each point of which (local area) is an alternative. The set of local areas of the territory constitutes the set of alternatives. The representation of the territory model as a system of objects and relationships between them allows justifying the choice of a set of criteria (factors) for assessing soil degradation risk. Each criterion is a separate raster layer of the map. To build a hierarchical decision-making structure and calculate the importance coefficients of the criteria, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method is used. To account for uncertainty in assessments and judgments of experts at the stages of standardization of alternative attributes by different criteria and aggregation of their assessments, expert membership functions for fuzzy sets and fuzzy quantifiers are applied. The particular feature of the proposed multi-criteria decision analysis model is its low computational complexity and ease of integration into the GIS environment.

Keywords: multi-criteria decision analysis, Analytic Hierarchy Process, Geographic Information System, spatial modeling, expert assessments, soil degradation risk.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Кузнiченко Світлана Дмитрівна / Kuznichenko Svitlana Dmytrivna

Автор 2 / Author 2: Іванов Дмитро Анатолійович / Ivanov Dmytro Anatoliiovych

Автор 3 / Author 3: Кузнiченко Дмитро Олександрович / Kuznichenko Dmytro Oleksandrovych

УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.04

УДК 681.5

О. С. КУЦЕНКО, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; e-mail: Oleksandr.Kutsenko@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6059-3694>

М. І. БЕЗМЕНОВ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; e-mail: Mykola.Bezmenov@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2995-2350>

С. В. КОВАЛЕНКО, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; e-mail: Serhii.Kovalenko@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8763-0862>

ДВА ПІДХОДИ ДО ФОРМУВАННЯ КІЛЬКІСНОЇ МІРИ СТІЙКОСТІ НА ОСНОВІ МНОЖИННИХ ОЦІНОК ПАРАМЕТРІВ АНСАМБЛЮ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Стаття присвячена подальшому розвитку теорії стійкості динамічних систем, а саме кількісним методам оцінки стійкості. Проведено огляд та дано критичний аналіз різних підходів, що дозволяють тією чи іншою мірою запровадити кількісну міру стійкості динамічних систем. Обґрунтовано обмеженість існуючих методів, яка пов'язана насамперед з оцінкою поведінки окремих траєкторій, а також зі складністю отримання оцінки поведінки ансамблю перехідних процесів при спробі застосування методів Н. Д. Моїсеєва. Обґрунтовано метод кількісної оцінки стійкості динамічної системи на основі чисельних оцінок поведінки області початкових відхилень від положення рівноваги на траєкторіях динамічної системи. Виходячи з формули Ліувілля, показано, що зміна об'єму області початкових відхилень на траєкторіях системи не залежить від форми останньої. Це дозволило обмежитися областю початкових відхилень у формі гіперсфери та отримати простий вираз для кількісної міри стійкості лінійної стаціонарної динамічної системи, геометричний зміст якої полягає в оцінці швидкості зміни об'єму контрольної поверхні. У статті запропоновано та обґрунтовано критерій рівномірності деформації області початкових відхилень. Суть проблеми полягає в тому, що в перехідному процесі значення деяких компонентів фазового вектора можуть досягати неприпустимих відхилень від положення рівноваги. Отримана теоретична оцінка нерівномірності деформації для лінійних систем, за яку прийнято відхилення сліду матриці еліпсоїда відхилень до сліду матриці гіперсфери відповідного об'єму. Запропоновано та обґрунтовано метод кількісної оцінки стійкості на основі інтегрального квадратичного функціоналу, обчисленого на множині перехідних процесів при початкових відхиленнях у формі множини еліпсоїдів з нормованим об'ємом. Як множина матриць інтегрального квадратичного критерію розглядаються діагональні додатні нормовані матриці. Запропоновано простий алгоритм обчислення множинного інтегрального квадратичного критерію.

Ключові слова: стійкість, технічна стійкість, еліпсоїд відхилень, положення рівноваги, інтегральний квадратичний функціонал, перехідний процес.

Вступ. Серед безлічі понять та визначень теорії автоматичного управління особливе значення мають такі фундаментальні якісні властивості керованих процесів як стійкість, керованість, спостережуваність та інші, що визначають принципову можливість вирішення тих чи інших задач управління.

У той самий час на практиці важливо представляти – якою мірою керований процес має ті чи інші із зазначених властивостей. Особливе значення кількісних оцінок якісних показників проявляється за умов невизначеностей різних параметрів математичних моделей досліджуваних процесів, і навіть під час вирішення задач параметричного синтезу регуляторів автоматичних систем.

Метою цього дослідження є обґрунтування низки

кількісних заходів, що характеризують множинну поведінку стійких динамічних систем поблизу положення рівноваги.

Огляд та аналіз методів кількісної оцінки стійкості динамічних систем. Основні положення теорії стійкості динамічних систем, фундаментальні основи якої сформульовані О. М. Ляпуновим [1] та отримали подальший розвиток у працях Н. Г. Четаєва, І. Г. Малкіна, Г. Н. Дубошина, Н. Д. Мойсеєва, Є. О. Барбашина, Н. Н. Красовського, А. А. Мартинюка та інших, характеризуються одним основним недоліком – якісною бінарною оцінкою стійкості динамічної системи та відсутністю будь-яких кількісних оцінок цієї властивості. Слід зазначити, що якісній теорії стійкості передували окремі кількісні оцінки стійкості, що виникли з реальних практичних задач [2, 3]. У 1749 р. Л. Ейлер у

© Куценко О. С., Безменов М. І., Коваленко С. В., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



своїй фундаментальній роботі «Корабельна наука» сформулював міру стійкості як момент, що відновлює рівновагу сили, який розвивається після того, як плаваюче тіло було відхилено від положення рівноваги. У 1837 р. К. Ф. Гауссом була введена багато в чому інтуїтивна та проста кількісна міра стійкості у вигляді логарифмічного декременту згасання.

Вперше постановку задачі про кількісну оцінку стійкості динамічних систем було сформульовано Н. Д. Мойсеєвим. У [2] їм запроваджено поняття «градієнт стійкості» і «імовірність стійкості», що дозволяють дати чисельну оцінку множині збурених рухів.

Запропоновані М. Д. Мойсеєвим міри стійкості, засновані на кількісних оцінках розмірів областей відхилення від положення рівноваги множини фазових траєкторій, що починаються в деякій фіксованій області фазового простору. Таким чином, підхід М. Д. Мойсеєва став кількісним розвитком Ляпунівського формулювання стійкості, в якій стверджується існування деяких наперед заданих областей фазового простору, в яких починаються і закінчуються фазові траєкторії стійких динамічних систем. Основним недоліком цих підходів є відсутність часових показників, що характеризують еволюцію області початкових збурень через рішення диференціальних рівнянь сталої системи.

Слід зазначити, що ідеологія множинного підходу до аналізу керованих динамічних систем була використана в роботах О. А. Красовського [4], О. Б. Куржанського [5], Ф. Л. Черноусько [6]. Питання еволюції множини рішень системи лінійних однорідних диференціальних рівнянь при еліпсоїдальній ділянці початкових значень розглянуті в [7] та [8].

З розвитком теорії та практики автоматичного управління процесами в технічних системах намітився напрямок близький, по суті, кількісній оцінці стійкості – це чисельна оцінка якості перехідних процесів у стійких системах автоматичного управління (САУ). Найбільш «корисними» з практичної точки зору видаються прямі показники якості одновимірних САУ: час перехідного процесу, перерегулювання, коливальність та ін, запроваджені в практику В. В. Солодовниковим [9].

Крім свого практичного значення для одновимірних САУ, прямі показники якості перехідних процесів мають принципове методологічне значення при обґрунтуванні аналогічних критеріїв для багатовимірних САУ. Зокрема, у [10] запропоновано один з можливих підходів до оцінки якості багатовимірних САУ. Його суть зводиться до вектора прямих показників якості по кожній регульованій змінній. Скалярні показники утворюються в результаті лінійної згортки всіх компонентів вектора показників або на підставі вибору найгіршої компоненти в якості визначальної.

Слід зазначити, що обчислення прямих показників якості є в загальному випадку досить складним завданням, пов'язаним з великими обсягами обчислень множини фазових траєкторій диференціальних рівнянь у багатовимірному просторі та аналізом розташування характерних точок траєкторій, які визначають прямі

показники якості. Вочевидь, що такий підхід орієнтований переважно на задачу аналізу сконструйованої САУ. Для вирішення задач структурного та параметричного синтезу такий підхід є малоефективним.

Найбільшого поширення набули непрямі критерії якості САУ. Це пов'язано, передусім, з тим, що вони не вимагають складних обчислень і щодо них можуть бути запропоновані методи синтезу САУ, які оптимізують ці критерії. Серед непрямих критеріїв слід виділити дві групи, перша з яких базується на розподілі коренів характеристичного рівняння, а друга ґрунтується на інтегральних оцінках норм перехідних процесів у функціональному просторі.

Кореневі методи [11] дозволяють приблизно оцінити такі характеристики, як час перехідного процесу, так і коливальні показники системи. В основу кореневих методів покладено два параметри, що характеризують розподіл коренів характеристичного рівняння – ступінь стійкості η та коливальність μ . На жаль, лише для ряду окремих випадків початкових умов вдається встановити однозначний зв'язок між μ та η й прямими показниками якості: часом перехідного процесу та перерегулюванням. Обмеженість методів оцінки якості перехідних процесів за найближчими до уявної осі коренями характеристичного рівняння априорі обумовлена повним ігноруванням всього спектра лінійного оператора системи диференціальних рівнянь, а також множини допустимих початкових відхилень від положення рівноваги.

Одним з підходів, що дозволяють врахувати весь спектр коренів характеристичного рівняння, є оцінка швидкодії з урахуванням середнегеометричного значення коренів [12]. Водночас і цей опосередкований показник динамічних властивостей САУ не дозволяє одержати оцінки перехідних процесів з погляду прямих показників якості.

Непряма оцінка якості перехідних процесів у стійкій системі на основі інтегральних квадратичних функціоналів (ІКФ), запропонована в 1946 р. М. Д. Мойсеєвим та О. А. Красовським [3], вже багато десятиліть залучає дослідників у галузі аналізу та синтезу САУ. Це зумовлено насамперед тим, що з лінійних систем ІКФ досить легко обчислюється без інтегрування системи диференціальних рівнянь. Обчислення ІКФ зводиться до розв'язання алгебраїчного лінійного матричного рівняння Ляпунова, методи розв'язання якого добре розроблені. У той самий час, оцінці обуреного руху динамічної системи з урахуванням ІКФ властивий ряд важливих недоліків. Насамперед, результатом обчислення ІКФ деякого локального перехідного процесу є величина ніяк не пов'язана з практичними критеріями якості. По-друге, його величина залежить від вагових коефіцієнтів квадратичної форми, вибір яких у багатьох випадках здійснюється суб'єктивно.

Ще одним із підходів до кількісної оцінки стійкості динамічних систем можна вважати методи, що ґрунтуються на оцінці евклідової норми вектора стану [13, 14]. На жаль, ці методи у ряді випадків можуть дати значну похибку, оскільки вони засновані на

максимальній та мінімальній величинах власних значень симетричних матриць, що однозначно залежать від вихідної матриці динамічної системи.

Заходи стійкості динамічних систем на основі технічної стійкості. Перейдемо тепер до кількісних показників, що характеризують множину процесів переходу в положення рівноваги стійких систем. Ряд таких показників тісно пов'язаний з поняттям технічної стійкості, запровадженим Н. Д. Мойсеєвим [15]. Технічна стійкість на відміну від стійкості за Ляпуновим дозволяє пов'язати час із зміною параметрів деякої області, що оточує положення рівноваги стійкої системи. Існує безліч визначень технічної стійкості, але узагальнюючою є таке визначення [16]. Нехай рівняння обуреного руху мають вигляд

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{w}, t), \quad \mathbf{x} \in R^n, \quad t \in [t_0, t_0 + T], \quad (1)$$

де \mathbf{f} – вектор-функція, безперервна по t і диференційована по \mathbf{x} ; $\mathbf{w} \in W$ – вектор конструктивних параметрів системи, а $\mathbf{f}(\mathbf{0}, \mathbf{w}, t) \equiv \mathbf{0}$. Нехай також задані дві компактні підмножини $G_{t_0} \subset R^n$ та $G_T \subset R^n$. Тоді нульове рішення системи (1) технічно стійко, якщо існує хоча б один вектор такий, що всі інтегральні криві системи (1), що починаються при $t = t_0$ на контрольній множині G_{t_0} , не виходять за межі множини G_T при $t \in [t_0, t_0 + T]$. Якщо розглядати систему (1) при фіксованому векторі, то висновок про технічну стійкість залежить від задавання чотирьох об'єктів (G_{t_0}, G_T, t_0, T) . Таке визначення технічної стійкості дає шлях побудови різних кількісних заходів стійкості, мають наочний геометричний і фізичний сенс [17].

Зафіксуємо t_0 і G_{t_0} та побудуємо множину G_t , що є множиною точок всіх траєкторій системи (1) у момент часу t , що починаються на множині G_{t_0} . Множина траєкторій рішень системи (1) у $(n+1)$ -вимірному просторі утворює деяку трубку L перетин якої перпендикулярно до осі часу являє собою область G_t (рис. 1)

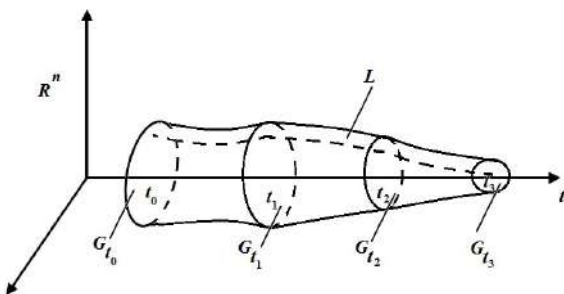


Рис. 1. Множина інтегральних траєкторій сталої системи

Еволюція області G_t у часі визначає макроскопічну поведінку ансамблю траєкторій динамічної системи. Таке уявлення поведінки динамічної системи дозволяє

шляхом введення числових характеристик $\rho(G_t)$ окремих перерізів G_t трубки L і всієї L у цілому отримати кількісні оцінки, що характеризують здатність стійкої динамічної системи досягати положення рівноваги. Як числові характеристики множини G_t можуть бути обрані такі скалярні міри замкнених множин, як об'єм або діаметр.

Введемо у розгляд величину $\varepsilon(t) = \frac{\rho(G_t)}{\rho(G_{t_0})}$ – ступінь стиснення контрольної множини. Вочевидь, що з стійкої системи $\varepsilon(t_0) = 1$, а $\varepsilon(t) \rightarrow 0$ при $t \rightarrow \infty$.

Таким чином, якщо залежність $\varepsilon(t)$ відома, можна запропонувати ряд числових характеристик, що описують процес збіжності ансамблю фазових траєкторій, які починаються на заданій контрольній множині G_{t_0} . До таких показників за аналогією з прямими показниками якості перехідних процесів одновимірних систем автоматичного регулювання може бути віднесено умовний час t^* , який відповідає заданому значенню ступеня стиснення ε^* . Ще одним із кількісних показників є інтегральний показник

$$J = \int_{t_0}^{\infty} \varepsilon(t) dt, \quad (2)$$

що являє собою відносний об'єм трубки L . Цей показник має перевагу, що його величина не залежить від вибору ε^* .

Особливо просто ступінь стиснення фазового об'єму $\varepsilon(t)$ обчислюється у разі лінійних стаціонарних систем виду

$$\dot{\mathbf{x}} = A\mathbf{x}, \quad \mathbf{x} \in R^n, \quad (3)$$

де A – $n \times n$ гурвіцева матриця.

Попередньо розглянемо систему однорідних звичайних диференціальних рівнянь загального вигляду

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in R^n, \quad (4)$$

де $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ – n -вимірний диференційований вектор функція.

Нехай також задана довільна замкнута область $G_{t_0} \subset R^n$. Розглянемо множину траєкторій – рішень системи (4) з початковими умовами $\mathbf{x}(t_0) \in G_{t_0}$. Нехай також є G_t множина значень рішень системи (4) у момент часу t , що відповідають $\mathbf{x}(t_0) \in G_{t_0}$. Тоді для швидкості зміни об'єму області G_t [18] має місце співвідношення

$$\frac{dv}{dt} = \int_{G_t} \operatorname{div} \mathbf{f} dx. \quad (5)$$

У випадку лінійної системи (3), як неважко бачити,

$$\operatorname{div} \mathbf{f} = \operatorname{div} A\mathbf{x} = \operatorname{tr} A. \quad (6)$$

Таким чином, вираз (5) з урахуванням (6) дає

наступний результат:

$$\frac{dv}{dt} = \text{tr}A \int_{G_t} dx. \quad (7)$$

Очевидно, що інтеграл у правій частині (7) є об'ємом області G_t . Отже, з (7) безпосередньо слідує диференціальне рівняння зміни об'єму контрольної області

$$\dot{v}(t) = v \text{tr}A,$$

рішення якого можна записати як

$$v(t) = v(t_0) e^{\text{tr}A(t-t_0)}. \quad (8)$$

Оскільки система (3) автономна, нічого не заважає нам покласти $t_0 = 0$. Тоді ступінь стиснення фазового об'єму $\varepsilon(t)$ запишеться у вигляді

$$\varepsilon(t) = e^{\text{tr}At}. \quad (9)$$

Відповідно до (9) умовний час множинного перехідного процесу, що відповідає заданому ступеню стиснення фазового об'єму ε^* , може бути обчислений за формулою

$$t^* = \frac{\ln \varepsilon^*}{\text{tr}A}.$$

Слід зазначити те, що з лінійних систем функція $\varepsilon(t)$ а, отже, і t^* залежить від області G_0 .

Вираз для ступеня стиснення фазового об'єму (9) дозволяє легко обчислити інтегральну міру стійкості (2):

$$J = \int_0^{\infty} e^{\text{tr}At} dt = -\frac{1}{\text{tr}A}. \quad (10)$$

Оцінка нерівномірності деформації у контрольній області. Оцінки ступеня стиснення деякої області фазового простору стійкої системи, отримані вище, інваріантні стосовно її конфігурації. Разом з тим, у перехідному процесі значення деяких компонент фазового вектора можуть в окремі моменти часу досягати значних відхилень від рівноваги, що є деяким аналогом перерегулювання в одновимірних системах автоматичного регулювання. Таким чином, нерівномірність деформації контрольної області фазового простору на рішеннях системи диференціальних рівнянь є ще однією характеристикою перехідного множинного процесу. Для оцінки нерівномірності деформації контрольної області розглянемо комплекс фазових траєкторій, що починаються з одиничної кулі. Тоді послідовність областей являтиме собою еліпсоїди

$$G_t = \{x | x^T R^{-1}(t)x \leq 1\}. \quad (11)$$

Неважно переконалися простою перевіркою, що матриця задовольняє матричному диференціальному рівнянню

$$\dot{R} = AR + RA^T, R(0) = E. \quad (12)$$

Рішення (12) можна подати у вигляді

$$R(t) = \sum_{i,j} U_{ij} \text{tr}V_{ij} e^{\lambda_{ij}t}, \quad (13)$$

де $\lambda_{ij} = \lambda_i + \lambda_j$, $U_{ij} = u_i u_j^T$, $V_{ij} = v_i v_j^T$, $i, j = \overline{1, n}$, а u_i і v_i – власні вектори матриць A і A^T , що відповідають власним числам λ_i матриці A . При цьому системи векторів (u_1, u_2, \dots, u_n) і (v_1, v_2, \dots, v_n) квазібіортогональні [19] і нормовані: $(u_i, v_j) = \delta_{ij}$, де δ_{ij} – символ Кронекера.

Матриці U_{ij} і V_{ij} являють собою власні вектори взаємно пов'язаних матричних лінійних операторів $\hat{A}(X) = AX + XA^T$ і $\hat{A}^*(X) = A^T X + XA$, що відповідають власним числам λ_{ij} операторів \hat{A} і \hat{A}^* й утворюють квазібіортогональні бази в просторі $n \times n$ квадратних матриць. Квазібіортогональність базисних систем U_{ij} і V_{ij} впливає з квазібіортогональності систем власних векторів (u_1, u_2, \dots, u_n) та (v_1, v_2, \dots, v_n) . З умови нормування для u_i і v_j випливає аналогічна умова для матриць U_{ij} і V_{ks} : $(U_{ij}, V_{ks}) = \delta_{ijks}$, де $\delta_{ijks} = 1$ при $i = j = k = s$ і нулю інакше.

Оскільки власні числа матричних лінійних операторів можуть бути дійсними або комплексно пов'язаними, то є сенс розглянути структуру рішення (13) для зазначених класів власних чисел окремо.

Для дійсних λ_{ij} доданки рішення (13) матимуть вигляд (13).

Для кожної комплексно пов'язаної пари $\lambda_{ij} = \alpha_{ij} \pm i\beta_{ij}$ шукатимемо відповідну суму часткових рішень $R_{ij}(t)$ та $\bar{R}_{ij}(t)$

$$R_{ij}(t) + \bar{R}_{ij}(t) = U_{ij} \text{tr}V_{ij} e^{(\alpha_{ij} + i\beta_{ij})t} + \bar{U}_{ij} \text{tr}\bar{V}_{ij} e^{(\alpha_{ij} - i\beta_{ij})t}, \quad (14)$$

де $U_{ij} = A_{ij} + iB_{ij}$, $\bar{U}_{ij} = A_{ij} - iB_{ij}$, $V_{ij} = C_{ij} + iD_{ij}$, $\bar{V}_{ij} = C_{ij} - iD_{ij}$; $A_{ij}, B_{ij}, C_{ij}, D_{ij}$ – дійсні $n \times n$ матриці.

Підставляючи останні співвідношення в (14), отримаємо

$$R_{ij}(t) + \bar{R}_{ij}(t) = (P_{ij} + iS_{ij}) e^{(\alpha_{ij} + i\beta_{ij})t} + (P_{ij} - iS_{ij}) e^{(\alpha_{ij} - i\beta_{ij})t}, \quad (15)$$

де

$$P_{ij} = A_{ij} \text{tr}C_{ij} - B_{ij} \text{tr}D_{ij}, \\ S_{ij} = A_{ij} \text{tr}D_{ij} + B_{ij} \text{tr}C_{ij}.$$

Після переходу в (15) до тригонометричної форми комплексних чисел отримаємо остаточно

$$R_{ij}(t) + \bar{R}_{ij}(t) = 2(P_{ij} \cos \beta_{ij}t - S_{ij} \sin \beta_{ij}t) e^{\alpha_{ij}t}.$$

Таким чином, загальне рішення матричного диференціального рівняння (12), що описує еволюцію одиничної кулі на рішеннях лінійної системи диференціальних рівнянь, остаточно набуде вигляду

$$R(t) = \sum_{i,j} R_{ij} e^{\lambda_{ij}t} + 2 \sum_{i,j} (P_{ij} \cos \beta_{ij}t - S_{ij} \sin \beta_{ij}t) e^{\alpha_{ij}t}, \quad (16)$$

Таким чином

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}^T \mathbf{P} \mathbf{Z} &= \text{diag} \{ \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n \}, \\ \mathbf{Z}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Z} &= \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (27)$$

тобто в координатах \mathbf{y} еліпсоїд θ відобразитися у сферу одиничного радіусу.

Обчислимо множинний ІКФ (23) з урахуванням (25) та (27):

$$\begin{aligned} \int_{\theta} \mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x} dx_1 dx_2 \dots dx_n &= \int \sum_{y^j y^j \leq 1} \rho_k y_k^2 |\mathbf{Z}| dy_1 dy_2 \dots dy_n = \\ &= |\mathbf{Z}| \sum_{k=1}^n \rho_k \int_{y^j y^j \leq 1} y_k^2 dy_1 dy_2 \dots dy_n = J_0 |\mathbf{Z}| \sum_{k=1}^n \rho_k, \end{aligned}$$

де J_0 постійна, залежить тільки від розмірності n системи [22]:

$$J_0 = \int_{y^j y^j \leq 1} y_k^2 dy_1 dy_2 \dots dy_n = \frac{1}{2^{n+1}} \frac{\pi^2}{\Gamma\left(2 + \frac{\pi}{2}\right)}$$

а визначник $|\mathbf{Z}|$ можна обчислити виходячи з (27), скориставшись відомими співвідношеннями теорії визначників

$$|\mathbf{Z}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Z}| = |\mathbf{Z}^T| |\mathbf{R}^{-1}| |\mathbf{Z}| = |\mathbf{Z}|^2 |\mathbf{R}|^{-1} = 1,$$

з чого випливає

$$|\mathbf{Z}| = |\mathbf{R}|^{1/2}. \quad (28)$$

Оскільки \mathbf{R}^{-1} матриця еліпсоїда, то визначник $|\mathbf{R}| > 0$, тобто співвідношення (33) коректне. Крім того, з (26) випливає, що власні числа пучка матриць $(\mathbf{P}, \mathbf{R}^{-1})$ збігаються з власними числами $\lambda_k(\mathbf{R}\mathbf{P})$ матриці $\bar{\mathbf{P}} = \mathbf{R}\mathbf{P}$.

Таким чином, множинна оцінка ІКФ при початкових умовах усередині еліпсоїда θ набуде вигляду

$$\bar{J} = J_0 |\mathbf{R}|^{1/2} \text{tr} \mathbf{R}\mathbf{P}. \quad (29)$$

Для вибраного класу еліпсоїдів $\bar{\theta}$ (24) вираз (29) можна подати у вигляді

$$\bar{J} = J_0 \sum_{k=1}^n p_{kk} r_k, \quad (30)$$

де p_{kk} – k -й діагональний елемент матриці \mathbf{P} .

Оскільки матриця \mathbf{P} залежить від вибору вагової матриці \mathbf{Q} критерію (20), то для зниження ступеня суб'єктивізму при множинній оцінці ІКФ на множині початкових умов введемо оцінку ІКФ на множині вагових матриць $\bar{\mathbf{Q}}$. У якості $\bar{\mathbf{Q}}$ виберемо множину діагональних додатних нормованих матриць

$$\bar{\mathbf{Q}} = \left\{ \text{diag} \{ q_1, q_2, \dots, q_n \} \mid q_i > 0, \sum_{i=1}^n q_i = 1, i = \overline{1, n} \right\}. \quad (31)$$

Величини p_{kk} , що входять у (30), є рішеннями системи лінійних рівнянь (22) і можуть бути представлені у вигляді

$$p_{kk} = \sum_{i=1}^n c_{ik} q_i, \quad (32)$$

де коефіцієнти c_{ik} залежить тільки від параметрів \mathbf{A} динамічної системи. Після підстановки (32) у (30) отримаємо

$$\bar{J} = J_0 \sum_{k=1}^n r_k \sum_{i=1}^n c_{ik} q_i.$$

Обчислимо тепер множинну оцінку \bar{J} на множині допустимих вагових матриць $\bar{\mathbf{Q}}$ у вигляді

$$\begin{aligned} \tilde{J} &= \int_{\bar{\mathbf{Q}}} \bar{J} dq_1 dq_2 \dots dq_n = J_0 \int_{\bar{\mathbf{Q}}} \sum_{k=1}^n r_k \sum_{i=1}^n c_{ik} q_i dq_1 dq_2 \dots dq_n = \\ &= J_0 \sum_{k=1}^n r_k \sum_{i=1}^n c_{ik} \int_{\bar{\mathbf{Q}}} q_i dq_1 \dots dq_n. \end{aligned} \quad (33)$$

Оскільки всі інтеграли $\int_{\bar{\mathbf{Q}}} q_i dq_1 dq_2 \dots dq_n$ не залежать від індексу, то співвідношення (33) можна переписати у вигляді

$$\tilde{J} = J_0 C_0 \sum_{k=1}^n r_k C_k, \quad (34)$$

де $C_k = \sum_{i=1}^n c_{ik}$, C_0 – постійна, що залежить тільки від розмірності.

Величина критерію \tilde{J} (34) залежить від вибору параметрів початкового еліпсоїда (r_1, r_2, \dots, r_n) , що задають конкретний еліпсоїд $\theta \in \bar{\theta}$. Обчислимо множинну оцінку величини ІКФ на множині еліпсоїдів $\bar{\theta}$ (24) у вигляді

$$\hat{J} = J_0 C_0 \int_{\substack{r_1 r_2 \dots r_n = 1 \\ r_1, r_2, \dots, r_n > 0}} \sum_{k=1}^n r_k C_k dr_1 dr_2 \dots dr_n.$$

Останній інтеграл можна подати у вигляді

$$\hat{J} = J_0 C_0 \sum_{k=1}^n C_k \int_{\substack{r_1 r_2 \dots r_n = 1 \\ r_1, r_2, \dots, r_n > 0}} r_k dr_1 \dots dr_n. \quad (35)$$

Величина інтеграла (35) не залежить від індексу k і являє собою деяку постійну R_0 , що залежить тільки від розмірності n . Таким чином, множинна оцінка ІКФ на множині еліпсоїдальних початкових умов і множині вагових матриць набуде вигляду

$$\hat{J} = J_0 C_0 R_0 \sum_{k=1}^n C_k.$$

Таким чином, величина множинного ІКФ на множині початкових еліпсоїдів (24), вимірних множиною вагових матриць (31) пропорційна величині

$$J^* = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ik}. \quad (36)$$

Для знаходження коефіцієнтів матриці c_{ik} шукаємо рішення рівняння Ляпунова (22) у вигляді

$$P = q_1 P_1 + q_2 P_2 + \dots + q_n P_n, \quad (37)$$

де P_1, P_2, \dots, P_n – $n \times n$ симетричні матриці, що підлягають визначенню.

Підставимо (37) до (22). У результаті отримаємо

$$A^T \sum_{k=1}^n q_k P_k + \sum_{k=1}^n q_k P_k A + \text{diag}\{q_1, q_2, \dots, q_n\} = 0$$

або

$$\sum_{k=1}^n q_k (A^T P_k + P_k A) + \text{diag}\{q_1, q_2, \dots, q_n\} = 0.$$

З останнього співвідношення випливає, що матриці P_k задовольняють матричним рівнянням виду

$$A^T P_k + P_k A + \text{diag}\{0, 0, \dots, 1, 0, \dots\} = 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (38)$$

де одиничний елемент на діагоналі знаходиться на k -му місці, відраховуючи від верхнього лівого кута.

Тоді для будь-якого діагонального елемента p_{kk} матриці P на підставі (37) можна записати

$$p_{kk} = p_{kk}^1 q_1 + \dots + p_{kk}^n q_n, \quad (39)$$

де p_{kk}^i – k -й діагональний елемент матриці P_i . Порівнюючи (39) і (32) приходимо до висновку, що $c_{ik} = p_{kk}^i$, а величина критерію (36) може бути подана як

$$J^* = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n p_{kk}^i = \sum_{i=1}^n \text{tr} P_i.$$

Звернемо увагу на те, що замість розв'язання n рівнянь Ляпунова (38) для знаходження J^* можна обмежитись рішенням одного матричного рівняння

$$A^T P + P A + E = 0. \quad (40)$$

Справді, виберемо $q_1 = q_2 = \dots = q_n = 1$. Тоді з (37)

випливає $P = \sum_{i=1}^n P_i$ або $\sum_{i=1}^n \text{tr} P_i = \text{tr} P$. Отже,

остаточно:

$$J^* = \text{tr} P,$$

де P – розв'язок рівняння (40).

Висновки. Запропоновано та обґрунтовано низку підходів до кількісної міри стійкості однієї з фундаментальних якісних характеристик динамічних систем. В основу запропонованих підходів покладено множинну кількісну оцінку ансамблю траєкторій стійких динамічних систем, що починаються в заданій області фазового простору. Запропоновані методи досить просто реалізуються за допомогою відомих обчислювальних процедур лінійної алгебри та теорії матриць: розв'язання проблеми власних значень та розв'язання матричного рівняння Ляпунова, що є в пакеті MatLab.

Список використаної літератури

1. Ляпунов А. М. *Общая задача об устойчивости движения*. Москва: Гостехиздат, 1950. 471 с.
2. Моисеев Н. Д. Количественный аспект теории устойчивости. *Записки семинара по теории устойчивости движения*. Москва: ВВИА им. Жуковского, 1943. Вып. 1. С. 95–105.
3. Красовский А. А. *О степени устойчивости линейных систем*. Труды ВВИА им. Жуковского, 1946. Вып. 281. С. 1–22.
4. Красовский А. А. *Фазовое пространство и статическая теория динамических систем*. Москва: Наука, 1974. 232 с.
5. Куржанский А. Б. *Управление и наблюдение в условиях неопределенности*. Москва: Наука, 1977. 392 с.
6. Черноусько Ф. А. *Оценивание фазового состояния динамических систем*. Москва: Наука, 1988. 319 с.
7. Подчукаев В. А. *Быстрые алгоритмы анализа и синтеза САР*. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1986. 112 с.
8. Михайлов Ф. А., Теряев Е. Д., Булеков В. П., Саликов Л. М., Диканова Л. С. *Динамика непрерывных линейных систем с детерминированными и случайными параметрами*. Москва: Наука, 1971. 558 с.
9. Солодовников В. В., Плотников В. Н., Яковлев А. В. *Основы теории и элементы систем автоматического регулирования*. Москва: Машиностроение, 1985. 536 с.
10. Александров А. Г. *Синтез регуляторов многомерных систем*. Москва: Машиностроение, 1986. 272 с.
11. Фельдбаум А. А. *Электрические системы автоматического регулирования*. Москва: Оборонгиз, 1957. 808 с.
12. Красовский А. А., Поспелов Г. С. *Основы автоматики и технической кибернетики*. Москва; Ленинград: Госэнергоиздат, 1962. 600 с.
13. Wazewski T. *Sur la limitation des integrales systems d'equations differentielles lineares ordinaires*. *Studia Mathematica*. 1948. Vol. 10. P. 48–59.
14. Андреев Ю. Н. *Управление конечномерными линейными объектами*. Москва: Наука, 1976. 424 с.
15. Моисеев Н. Д. О некоторых методах теории технической устойчивости. Ч. 1. *Труды ВВИА им. Жуковского*. Москва: ВВИА им. Жуковского, 1945. Вып. 135. С. 86–97.
16. Зубов И. В. *Математические методы исследования систем автоматического регулирования*. Ленинград: Судпромгиз, 1959. 324 с.
17. Куценко А. С., Коваленко С. В. Об одном подходе к количественной оценке степени устойчивости динамических систем. *Системы управління, навігації та зв'язку*. Київ: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2011. Вып. 4 (20). С. 92–94.
18. Арнольд В. И. *Математические методы классической механики*. Москва: Наука, 1979. 431 с.
19. Ланкастер П. *Теория матриц*. Москва: Наука, 1973. 280 с.
20. Куценко А. С., Коваленко С. В. Количественная мера устойчивости на основе интегрального квадратичного функционала. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2012. № 29. С. 3–9.
21. Гантмахер Ф. Р. *Теория матриц*. Москва: Наука, 1967. 575 с.
22. Фихтенгольц Г. М. *Курс дифференциального и интегрального исчисления*. Москва: Книга по Требованию, 2013. Том 3. 654 с.

References (transliterated)

1. Lyapunov A. M. *Obschaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya* [The general problem of the stability of motion]. Moscow, Gostekhizdat Publ., 1950. 471 p.
2. Moiseev N. D. *Kolichestvennyiy aspekt teorii ustoychivosti* [Quantitative aspect of stability theory]. *Zapiski seminarov po teorii ustoychivosti dvizheniya* [Notes of the Seminar on the Theory of Stability of Motion]. Moscow, Zhukovskiy Air Force Engineering Academy Publ., 1943, is. 1, pp. 95–105.
3. Krasovskii A. A. *O stepeni ustoychivosti lineynykh sistem* [About the degree of stability of linear systems]. *Trudy VVIA im. Zhukovskogo* [Proc. Zhukovskiy Air Force Engineering Academy]. 1946, is. 281, pp. 1–22.
4. Krasovskii A. A. *Fazovoe prostranstvo i staticheskaya teoriya dinamicheskikh sistem* [Phase space and the static theory of dynamical systems]. Moscow, Nauka Publ., 1974. 232 p.

5. Kurzhanskii A. B. *Upravlenie i nablyudenie v usloviyah neopredelennosti* [Control and observation under uncertainty]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 392 p.
6. Chernousko F. A. *Otsenivanie fazovogo sostoyaniya dinamicheskikh sistem* [Fast algorithms for analysis and synthesis of ACS]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 319 p.
7. Podchukaev V. A. *Bystryie algoritmy analiza i sinteza SAR* [Estimation of the phase state of dynamical systems]. Saratov, Saratov University Publ., 1986. 112 p.
8. Mikhailov F. A., Teriaev E. D., Bulekov V. P., Salikov L. M., Dikanova L. S. *Dinamika nepreryvnykh lineynykh sistem s determinirovannyimi i sluchaynyimi parametrami* [Dynamics of continuous linear systems with deterministic and random parameters]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 558 p.
9. Solodovnikov V. V., Plotnikov V. N., Yakovlev A. V. *Osnovy teorii i elementy sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Fundamentals of the theory and elements of automatic adjustment systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 536 p.
10. Aleksandrov A. G. *Sintez regulyatorov mnogomernykh sistem* [Synthesis of multidimensional system regulators]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 272 p.
11. Feldbaum A. A. *Elektricheskie sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya* [Electrical automatic control system]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1957. 808 p.
12. Krasovskii A. A., Pospelov G. S. *Osnovy avtomatiki i tekhnicheskoy kibernetiki* [Basics of automation and technical cybernetics]. Moscow-Leningrad, Oboroniz Publ., 1962. 600 p.
13. Wazewski T. Sur la limitation des integrales systems d'equations differentielles lineaires ordinaires. *Studia Mathematica*. 1948, vol. 10, pp. 48–59.
14. Andreev Yu. N. *Upravlenie konechnomernyimi lineynymi ob'ektami* [Control of finite-dimensional linear objects]. Moscow, Nauka Publ., 1976. 424 p.
15. Moiseev N. D. O nekotorykh metodah teorii tekhnicheskoy ustoychivosti. Ch. 1 [On some methods of the theory of technical stability Part 1]. *Trudy VVIA im. Zhukovskogo* [Proc. Zhukovsky Air Force Engineering Academy]. 1945, is. 281, pp. 86–97.
16. Zubov I. V. *Matematicheskie metody issledovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [Mathematical methods of automatic control systems research]. Leningrad, Sudpromgiz Publ., 1959. 324 p.
17. Kutsenko A. S. Kovalenko S. V. Ob odnom podhode k kolichestvennoy otsenke stepeni ustoychivosti dinamicheskikh sistem [On one approach to quantitative estimation of the degree of dynamic systems stability]. *Sistemy upravlinnya, navigatsiyi ta zv'yazku* [Control, Navigation and Communication Systems]. Kyiv, Tsentralniy naukovo-doslidniy institut navigatsiyi i upravlinnya Publ., 2011, is. 4 (20), pp. 92–94.
18. Arnold V. I. *Matematicheskie metody klassicheskoy mekhaniki* [Mathematical methods of classical mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 431 p.
19. Lancaster P. *Teoriya matrits* [Matrixes theory]. Moscow, Nauka Publ., 1973. 280 p.
20. Kutsenko A. S. Kovalenko S. V. Kolichestvennaya mera ustoychivosti na osnove integralnogo kvadratichnogo funktsionala [Quantitative measure of stability based on integral quadratic functional]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, control and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2012, no. 29, pp. 3–9.
21. Gantmakher F. R. *Teoriya matrits* [Matrixes theory]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 575 p.
22. Fikhtengolts G. M. *Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya. Tom 3* [Course of differential and integral calculus. Vol. 3]. Moscow, Kniga po Trebovaniyu Publ., 2013. 654 p.

Hadziuuna (received) 05.02.2024

UDC 681.5

O. S. KUTSENKO, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: Oleksandr.Kutsenko@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6059-3694>

M. I. BEZMENOV, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies, Kharkiv, Ukraine; e-mail: Mykola.Bezmenov@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2995-2350>

S. V. KOVALENKO, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies, Kharkiv, Ukraine; e-mail: Serhii.Kovalenko@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8763-0862>

TWO APPROACHES TO THE FORMATION OF A QUANTITATIVE MEASURE OF STABILITY BASED ON MULTIPLE ESTIMATES OF THE PARAMETERS OF AN ENSEMBLE OF TRANSIENT PROCESSES

The article is devoted to the further development of the theory of stability of dynamic systems, namely of quantitative methods of stability assessment. A review and critical analysis of various approaches, which allow to introduce a quantitative measure of stability of dynamic systems to one degree or another, is given. The limitations of the existing methods, which are primarily related to the assessment of the behavior of the transient processes of individual trajectories, as well as the difficulty of obtaining an assessment of the behavior of the ensemble of transient processes when trying to apply the methods of N. D. Moiseyev, are substantiated. A method of quantitative assessment of a dynamic system stability based on the numerical estimates of the behavior of the area of initial deviations from the equilibrium position on the trajectories of the dynamic system is substantiated. Based on the Liouville formula, it is shown that changes in the volume of the area of the initial deviations on the trajectories of the system does not depend on the form of the latter one. This allowed to limit the area of initial deviations in the shape of a hypersphere and to obtain a simple expression for a quantitative measure of the stability of a linear stationary dynamic system, the geometric sense of which is to estimate the rate of change of the volume of the control surface. The article proposes and substantiates the criterion of uniformity of deformation of the area of initial deviations. The essence of the problem is that in the transient process, the values of some components of the phase vector may reach unacceptable deviations from the equilibrium position. A theoretical estimate of deformation non-uniformity for linear systems is obtained, which is taken to be the deviation of the trace of the ellipsoid matrix from the deviations of the trace of the hypersphere matrix of the corresponding volume. A method for a quantitative measure of the stability based on an integral quadratic functional calculated on a set of transient processes of initial deviations in the form of a set of ellipsoids with a normalized volume is proposed and substantiated. Diagonal positive normalized matrices are considered as a set of matrices of the integral quadratic criterion. A simple algorithm for calculation of the multiple integral quadratic criterion is proposed.

Keywords: stability, technical stability, deviational ellipsoid, equilibrium position, integral quadratic functional, transient process.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Куценко Олександр Сергійович / Kutsenko Oleksandr Serhiyovych

Автор 2 / Author 2: Безменов Микола Іванович / Bezmenov Mykola Ivanovych

Автор 3 / Author 3: Коваленко Сергій Володимирович / Kovalenko Serhii Volodimirovych

МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.05

UDC 004.94

A. M. KOPP, Doctor of Philosophy (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of Software Engineering and Management Intelligent Technologies Department, Kharkiv, Ukraine, e mail: andrii.kopp@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

D. L. ORLOVSKYI, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e mail: dmytro.orlovskiy@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8261-2988>

O. S. KIZILOV, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Assistant at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e mail: olexiy.kizilov@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1151-3619>

O. S. HALATOVA, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Assistant at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e mail: olha.halatova@kphi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5091-1666>

RESEARCH ON ERROR PROBABILITY ASSESSMENT IN USER PERSONAL DATA PROCESSING IN GDPR-COMPLIANT BUSINESS PROCESS MODELS

The only right strategy for businesses and government organizations in Ukraine and other countries that may face aggression is to recognize themselves as a potential target for cyberattacks by the aggressor (both by its government agencies and related cybercriminal groups) and take appropriate measures in accordance with the European Union's General Data Protection Regulation (GDPR). The main purpose of the GDPR is to regulate the rights to personal data protection and to protect EU citizens from data leaks and breaches of confidentiality, which is especially important in today's digital world, where the processing and exchange of personal data are integral parts of almost every business process. Therefore, the GDPR encourages organizations to transform their day-to-day business processes that are involved in managing, storing, and sharing customers' personal data during execution. Thus, business process models created in accordance with the GDPR regulations must be of high quality, just like any other business process models, and the probability of errors in them must be minimal. This is especially important with regard to the observance of human rights to personal data protection, since low-quality models can become sources of errors, which, in turn, can lead to a breach of confidentiality and data leakage of business process participants. This paper analyzes recent research and publications, proposes a method for analyzing business process models that ensure compliance with the GDPR regulations, and tests its performance based on the analysis of BPMN models of business processes for obtaining consent to data processing and withdrawal of consent to user data processing. As a result, the probability of errors in the considered business process models was obtained, which suggests the possibility of confidentiality violations and data leaks of the participants of the considered business processes associated with these errors, and appropriate recommendations were made.

Keywords: business process GDPR compliance, personal data leakage prevention, BPMN business process model analysis, business process model error probability analysis, personal data protection in business processes.

Introduction. According to the authors of the material [1], offline conflicts quickly spill over into the online world. Therefore, in addition to state actors, cyberattacks are also carried out by anonymous criminal groups that can take sides. In this situation, aggressors often rely on chaos, supporting or turning a blind eye to the activities of cybercriminals in their own countries. Even if ransomware and blackmail attacks were intended to affect only special targets, such as certain government organizations, experience shows that business representatives, including international ones, are also victims of malware attacks.

For example, during the large-scale hacker attacks on Ukraine in 2017, 7 banks and about 40 Ukrainian and

international companies suffered from cybercriminals' actions [2], including DTEK, Nova Poshta, FedEx, Rozetka, WOG, and others. According to an analytical report by Microsoft [3], since the beginning of the full-scale war, on February 24, 2022, 237 cyberattacks have been carried out on Ukrainian government agencies and enterprises.

Thus, according to the proposal set out in [1], the only correct strategy for enterprises and government organizations in Ukraine and other countries that may face aggression is to recognize themselves as a potential target for cyberattacks by the aggressor (both by its government agencies and related cybercriminal groups) and take appropriate measures in accordance with the General Data

© Kopp A. M., Orlovskiy D. L., Kizilov O. S., Halatova O.S., 2024



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under an international license [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



Protection Regulation of the European Union (GDPR) [4]. According to this regulation, institutions are obliged to introduce appropriate technical and organizational measures to prevent data leaks and potential violations of customer privacy [1]. Also, according to [1], in many cases, cybercriminals use the same methods during war as in peacetime. For example, attackers will look for vulnerabilities in an organization's system, including known vulnerabilities (the so-called "exploits") in "everyday" software that have not been patched by its developers [1]. In addition, in order to increase the number of malware victims, attackers may also target infrastructure providers [1].

The GDPR plays an important role in the European Union (EU) legislation on privacy and human rights, which is, in particular, defined in Article 8(1) of the Charter of Fundamental Rights of the European Union [5]. The main purpose of the GDPR is to regulate the rights to personal data protection and to protect EU citizens from data leaks and violations of their confidentiality, which is especially important in today's digital world, where the processing and exchange of personal data are integral components of almost every business process [6]. Thus, the GDPR encourages organizations to transform their daily business processes involved in managing, storing, and exchanging customers' personal data during execution [6]. In 2022, after the outbreak of a full-scale war, Ukraine became an EU candidate state, so it is obvious that European integration will be a priority for Ukraine now and during the post-war recovery, and Ukrainian enterprises and institutions already need to build business processes in accordance with the GDPR regulations in order to ensure the privacy of their users and prevent leakage of their personal data.

Related work. The general overview of the recent papers related to EA frameworks indexed in the Google Scholar platform shows the stable interest in EA frameworks, especially defense-oriented ones, over the last five years (see fig. 1).

First, the authors of [6], mentioned above, analyzed the main restrictions of the GDPR on privacy and personal data and proposed a set of business process design templates to take into account and integrate these restrictions into business process models in the BPMN (Business Process Model and Notation) notation [6].

The authors of another work [7] also note that organizations need to implement mechanisms to ensure the security of personal data in business processes in order to avoid liability in the event of an attack by intruders that may lead to data leakage and in accordance with the law, in particular, the GDPR [7]. Therefore, the study [7] proposes to implement compliance with the GDPR regulations by performing security processes based on cloud services, which will allow organizations that do not have the necessary security competencies to use cloud service providers as trusted third parties during GDPR compliance checks or after a data breach [7]. For this purpose, the authors of [7] developed appropriate BPMN models of business processes for their further implementation in the cloud environment [7].

Work [8] also addresses the issues of verification of business processes represented using the BPMN notation in order to detect violations of privacy rules and prevent potential violations of the GDPR [8].

In one of the most recent studies in this area [9], the authors note the need to check the compliance of business process scenarios with the GDPR regulations at the stage of their modeling [9]. Thus, the authors of [9] propose an approach to bringing BPMN models of business processes in line with the GDPR requirements for consent requests and withdrawal of consent to data processing [9].

State-of-the-art. Although the publications under review consider design templates for BPMN business process models [6] and BPMN scenarios for consent requests and withdrawal of consent to data processing [9], as well as approaches to the implementation of business processes in the cloud environment [7] and verification of BPMN models in terms of their compliance with the GDPR [8], insufficient attention is paid to the quality of all proposed BPMN business process models.

Business process modeling is the main tool of the process approach to organizational management. Business process models are used to depict (in the form of graphical diagrams), analyze, and further improve business processes [10]. Most often, business process models are used in the design and analysis of information systems, being a mechanism for communication between business and technical parties [11].

Thus, business process models created in accordance with the GDPR must be of high quality, just like any other business process models, and the probability of errors in them must be minimal. This is especially important in terms of observing human rights to personal data protection, as low-quality models can become sources of errors, which, in turn, can lead to a breach of confidentiality and data leakage of business process participants.

Problem statement. The object of research is the procedure for analyzing business process models that ensure compliance with the GDPR regulations. The subject of the study is a method of analyzing business process models that ensure compliance with the GDPR regulations.

The purpose of the study is to prevent privacy violations and data leaks of business process participants by analyzing the relevant models that ensure compliance with the GDPR regulations. Thus, in order to achieve the goal, the following tasks need to be solved:

- to develop a method for analyzing business process models for the probability of errors, including those related to personal data;
- to test the efficiency of the developed method by analyzing business process models that ensure compliance with the GDPR;
- to determine the probabilities of confidentiality violations and data leaks of business process participants, and to formulate appropriate recommendations.

Materials. A business process model presented using the BPMN notation can be formally represented using an oriented graph:

$$G = (N, A), \quad (1)$$

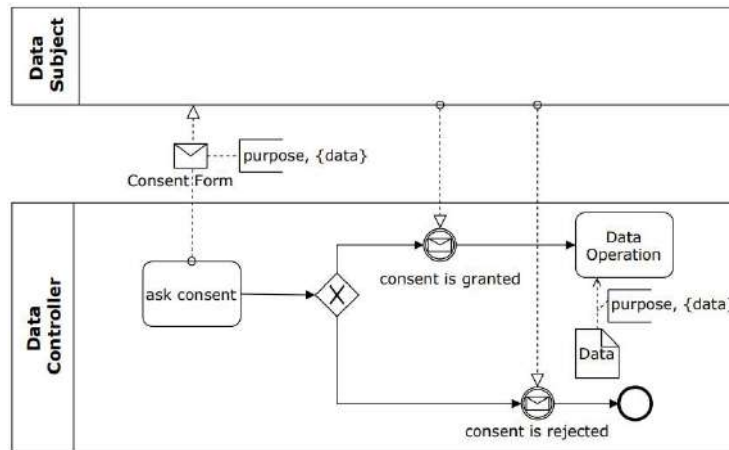


Fig. 1. BPMN model for obtaining consent to data processing [9]

where:

- N is the set of nodes – various elements of the business process model: actions (tasks and sub-processes), events (start, intermediate, end), and logical gateways;
- A is the set of arcs – flows in the business process execution sequence (sequence flows).

According to the results of a study on the probability of errors in the structure of a business process model [12], the following metrics can be determined based on the basic graph structural metrics (1) of the business process model – the number of nodes $|N|$ and the number of arcs $|A|$:

$$\Delta(G) = \frac{|A|}{|N| \cdot (|N| - 1)}, \text{CNC}(G) = \frac{|A|}{|N|}, \quad (2)$$

where:

- $\Delta(G)$ is the density metric of a business process model;
- $\text{CNC}(G)$ is the connectivity metric (Coefficient of Network Connectivity, CNC) of a business process model.

The specified density and connectivity metrics (2) have the following thresholds, the excess of which will indicate the corresponding probability of the presence of structural errors in the business process model [12]:

$$P(\Delta(G)) = \begin{cases} 0.16, & \Delta(G) \leq 0.033, \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (3)$$

$$P(\text{CNC}(G)) = \begin{cases} 0.08, & \text{CNC}(G) \leq 1.021, \\ 0, & \text{else,} \end{cases}$$

where:

- $P(\Delta(G))$ is the probability of structural errors in the model (16%) if the metric $\Delta(G)$ exceeds the established threshold value (0.033);
- $P(\text{CNC}(G))$ is the probability of structural errors in the model (8%) if the $\text{CNC}(G)$ metric exceeds the established threshold value (1.021).

Thus, by determining the probabilities (3), it will be possible to determine the probability of errors in the BPMN business process model as a whole:

$$P(\Delta(G), \text{CNC}(G)) = 1 - [1 - P(\Delta(G))] \cdot [1 - P(\text{CNC}(G))] \quad (4)$$

According to (4), it is proposed to calculate the inverse probabilities of (3), i.e., the non-detection of errors in the business process model, and then, according to the rule of the product of independent events, to determine the probability of non-detection of errors by at least one of the metrics (2) and, finally, to determine the inverse probability of detecting errors by at least one of the metrics (2).

It is proposed to verify the effectiveness of the proposed method by analyzing the models of business processes for obtaining consent and withdrawing consent to data processing that ensure compliance with the GDPR regulations, as defined in the study [9].

Accordingly, the BPMN model of the business process for obtaining consent (OC) to data processing is demonstrated in fig. 1.

Another business process of withdrawing consent (WC) to data processing is demonstrated using a BPMN model in fig. 2.

Table 1 shows the results of calculating the main structural characteristics (1), as well as the density and connectivity metrics (2) of the models of business processes for obtaining consent (fig. 1) and withdrawing consent to data processing (fig. 2), obtained using the proposed method.

Table 1 – Results of business process model metrics calculation

| Model | $ N $ | $ A $ | $\Delta(G)$ | $\text{CNC}(G)$ |
|-------|-------|-------|-------------|-----------------|
| OC | 6 | 5 | 0.17 | 0.83 |
| WC | 2 | 1 | 0.5 | 0.5 |

It should be noted that the calculations did not take into account the scenario nested in the “handle revocation” action (fig. 2).

Table 2 shows the probabilities of errors in business process models, determined on the basis of compliance of the calculated values of the model metrics (table 1) with their thresholds [12].

Based on the results shown in table 2, it can be determined that the data of the business process models for obtaining consent (fig. 1) and withdrawing consent to data processing (fig. 2) both contain errors with a probability of 16%. Therefore, it can be assumed that the probability of confidentiality violations and/or data leaks of participants

in these business processes due to errors in BPMN models is also close to 16%.

Table 2 – Compliance of the calculated metrics with their thresholds

| Model | $P(\Delta(G))$ | $P(CNC(G))$ | $P(\Delta(G), CNC(G))$ |
|-------|----------------|-------------|------------------------|
| OC | 0.16 | 0 | 0.16 |
| WC | 0.16 | 0 | 0.16 |

The obtained probability values (table 2) indicate the need to correct errors in the analyzed business process models. These errors were identified and listed below.

For the OC business process model:

- there is no start event – it is not clear when the business process starts;
- it is not clear what leads to the execution of the “ask consent” action, which starts the business process;
- the execution of the “Data Operation” action does not lead to the completion of the process or the next action – it is not clear how the business process should be completed or continued;
- there is no end event for the scenario when consent has been obtained – it is not clear when the business process ends in this case.

For the WC business process model:

- there is no start event – it is not clear when the business process starts;
- it is not clear what leads to the execution of the “Data Operations” action, which starts the business process;
- execution of the “handle revocation” action does not lead to the completion of the process or the next action – it is not clear how the business process should be completed or continued.

Thus, we have demonstrated the errors identified in business process models that ensure compliance with the GDPR. If these models are used to adapt the organization’s business processes to the GDPR requirements, the identified errors (table 3) should be eliminated to reduce the probability of negative consequences for data.

Thus, it is recommended that all business process models be checked for possible errors in them in order to

ensure the confidentiality of business process participants and prevent leakage of their personal data.

Conclusion. This paper analyzes recent research and publications, proposes a method for analyzing business process models that ensure compliance with the GDPR regulations, and tests its performance based on the analysis of BPMN models of business processes for obtaining consent to data processing and withdrawal of consent to user data processing. As a result, the probability of errors in the considered business process models was obtained, which suggests the possibility of confidentiality violations and data leaks of the participants of the considered business processes related to these errors, and appropriate recommendations were made. It is planned to develop a web application that will help Ukrainian enterprises and institutions check BPMN models for possible errors in them in order to prevent data leaks and other negative consequences.

References

1. *Client Alert: The Effects of War on Cyber Security & GDPR*. URL: <https://www.corderycompliance.com/war-effects-on-cybersecurity/> (access date: 25.04.2024).
2. *Unknown Virus Attacks Dozens Of Ukrainian Companies*. URL: <https://hromadske.ua/en/posts/unknown-virus-attacks-ukraines-state-banks-and-enterprizes> (access date: 25.04.2024).
3. *An overview of Russia’s cyberattack activity in Ukraine*. URL: <https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RE4Vw wd> (access date: 25.04.2024).
4. *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the protection of individuals with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data (General Data Protection Regulation)*. URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9565-2015-INIT/en/pdf> (access date: 25.04.2024).
5. *How to access your personal data under the GDPR*. URL: https://www.citizensinformation.ie/en/government_in_ireland/data_protection/rights_under_general_data_protection_regulation.html (access date: 25.04.2024).
6. Agostinelli S. et al. *Achieving GDPR compliance of BPMN process models*. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21297-1_2 (access date: 25.04.2024).
7. Bryce C. *Security Governance as a Service on the Cloud*. URL: <https://doi.org/10.1186/s13677-019-0148-5> (access date: 25.04.2024).
8. Palmirani M., Governatori G. *Modelling Legal Knowledge for GDPR Compliance Checking*. URL: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-935-5-101> (access date: 25.04.2024).

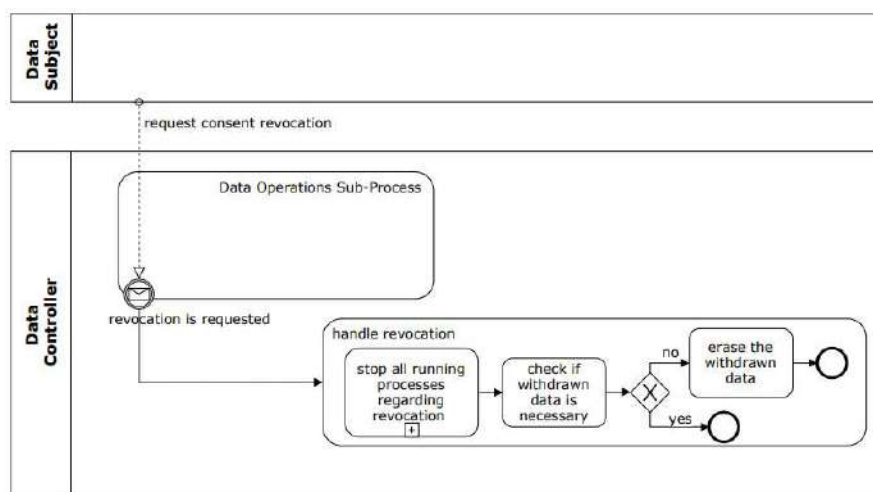


Fig. 2. BPMN model for withdrawing consent to data processing [9]

9. Besik S. I., Freytag J. C. *Managing Consent in Workflows under GDPR*. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2575/paper4.pdf> (access date: 25.04.2024).
10. Van der Aalst W. M. *Business process management: a comprehensive survey*. URL: <https://doi.org/10.1155/2013/507984> (access date: 25.04.2024).
11. Kahloun F., Ghannouchi S. A. *A Classification Algorithm for Assessing the Quality Criteria for Business Process Models*. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-76351-4_8 (access date: 25.04.2024).
12. Mendling J., Sánchez-González L., García F., La Rosa M. *Thresholds for error probability measures of business process models*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2012.01.017> (access date: 25.04.2024).
5. *How to access your personal data under the GDPR*. Available at: https://www.citizensinformation.ie/en/government_in_ireland/data_protection/rights_under_general_data_protection_regulation.html (accessed 25.04.2024).
6. Agostinelli S. et al. *Achieving GDPR compliance of BPMN process models*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21297-1_2 (accessed 25.04.2024).
7. Bryce C. *Security Governance as a Service on the Cloud*. Available at: <https://doi.org/10.1186/s13677-019-0148-5> (accessed 25.04.2024).
8. Palmirani M., Governatori G. *Modelling Legal Knowledge for GDPR Compliance Checking*. Available at: <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-935-5-101> (accessed 25.04.2024).

References (transliterated)

1. *Client Alert: The Effects of War on Cyber Security & GDPR*. Available at: <https://www.corderycompliance.com/war-effects-on-cybersecurity/> (accessed 25.04.2024).
2. *Unknown Virus Attacks Dozens Of Ukrainian Companies*. Available at: <https://hromadske.ua/en/posts/unknown-virus-attacks-ukraines-state-banks-and-enterprises> (accessed 25.04.2024).
3. *An overview of Russia's cyberattack activity in Ukraine*. Available at: <https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RE4Vw wd> (accessed 25.04.2024).
4. *Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council on the protection of individuals with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data (General Data Protection Regulation)*. Available at: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-9565-2015-INIT/en/pdf> (accessed 25.04.2024).
9. Besik S. I., Freytag J. C. *Managing Consent in Workflows under GDPR*. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2575/paper4.pdf> (accessed 25.04.2024).
10. Van der Aalst W. M. *Business process management: a comprehensive survey*. Available at: <https://doi.org/10.1155/2013/507984> (accessed 25.04.2024).
11. Kahloun F., Ghannouchi S. A. *A Classification Algorithm for Assessing the Quality Criteria for Business Process Models*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-76351-4_8 (accessed 25.04.2024).
12. Mendling J., Sánchez-González L., García F., La Rosa M. *Thresholds for error probability measures of business process models*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2012.01.017> (accessed 25.04.2024).

Received 05.04.2024

УДК 004.94

А. М. КОПП, доктор філософії (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: andrii.kopp@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: dmytro.orlovskiy@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8261-2988>

О. С. КІЗІЛОВ, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: olexiy.kizilov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1151-3619>

О. С. ГАЛАТОВА, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: olha.halatova@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5091-1666>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ОЦІНКИ ЙМОВІРНОСТІ ПОМИЛОК ПРИ ОБРОБЦІ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДАНИХ КОРИСТУВАЧІВ МОДЕЛЕЙ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ GDPR

Єдиною вірною стратегією для підприємств та державних організацій України та інших країн, що можуть зіткнутися з агресією, є усвідомлювати себе потенційною мішенню для кібератак агресора (як з боку його державних структур, так і з боку пов'язаних кіберзлочинних груп), та вживати відповідних заходів відповідно до Загального регламенту про захист даних Європейського Союзу (General Data Protection Regulation, GDPR). Основною метою GDPR є регулювання прав на захист персональних даних та реалізація захисту громадян ЄС від витоків даних та порушень їх конфіденційності, що особливо актуально в цифровому світі сьогодення, де обробка та обмін персональними даними є невід'ємними складовими майже кожного бізнес-процесу. Таким чином, GDPR спонукає організації до перетворення своїх повсякденних бізнес-процесів, які залучені до управління персональними даними клієнтів, їх зберігання та обміну під час виконання. Таким чином, моделі бізнес-процесів, що створюються у відповідності до регламенту GDPR, мають бути високої якості так само, як і будь-які інші моделі бізнес-процесів, а ймовірність наявності у них помилок має бути мінімальною. Це особливо важливо щодо дотримання прав людини на захист персональних даних, оскільки моделі низької якості можуть стати джерелами помилок, які, у свою чергу, можуть призвести до порушення конфіденційності та витоку даних учасників бізнес-процесів. У роботі здійснено аналіз останніх досліджень і публікацій, запропоновано метод аналізу моделей бізнес-процесів, що забезпечують відповідність регламенту GDPR, перевірено його працездатність на основі аналізу BPMN-моделей бізнес-процесів отримання згоди на обробку даних та відкликання згоди на обробку даних користувачів. У результаті було отримано ймовірність виникнення помилок у розглянутих моделях бізнес-процесів, що дозволяє припустити про можливість виникнення пов'язаних з цими помилками порушень конфіденційності та витоків даних учасників розглянутих бізнес-процесів, сформовано відповідні рекомендації.

Ключові слова: відповідність бізнес-процесів GDPR, запобігання витоку персональних даних, аналіз BPMN-моделей бізнес-процесів, аналіз ймовірності помилок у моделях бізнес-процесів, захист персональних даних у бізнес-процесах.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Копп Андрій Михайлович / Kopp Andrii Mykhailovych

Автор 2 / Author 2: Орловський Дмитро Леонідович / Orlovskiy Dmytro Leonidovych

Автор 3 / Author 3: Кізілов Олексій Сергійович / Kizilov Oleksii Serhiiovych

Автор 4 / Author 4: Галатова Ольга Сергіївна / Halatova Olha Serhiivna

A. M. KOPP, Doctor of Philosophy (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of Software Engineering and Management Intelligent Technologies Department, Kharkiv, Ukraine, e mail: andrii.kopp@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

D. L. ORLOVSKYI, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e mail: dmytro.orlovskiy@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8261-2988>

U. S. LITVINOVA, Candidate of Technical Sciences (PhD), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies, Kharkiv, Ukraine, e mail: uliya.litvinova@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6680-662X>

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF SOFTWARE SOLUTION FOR BUSINESS PROCESS MODEL CORRECTNESS ANALYSIS USING MACHINE LEARNING

Poorly designed business process models are a source of errors and the subsequent costs associated with these errors, such as monetary costs, lost time, or even some harmful impact on people or the environment if the erroneous business process models are associated with critical industries. The BPM (Business Process Management) lifecycle usually consists of designing, implementing, monitoring, and controlling the business process execution, but it lacks continuous quality control of the created BPMN (Business Process Model and Notation) models. Thus, this paper considers the problem of business process models classification based on their correctness, which solution will ensure quality control of the designed business process models. Thus, this study aims to improve the quality of business process models by developing a software solution for business process models classification based on their correctness. The subject of the study is the process of business process models classification based on their correctness, which uses quality measures and thresholds, usually, complexity measures. The subject of the study is a software solution for business process models classification based on their correctness. Therefore, in this study, the algorithm to solve the problem of BPMN models classification using logistic regression, interface complexity, and modularity measures is proposed, the software requirements are determined, the software development tools are selected, the software for business process models classification based on their correctness is designed, the corresponding software components are developed, the use of a software solution for solving the problem of business process models classification based on their correctness is demonstrated, the obtained results are analyzed and discussed. The developed software indicates high performance of BPMN models classification based on their correctness, achieving high accuracy (99.14 %), precision (99.88 %), recall (99.23 %), and F-score (99.56 %), highlighting the high performance of modeling errors detection.

Keywords: business process modeling, model quality, complexity measures, machine learning, logistic regression, software solution.

Introduction. A business process is a sequence of actions performed within an organization to achieve a specific goal or result. There are several definitions of a business process:

- a business process is a sequence of interrelated actions performed to achieve a specific goal within an organization [1];
- a business process is a sequence of interrelated actions and decisions performed to achieve a specific goal within an organization [2];
- a business process is a sequence of actions performed within an organization to create, produce, or deliver a product or service [3].

Business Process Management (BPM) is an approach that combines management and Information Technology (IT) methodologies to achieve operational excellence in an organization. The primary approach of BPM is business process modeling, which facilitates communication and interaction between business users and IT providers responsible for designing, implementing, and maintaining information systems in the organization [4].

Business process modeling is the graphical representation of the sequence of actions and interdependencies that occur within an organization. It is a critical component of BPM that helps ensure interaction between business and IT users responsible for developing and maintaining information systems in the enterprise. Business process models are used to gather requirements for supporting software systems and to identify and optimize bottlenecks

in business operations. Information about business process models can be used for training new employees and for internal quality control in the organization [5].

Business process models are used in BPM to document business processes and define requirements for supporting information systems. As a result, poor quality business process models can make them difficult to understand and maintain, potentially leading to errors that increase time and cost [5].

In addition, poorly developed business process models can reflect inefficiencies in real-world processes. As a result, the quality of created business process models must be carefully controlled to detect and prevent errors at the design stage before they become real errors in the organization's business processes and supporting IT systems, which can lead to unanticipated time and cost expenditures, or even dangerous impacts on people and the environment in critical sectors [5].

Thus, the goal of this work is to improve the quality of business process models by developing a software solution for business process models classification based on their correctness.

The subject of the study is the process of business process models classification based on their correctness.

The subject of the study is a software solution for business process models classification based on their correctness.

Related work. Today, the most widely used notation for modeling business processes is the Business Process

© Kopp A. M., Orlovskiy D. L., Litvinova U. S., 2024



Research Article: This article was published by the publishing house of NTU "KhPI" in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under an international license [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



Model and Notation (BPMN), which is also an Object Management Group (OMG) standard [6].

The Business Process Model and Notation (BPMN) is a standard for modeling business processes that provides a graphical notation for specifying business processes on a Business Process Diagram (BPD) based on traditional flowcharting methods. BPMN aims to support business process modeling for both technical and business users by providing a notation that is intuitive to business users and capable of representing the complex semantics of processes. The BPMN 2.0 specification also provides execution semantics and alignment between the graphical notation and other execution languages, including the Business Process Execution Language (BPEL) [7].

The BPMN notation is designed to be understood by all business stakeholders, including business analysts who create and refine processes, technical developers who implement them, and business managers who monitor and control them. In this way, BPMN serves as a common language that bridges the communication gap that often exists between business and IT domains [7].

Flow objects are the most commonly used elements in BPMN business process models, consisting of events, tasks, and gateways [8]:

- Events represent occurrences that happen during a process and change its flow. Events could be receiving a message, encountering an error, or reaching a certain point in time. In culinary terms, events can be state changes (bubbling butter or translucent onions) or time-based triggers (flipping wings after 15 minutes) [8];
- any work performed within a business process, Task, or Sub-process can be considered an Activity, with the most common being tasks [8];
- gateways are used to control the flow of processes, but do not represent work performed. For example, an AND gateway indicates that multiple paths can be selected simultaneously, an XOR gateway indicates that only one of the following paths can be selected, while an OR gateway indicates that one or more paths can be selected [8].

Data Objects represent information flowing through the process, such as reports, emails, or other business documents. Some process activities may require input data before they can be executed [8].

Connecting objects are used to connect flow objects. Solid lines represent Sequence Flows, dashed lines represent Message Flows, and dotted lines represent Associations [8]. Data Associations are used to move data between data objects and between task and process inputs and outputs [8].

Pools and Lanes define the boundaries of the process and its participants. Pools typically represent different organizations, while Lanes divide structures within a single organization. However, there are no hard and fast rules for assigning Pools and Lanes, as this depends on the specific purpose of the business process model [8].

An example of the main elements of the BPMN standard is demonstrated in fig. 1 [9].

In their study [10], the authors emphasize the detrimental effects that high complexity in business process models can have on their quality. Therefore, they advocate

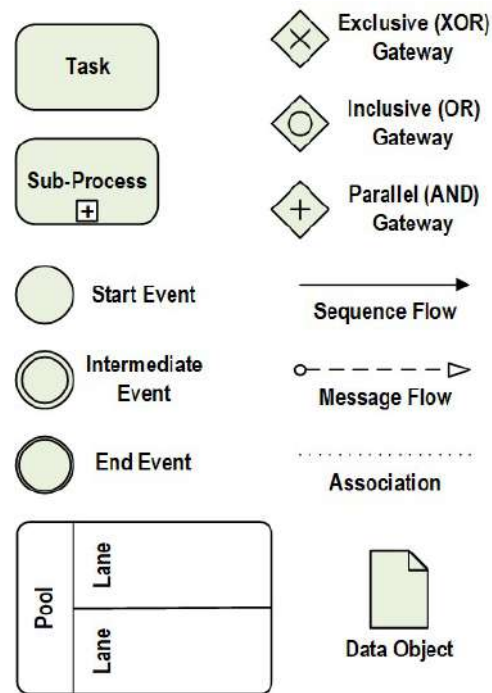


Fig. 1. Basic elements of the BPMN standard [9]

the use of specific complexity measures originated from software engineering [10].

1. Interface Complexity (IC):

$$IC = length \cdot \left[\sum_{n \in N} fan - in(n) + \sum_{n \in N} fan - out(n) \right]^2, \quad (1)$$

where:

- *length* is the coefficient equal to 1 for tasks and 3 for sub-processes;
- *n* is the business process element, $n \in N$;
- $fan - in(n)$ is the number of input control flows of the element, $n \in N$;
- $fan - out(n)$ is the number of output control flows of the element, $n \in N$.

2. Modularity (M):

$$M = \sum_{n \in N} [fan - in(n) \cdot fan - out(n)]^2. \quad (2)$$

In their work [11], the authors identify complexity as a critical quality attribute of business process models that reflects their comprehensibility and maintainability. They define model complexity as the degree to which a model has a structure that is complicated and difficult to understand and analyze [11].

Consequently, the considered problem includes the classification of business process models with respect to their correctness based on the considered complexity measures IC and M, identified as fundamental quality characteristics of business process models.

Methods. Let us review existing methods that can be used to classify business process models for correctness.

Classification algorithms are a class of supervised machine learning methods used to predict or classify data into different classes or categories based on a set of input features. The goal of a classification algorithm is to train a model that can accurately predict the class labels of new, unseen instances based on patterns found in the training data [12].

This type of algorithm is widely used in various fields, including healthcare, finance, and marketing, as well as in applications such as customer churn modeling, email spam filtering, image classification, and many more [12].

Here are some of the most common classification algorithms [13]:

- logistic regression is a statistical technique used to analyze the relationship between a dependent variable and one or more independent variables, it is used to predict the probability of a particular outcome based on input data;
- Support Vector Machine (SVM) is a powerful classification algorithm that can be used for both linear and nonlinear classification, it works by finding the best boundary between different classes in the input data;
- Naive Bayes is the algorithm based on Bayes theorem, it assumes that the input features are independent of each other, it is often used for text classification;
- K-Nearest Neighbors (KNN) is a nonparametric algorithm that classifies new data points based on their proximity to the nearest neighbors in the training data;
- decision trees propose a simple but effective method of classification, they are easy to interpret and understand, and can be used to create rules that can be applied to new data;
- random forest is a popular ensemble learning algorithm that combines multiple decision trees to create a more accurate model, it works by generating a large number of decision trees, each of which makes a prediction about the input data.

Classification algorithms are a critical component of modern machine learning systems. The choice of algorithm depends on the specific task at hand, the nature of the data, and the computational resources available. By selecting and tuning the right classification algorithm, we can create powerful predictive models that automate many tasks and provide valuable recommendations [12].

Since business process models classification based on their correctness involves predicting the probability of errors in them, the logistic regression algorithm can be used for classification tasks in this work.

Let us define classification tasks where the independent variables are continuous in nature and the dependent variable takes a categorical form, such as classes like positive and negative. Real-world examples of classification include emails as spam classification, tumors as malignant or benign, and transactions as fraudulent or genuine. The answers to all of these questions are categorical, either “yes” or “no”, making them binary classification tasks [14].

Logistic regression uses a sigmoid or logistic function. An explanation of logistic regression can begin with an explanation of the standard logistic function. A logistic function is a sigmoid function that takes any real value between zero and one.

The logistic (sigmoid) function is defined as [14]:

$$\sigma(t) = \frac{e^t}{e^t + 1} = \frac{1}{1 + e^{-t}}. \quad (3)$$

Plotting a graph of a sigmoidal function will result in an S-shaped curve, an example of which is demonstrated in fig. 2 [15].

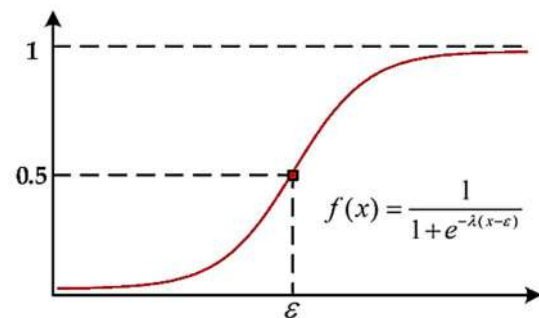


Fig. 2. Graph of the sigmoid function [15]

On the y-axis, the s-shape changes from 0 to 1, which is the probability of an output (fig. 2). For example, assuming that the probability of errors in a business process model is predicted, 1 means that the model is 100 % erroneous based on logistic regression, while 0 means that there is no reason to believe that the business process model is error-prone [15].

For example, let us consider a linear function in a one-dimensional regression model [14]:

$$t = \beta_0 + \beta_1 \cdot x, \quad (4)$$

where:

- x is the independent variable;
- β_0 and β_1 are the logistic regression coefficients.

Thus, the logistic equation that allows predicting the probability of a certain outcome based on the input data will take the following form [14]:

$$p(x) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \cdot x)}}. \quad (5)$$

Now, when the logistic regression model encounters an outlier, the logistic equation will not allow to obtain values less than 0 or greater than 1 [14].

Features in a dataset often have different scales, measurement units, or ranges. If features are not scaled, those with larger scales can dominate the learning process and introduce errors. By scaling features, we ensure that they contribute equally to the analysis and prevent any particular feature from exerting undue influence [16].

Feature scaling, also known as normalization or data standardization, is a method used in machine learning and data preprocessing to bring different features of a dataset to the same scale. The goal of scaling is to ensure an equal contribution of all features to the learning process and to prevent the dominance of any particular feature or bias in the results [16].

Normalization, also known as Min-Max scaling, is a common technique used in machine learning to normalize feature values within a certain range [16].

The goal of normalization is to transform features so that they all have values in the same scale, usually between 0 and 1 [16]:

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}. \quad (6)$$

Standardization is a common technique used in machine learning to normalize data. It transforms the data so that it has zero mean and unit variance. This process causes the data to follow a standard normal distribution, where the mean is 0 and the standard deviation is 1 [16]:

$$x' = \frac{x - \bar{x}}{\sigma}, \quad (7)$$

where:

- \bar{x} is the mean value;
- σ is the standard deviation.

There is no clear rule for choosing an input scaling function for a machine learning model. However, in classification tasks based on logistic regression or other algorithms that use a gradient-based optimization to adjust the model, standardization gives better accuracy than normalization [16].

Therefore, the logistic regression model for business process models classification based on their correctness is using the considered complexity measures IC and M will be as follows:

$$p(IC', M') = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \cdot IC' + \beta_2 \cdot M')}} \quad (8)$$

where:

- IC' is the standardized value of IC;
- M' is the standardized value of M.

Therefore, business process models for which $p(IC', M') > 0.5$ will be considered error-prone and will require measures to improve their quality.

Interface complexity (IC) and modularity (M) are quantitative measures that reflect important characteristics of BPMN process models.

These measures can be calculated for each process model and used as input to a logistic regression model. The logistic regression model learns the relationship between the input features (IC' and M') and a binary outcome variable representing correctness (e.g., whether the BPMN model is correct or not).

By learning from a dataset of labeled BPMN process models, a logistic regression model can then generalize its learning to classify new process models based on their IC' and M' scores, providing a predictive tool for assessing correctness in BPMN process modeling.

Thus, the algorithm for business process models classification based on their correctness will include the following steps (see fig. 3):

- 1) process a collection of BPMN model files, parse business process elements;
- 2) calculate the IC and M measures for each BPMN model in the dataset, find standardized values of the considered features;
- 3) create a dataset with the IC and M values for each BPMN model and the corresponding binary target variable indicating correctness;
- 4) apply logistic regression to the prepared training set (75%), define a relationship between features (IC and M) and correctness labels;
- 5) evaluate the performance of the trained logistic regression model on a test set (25%) to ensure that it can analyze new business process models;
- 6) deploy the logistic regression model to evaluate the correctness of new BPMN models based on their IC and M measures;
- 7) use the deployed logistic regression model to classify new BPMN models based on their IC and M scores.

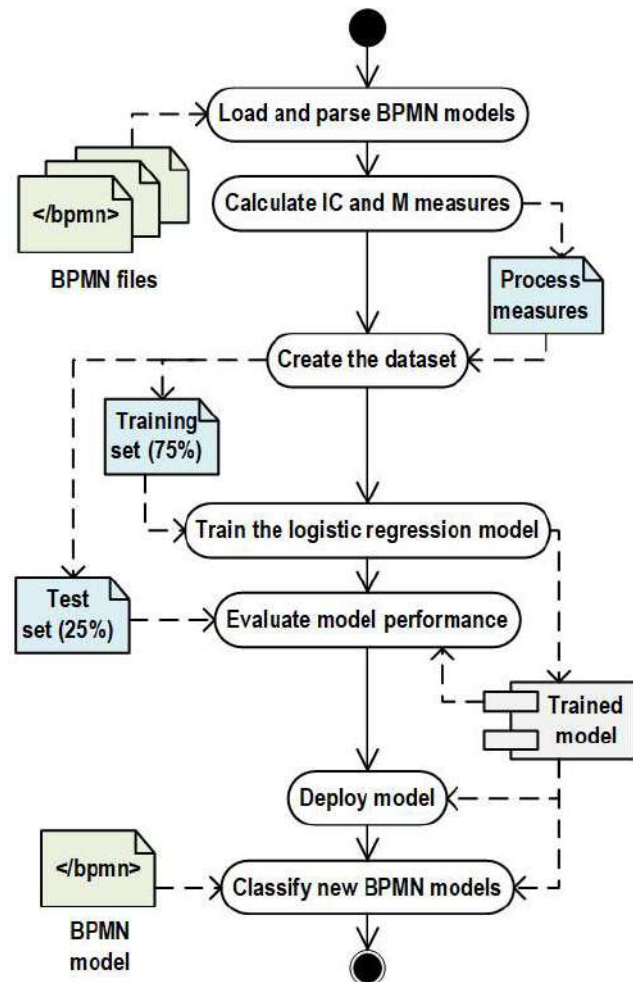


Fig. 3. Algorithm for business process models classification based on their correctness

System design. Functional requirements define the capabilities and functions a system must have to meet user expectations and business needs. They describe what the system should do and typically include functions such as data processing, computation, and user interaction [17].

Formally, the functional requirements for a software solution for business process models classification based on their correctness are presented in a UML (Unified Modeling Language) use case diagram (see fig. 4).

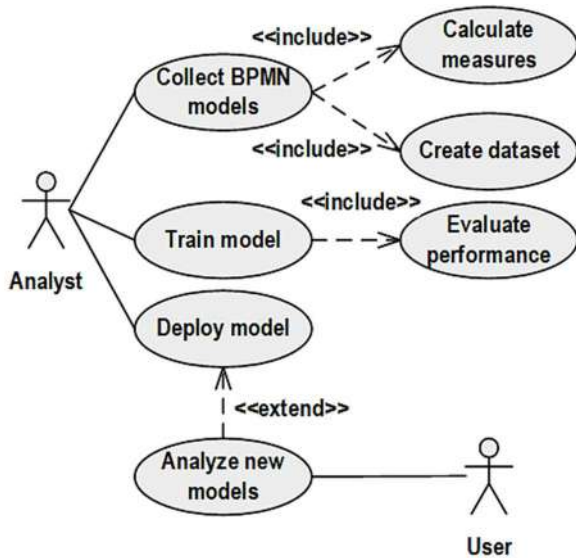


Fig. 4. Use case diagram of a software solution for business process models correctness classification

The selection of the technology stack for the BPMN model classification software tool was made with a focus on achieving a balance between efficiency, versatility, and usability:

- Node.js [18] is the backend JavaScript runtime, which facilitates parallel query processing.
- TensorFlow [19] is a powerful machine learning library with robust capabilities in implementing the logistic regression algorithm for model training and classification.
- Bpmn.io [20] is a BPMN modeling toolkit, which provides a user interface for model visualization.
- MongoDB is a NoSQL database [21], used for efficient data storage and retrieval, it meets scalability and flexibility requirements.

The software for BPMN diagrams classification based on their correctness is built using a three-tier client-server architecture that uses considered technologies to integrate with various system components (see fig. 5) [22].

Results and discussion. The collection of BPMN business process models based on the GitHub repository “bpmn-for-research” contains 3729 models [23].

Boxplot diagrams (fig. 6) were used to set thresholds for the IC and M measures. We focused on the values of the third quartile (Q3) obtained from the boxplot analysis.

By observing the Q3 values, the upper thresholds for IC and M were determined:

- $IC \leq 62$;
- $M \leq 19$.

Any data points that exceeded these thresholds were considered outliers, indicating potential inefficiencies in the BPMN models. Thus, a criterion was established by which BPMN models with IC or M values exceeding the upper threshold were classified as inefficient. This approach made it possible to identify and mark cases where

high complexity or modularity could potentially hinder the efficiency or reliability of BPMN models.

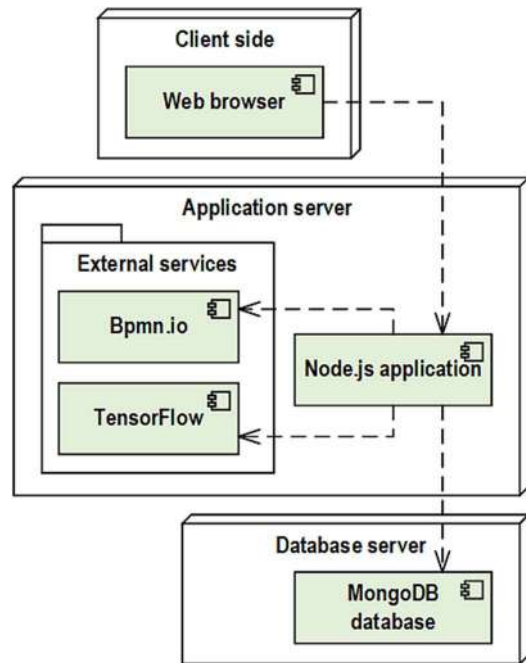


Fig. 5. Deployment diagram of a software solution for business process models correctness classification

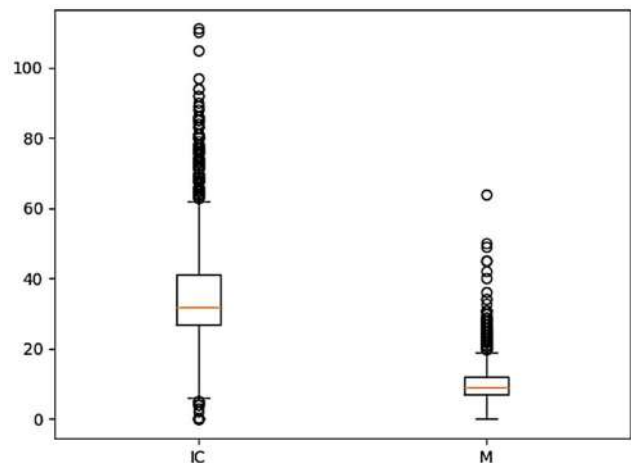


Fig. 6. Boxplot diagram to determine thresholds for IC and M measures

The provided confusion matrix (see fig. 7) illustrates the performance of a logistic regression classification model, typically in the considered BPMN models binary classification scenario. In this matrix [24]:

- top left cell (907) represents the number of True Negative (TN) results, indicating cases that the model correctly classified as negative;
- top right cell (1) demonstrates the number of False Positives (FP), which are cases that the model incorrectly classified as positive;
- bottom left cell (7) displays the number of False Negative (FN) results, representing cases that the model incorrectly classified as negative;
- bottom right cell (18) reflects the number of True Positive (TP) results, indicating cases that the model correctly classified as positive.

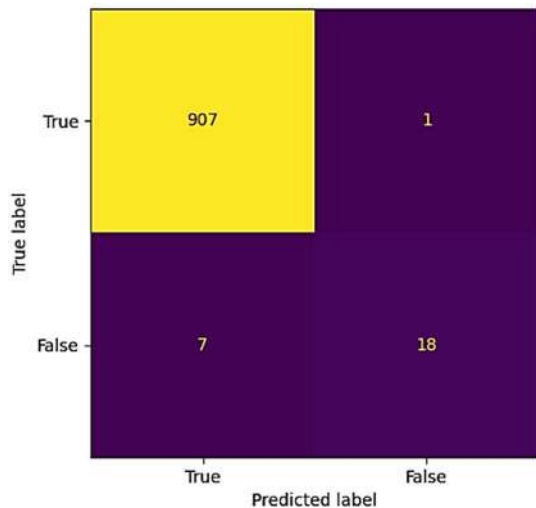


Fig. 7. Confusion matrix of the BPMN models classification

The results of the software solution for business process models classification based on their correctness demonstrate a high level of performance:

- out of 925 total predictions made, all were correct, indicating the effectiveness of the classification model in accurately identifying incorrect BPMN models;
- only 8 predictions were incorrect, indicating a low number of misclassifications and a high level of model accuracy;
- accuracy score of 0.9914 indicates the high ability of a software solution to correctly classify business process models in 99.14 % cases;
- precision score of 0.9988 indicates that when a solution predicts a model to be correct, it is correct 99.88 % of the time;
- recall value of 0.9923 indicates the classification model correctly identifies 99.23 % of the correct business process models.
- F-score of 0.9956 indicates the overall 99.56 % performance of the classification model and, respectively, the developed software solution.

The results of the classification of business process models in terms of their correctness based on logistic regression are demonstrated in fig. 8.

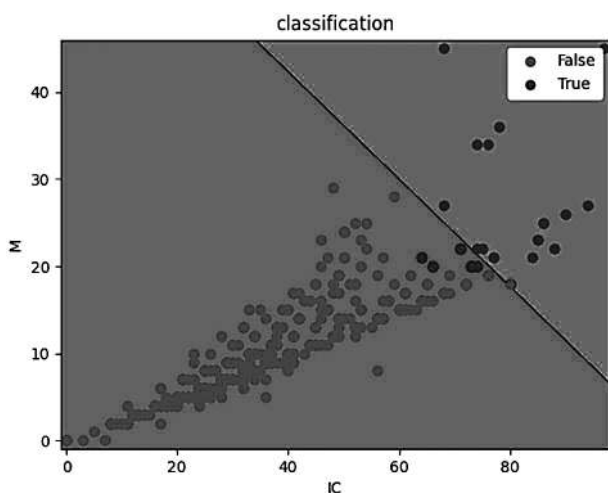


Fig. 8. Results of business process models correctness classification based on logistic regression

The deployed logistic regression model, implemented in the form of the developed software solution, was finally used to classify new BPMN models based on their IC and M scores (see fig. 9).

Conclusion. This paper solves the relevant practical problem of business process models classification based on their correctness, which allows to ensure quality control of the business process models being developed.

The goal of the study was to improve the quality of business process models by developing a software solution for business process models classification based on their correctness. Therefore, to achieve this goal, the following tasks were solved in this work:

- 1) the algorithm for solving the problem of business process models classification based on their correctness is developed;
- 2) the requirements for a software solution are determined;
- 3) the software solution development tools are selected;
- 4) the software solution for business process models classification based on their correctness is designed;
- 5) the corresponding software components of the proposed solution are developed;
- 6) the use of a software solution for solving the problem of business process models classification based on their correctness is demonstrated;
- 7) the obtained results are analyzed and discussed.

The software, based on the logistic regression model, indicates high performance of BPMN models classification based on their correctness, achieving a high accuracy rate of 99.14 %. A precision of 99.88 % demonstrates the ability to accurately identify correct BPMN models while keeping a high recall rate of 99.23 %, which indicates the ability to efficiently detect the relevant instances in the dataset. In addition, the F-score of 99.56 % highlights the overall high performance in BPMN models classification, which helps to minimize errors in designed business process models.

References

1. *Business Process*. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/bpm/8.5.0?topic=processes-business> (access date: 15.03.2024).
2. *Business Process*. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/business-process> (access date: 15.03.2024).
3. *Business Process*. URL: <https://www.techopedia.com/definition/26363/business-process> (access date: 20.03.2024).
4. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4> (access date: 20.03.2024).
5. Kopp A., Orlovskiy D. *Towards Intelligent Technology for Error Detection and Quality Evaluation of Business Process Models*. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3373/keynote1.pdf> (access date: 27.03.2024).
6. *Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0*. URL: <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/PDF> (access date: 28.03.2024).
7. von Rosing M., White S., Cummins F., de Man H. *Business Process Model and Notation (BPMN)*. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799959-3.00021-5> (access date: 28.03.2024).
8. van der Aals W. M. P. *Business Process Modeling Notation*. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8265-9_1195 (access date: 04.04.2024).
9. Kopp A., Orlovskiy D. *Towards the Software Solution for Complexity Minimization of Business Process Models to Improve*

Understandability. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3426/paper22.pdf> (access date: 04.04.2024).

10. Ayech H. B. H., Ghannouchi S. A., El Hadj Amor E. A. *Extension of the BPM lifecycle to promote the maintainability of BPMN models*. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.239> (access date: 09.04.2024).
11. Tsakalidis G., Vergidis K. *A Roadmap to Critical Redesign Choices That Increase the Robustness of Business Process Redesign Initiatives*. URL: <https://doi.org/10.3390/joitmc7030178> (access date: 09.04.2024).
12. Taherdoost H. *Classification of Machine Learning Algorithms*. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8403-6_38 (access date: 10.04.2024).
13. Sekeroglu B., Hasan S. S., Abdullah S. M. *Comparison of Machine Learning Algorithms for Classification Problems*. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-17798-0_39 (access date: 10.04.2024).
14. Bisong E. *Understanding Logistic Regression*. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4470-8_20 (access date: 12.04.2024).
15. Han W., Wang R., Huang D., Xu C. *Large-Scale ALS Data Semantic Classification Integrating Location-Context-Semantics Cues by Higher-Order CRF*. URL: <https://doi.org/10.3390/s20061700> (access date: 15.04.2024).
16. Ahsan M. et al. *Effect of Data Scaling Methods on Machine Learning Algorithms and Model Performance*. URL: <https://doi.org/10.3390/technologies9030052> (access date: 15.04.2024).
17. *Functional and Nonfunctional Requirements*. URL: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-0528-9_4 (access date: 15.04.2024).
18. *Node.js*. URL: <https://nodejs.org/en/> (access date: 18.04.2024).
19. *TensorFlow*. URL: <https://www.tensorflow.org/> (access date: 18.04.2024).
20. *bpmn.io*. URL: <https://bpmn.io/> (access date: 18.04.2024).
21. *MongoDB*. URL: <https://www.mongodb.com/> (access date: 18.04.2024).
22. Reussner R. et al. *Managed Software Evolution*. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13499-0> (access date: 18.04.2024).
23. *BPMN for research*. URL: <https://github.com/camunda/bpmn-for-research> (access date: 20.04.2024).
24. Ming Ting K. *Confusion Matrix*. URL: https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_157 (access date: 21.04.2024).

References (transliterated)

1. *Business Process*. Available at: <https://www.ibm.com/docs/en/bpm/8.5.0?topic=processes-business> (accessed: 15.03.2024).
2. *Business Process*. Available at: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/business-process> (accessed: 15.03.2024).
3. *Business Process*. Available at: <https://www.techopedia.com/definition/26363/business-process> (accessed: 20.03.2024).
4. Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Fundamentals of Business Process Management*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56509-4> (accessed: 20.03.2024).
5. Kopp A., Orlovskiy D. *Towards Intelligent Technology for Error Detection and Quality Evaluation of Business Process Models*. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3373/keynote1.pdf> (accessed: 27.03.2024).
6. *Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0*. Available at: <https://www.omg.org/spec/BPMN/2.0/PDF> (accessed: 28.03.2024).
7. von Rosing M., White S., Cummins F., de Man H. *Business Process Model and Notation (BPMN)*. Available at: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-799959-3.00021-5> (accessed: 28.03.2024).
8. van der Aals W. M. P. *Business Process Modeling Notation*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8265-9_1195 (accessed: 04.04.2024).
9. Kopp A., Orlovskiy D. *Towards the Software Solution for Complexity Minimization of Business Process Models to Improve Understandability*. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-3426/paper22.pdf> (accessed: 04.04.2024).
10. Ayech H. B. H., Ghannouchi S. A., El Hadj Amor E. A. *Extension of the BPM lifecycle to promote the maintainability of BPMN models*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.239> (accessed: 09.04.2024).
11. Tsakalidis G., Vergidis K. *A Roadmap to Critical Redesign Choices That Increase the Robustness of Business Process Redesign Initiatives*. Available at: <https://doi.org/10.3390/joitmc7030178> (accessed: 09.04.2024).
12. Taherdoost H. *Classification of Machine Learning Algorithms*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-981-16-8403-6_38 (accessed: 10.04.2024).
13. Sekeroglu B., Hasan S. S., Abdullah S. M. *Comparison of Machine Learning Algorithms for Classification Problems*. Available at:

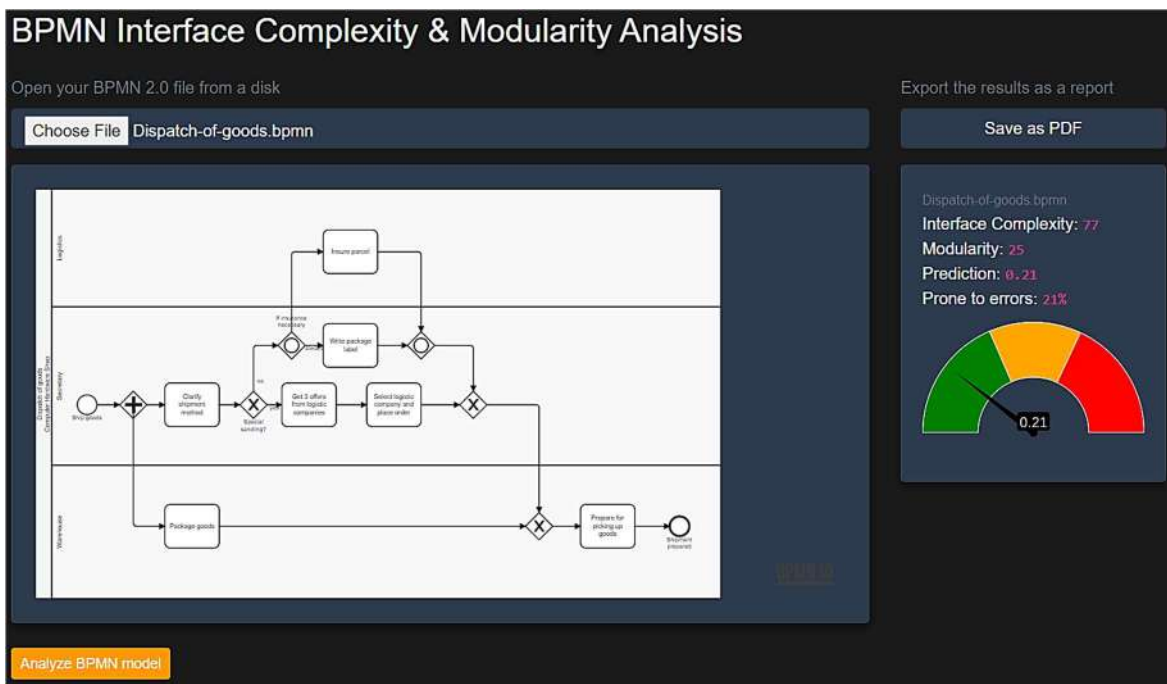


Fig. 9. Example of the new BPMN model assessment using the developed software

- https://doi.org/10.1007/978-3-030-17798-0_39 (accessed: 10.04.2024).
14. Bisong E. *Understanding Logistic Regression*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4842-4470-8_20 (accessed: 12.04.2024).
15. Han W., Wang R., Huang D., Xu C. *Large-Scale ALS Data Semantic Classification Integrating Location-Context-Semantics Cues by Higher-Order CRF*. Available at: <https://doi.org/10.3390/s20061700> (accessed: 15.04.2024).
16. Ahsan M. et al. *Effect of Data Scaling Methods on Machine Learning Algorithms and Model Performance*. Available at: <https://doi.org/10.3390/technologies9030052> (accessed: 15.04.2024).
17. *Functional and Nonfunctional Requirements*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-1-4302-0528-9_4 (accessed: 15.04.2024).
18. *Node.js*. Available at: <https://nodejs.org/en/> (accessed: 18.04.2024).
19. *TensorFlow*. Available at: <https://www.tensorflow.org/> (accessed: 18.04.2024).
20. *bpmn.io*. Available at: <https://bpmn.io/> (accessed: 18.04.2024).
21. *MongoDB*. Available at: <https://www.mongodb.com/> (accessed: 18.04.2024).
22. Reussner R. et al. *Managed Software Evolution*. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-13499-0> (accessed: 18.04.2024).
23. *BPMN for research*. Available at: <https://github.com/camunda/bpmn-for-research> (accessed: 20.04.2024).
24. Ming Ting K. *Confusion Matrix*. Available at: https://doi.org/10.1007/978-0-387-30164-8_157 (accessed: 21.04.2024).

Received 05.05.2024

УДК 004.94

А. М. КОПП, доктор філософії (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: andrii.kopp@khpri.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3189-5623>

Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: dmytro.orlovskiy@khpri.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8261-2988>

Ю. С. ЛІТВИНОВА, кандидат технічних наук (PhD), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, м. Харків, Україна, e-mail: uliya.litvinova@khpri.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6680-662X>

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ КОРЕКТНОСТІ МОДЕЛІ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Погано розроблені моделі бізнес-процесів є джерелом помилок і подальших витрат, пов'язаних з цими помилками, таких як грошові витрати, втрачений час або навіть певний шкідливий вплив на людей або навколишнє середовище, якщо помилкові моделі бізнес-процесів пов'язані з критично важливими галузями. Життєвий цикл BPM (Business Process Management) зазвичай складається з проектування, впровадження, моніторингу та контролю виконання бізнес-процесів, але йому бракує безперервного контролю якості створених моделей BPMN (Business Process Model and Notation). Таким чином, у даній роботі розглядається задача класифікації моделей бізнес-процесів на основі їх коректності, вирішення якої забезпечить контроль якості розроблених моделей бізнес-процесів. Таким чином, метою даного дослідження є підвищення якості моделей бізнес-процесів шляхом розробки програмного рішення для класифікації моделей бізнес-процесів на основі їх коректності. Об'єктом дослідження є процес класифікації моделей бізнес-процесів на основі їх коректності, який використовує показники якості та порогові значення, як правило, показники складності. Предметом дослідження є програмне рішення для класифікації моделей бізнес-процесів на основі їх коректності. Отже, у даній роботі запропоновано алгоритм розв'язання задачі класифікації моделей BPMN з використанням логістичної регресії, показників складності інтерфейсу та модульності, визначено вимоги до програмного забезпечення, обрано засоби розробки програмного забезпечення, спроектовано програмне забезпечення для класифікації моделей бізнес-процесів на основі їх коректності, розроблено відповідні програмні компоненти, продемонстровано використання програмного рішення для розв'язання задачі класифікації моделей бізнес-процесів на основі їх коректності, а також проаналізовано та обговорено отримані результати. Розроблене програмне забезпечення демонструє високу ефективність класифікації моделей BPMN на основі їх коректності, досягаючи високих показників точності (99,14 %), влучності (99,88 %), повноти (99,23 %) та F-міри (99,56 %), що підкреслює високу ефективність виявлення помилок моделювання.

Ключові слова: моделювання бізнес-процесів, якість моделі, показники складності, машинне навчання, логістична регресія, програмне рішення.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Копп Андрій Михайлович / Kopp Andrii Mykhailovych

Автор 2 / Author 2: Орловський Дмитро Леонідович / Orlovskiy Dmytro Leonidovych

Автор 3 / Author 3: Літвінова Юлія Сергіївна / Litvinova Uliya Serhiivna

Д. С. ІВАЩЕНКО, старший викладач кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: daria.ivashchenko@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7365-111X>.

О. С. КУЦЕНКО, доктор технічних наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: oleksandr.kutsenko@khp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6059-3694>.

МУЛЬТИАГЕНТНА ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ ПОШИРЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРИЮВАНЬ

Метою дослідження є розробка мультиагентної імітаційної моделі для прогнозування поширення інфекційних захворювань, зокрема COVID-19. В умовах пандемії COVID-19 виникла нагальна потреба у створенні інструментів для прогнозування та аналізу динаміки епідемії, а також оцінки ефективності управлінських рішень. Використання математичних моделей у цьому процесі дозволяє адекватно описувати динаміку поширення інфекцій, що є важливим для прийняття обґрунтованих рішень. У статті розглядаються традиційні підходи до моделювання епідемії, такі як модель «хижак–жертва» та компартментальна модель SIR (Susceptible-Infectious-Recovered). Модель «хижак–жертва» описує взаємодію між двома видами в екосистемі за допомогою диференціальних рівнянь, що дозволяє моделювати динаміку популяцій. Компартментальна модель SIR поділяє населення на три групи: вразливі, інфіковані та одужалі, що дозволяє аналізувати поширення інфекційних захворювань. Проте ці моделі мають обмеження, зокрема через припущення про однорідність популяції та сталість параметрів. Для більш точного моделювання складних епідемічних процесів було розроблено мультиагентну імітаційну модель. У цій моделі агенти взаємодіють у визначеній області, імітуючи реальні умови поширення інфекції. Агенти поділяються на три класи: здорові, інфіковані та одужалі. Рух агентів моделюється за допомогою випадкового блукання у двовимірному просторі з урахуванням можливості контакту між ними, що може призвести до зараження. Інфіковані агенти після певного періоду захворювання переходять у клас одужалих і більше не можуть інфікуватися. Результати моделювання показали, що мультиагентна модель дозволяє більш точно прогнозувати динаміку поширення інфекцій. Було проведено численні експерименти, які продемонстрували адекватність моделі у відтворенні процесу інфікування, пікових значень захворюваності та періоду одужання. Досліджено вплив різних параметрів, таких як тривалість захворювання, на динаміку епідемії. Отримані результати підтверджують, що врахування індивідуальних характеристик та поведінкових особливостей агентів покращує точність моделювання. Це дозволяє використовувати мультиагентну імітаційну модель для розробки ефективних стратегій контролю та прогнозування поширення інфекційних захворювань, що може бути корисним для прийняття управлінських рішень у реальних умовах пандемії.

Ключові слова: епідемія, імітаційне моделювання, модель, SARS-CoV-2, пандемія, прогнозування, математичне моделювання

Вступ. З поширенням коронавірусу SARS-CoV-2 (COVID-19) з'явилася потреба у прогнозуванні масштабів можливої соціальної шкоди, термінів піку та завершення епідемії, а також у визначенні ефективності можливих управлінських рішень для запобігання поширенню хвороби в умовах біолого-соціальної надзвичайної ситуації [1]. У цьому контексті математичні моделі, що описують ці процеси, стають важливим інструментом. На сьогодні існують різні підходи до моделювання поширення епідемії, які можуть бути використані для аналізу подій та порівняння альтернативних шляхів розвитку в залежності від управлінських рішень.

Огляд математичних моделей. Математичне моделювання в епідеміології є важливою галуззю, яка дозволяє вивчати та прогнозувати поширення інфекційних захворювань в популяції [2]. Початок цієї галузі можна віднести до робіт, де ефективність вакцинації проти вітряної віспи вперше була досліджена з використанням математичних підходів. Одним з ключових досягнень є розробка моделей, які базуються на законі збереження маси, що дозволяють адекватно відтворювати динаміку захворювань в популяції. Серед них можна виділити «хижак-жертва» та компартментальні моделі, включаючи модель SIR (Susceptible-Infectious-Recovered) [3–5].

Однією з класичних математичних моделей є модель «хижак-жертва», вона використовується для опису взаємодії між двома видами в екосистемі: один

вид, відомий як «хижак», полює на інший вид, відомий як «жертва» [6–8]. Ця модель може бути застосована в різних контекстах, включаючи біологію, екологію та інші галузі.

В моделі «хижак–жертва» зазвичай використовуються два диференціальні рівняння для опису змін в популяціях обох видів з часом:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha x - \beta xy, \\ \frac{dy}{dt} = -\gamma y + \delta xy, \end{cases}$$

де α , β , γ , і δ – це параметри, які визначають характеристики взаємодії між хижаками і жертвами.

α – представляє природний приріст хижаків (без урахування жертв);

β – визначає частку успішних хижаків, які виживають, полюючи на жертв;

γ – вказує на швидкість природного вимирання жертв,

δ – визначає, як часто хижак і жертва взаємодіють.

Математична модель SIR широко використовується для аналізу поширення інфекційних захворювань, таких як SARS-CoV-2. Ця модель розглядає населення як сукупність осіб, які можуть перебувати в одній із трьох основних категорій S – Susceptible (вразливий), I – Infected (інфікований) та R – Recovered

© Іващенко Д. С., Куценко О. С., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



(одужавший) [9-11]. SIR модель дозволяє врахувати значну кількість факторів, що впливають на динаміку поширення коронавірусної інфекції. Однак через спрощену природу цієї моделі вона не враховує всі аспекти динаміки поширення коронавірусної інфекції. Модель SIR має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = -\alpha \frac{SI}{N}, \\ \frac{dI}{dt} = \alpha \frac{SI}{N} - \beta I, \\ \frac{dR}{dt} = \beta I, \end{cases}$$

де $S(t)$, $I(t)$ та $R(t)$ – кількість вразливих, інфікованих та одужавших осіб відповідно;

$N = S(t) + I(t) + R(t)$ – загальна кількість населення;

α – коефіцієнт передачі інфекції, залежний від частоти контактів;

β – коефіцієнт одужання, який визначає швидкість виходу інфікованих осіб з інфекції.

Моделі SIR та «хижак-жертва» надзвичайно корисні для розуміння розповсюдження епідемій та динаміки популяцій, але вони не є досконалими через свої спрощення. Вони часто передбачають однорідність популяції, випадкову взаємодію між її членами та сталість параметрів з часом, не враховуючи при цьому індивідуальні відмінності, складну соціальну динаміку та змінність у часі. Такі спрощення можуть призвести до недооцінки реальних ризиків та неефективності стратегій контролю епідемій.

Мультиагентний підхід до імітаційної моделі розповсюдження епідемій.

Враховуючи обмеження існуючих моделей, виникла потреба у розробці нової імітаційної моделі, яка повинна враховувати складніші та більш реалістичніші аспекти епідемічних процесів.

Агентний підхід передбачає використання індивідуальних агентів, кожен з яких має власні характеристики та поведінкові правила. Цей підхід дозволяє моделювати взаємодії між окремими агентами, враховуючи їхню індивідуальну різноманітність, мобільність та адаптивну поведінку [12]. Така модель може відтворювати складні соціальні структури і динамічні зміни, що відбуваються у популяції під час епідемії. Агентний підхід також враховує випадкові контакти між людьми, різні рівні сприйнятливості до інфекції та інші фактори, що можуть суттєво впливати на динаміку епідемічного процесу.

На основі вище зазначеної інформації було розроблено математичну модель поширення епідемії у двовимірній області:

$$R^2 = \{x \in [0,1], y \in [0,1]\}.$$

У заданій області випадковим чином розміщуються і переміщуються N агентів A_1, A_2, \dots, A_N .

Процес розглядається у дискретному часі t_k з кроком τ :

$$t_{k+1} = t_k + \tau,$$

де $k = 0, 1, \dots$

Траєкторії агентів у просторі R^2 описуються вектором:

$$P_j = (r_j^0, r_j^1, r_j^2, \dots, r_j^k), j = 1 \dots N,$$

де $r_j^k = (x_j^k, y_j^k)$ – декартові координати j -го агента в k момент часу.

Рух агентів P_j будується на основі випадкового блукання:

$$\begin{cases} x_j^{k+1} = x_j^k + v_{xj}^k \tau, \\ y_j^{k+1} = y_j^k + v_{yj}^k \tau, \end{cases}$$

де v_{xj}^k і v_{yj}^k – рівномірно розподілені значення в діапазоні $[-1, +1]$.

На межах області R^2 , якщо $x_j^{(k+1)} \notin [0,1]$ або $y_j^{(k+1)} \notin [0,1]$, де відповідні значення обчислюються за співвідношеннями:

$$\begin{cases} x_j^{(k+1)} = x_j^{(k)} - v_{xj}^{(k)} \tau, \\ y_j^{(k+1)} = y_j^{(k)} - v_{yj}^{(k)} \tau. \end{cases}$$

Агенти A_1, A_2, \dots, A_N , по аналогії з SIR-моделлю, розділені на три класи: S – здорові, схильні до зараження, R – здорові агенти, що одужали, I – хворі, носії інфекції. Стан i -го агента задається логічною функцією:

$$\delta_{i(k)} = \begin{cases} 0, & k = 0, 1, \dots, k'..k'' + 1, \\ 1, & k = k' + 1 \dots k'' - 1. \end{cases}$$

Момент зіткнення агентів k' відповідає контакту між носієм інфекції та здоровим агентом. Момент k'' – це час, коли інфікований агент перестає бути носієм інфекції та переходить у стан агента що одужав R . Він визначається як сума моменту контакту k' , коли відбувся початковий контакт між носієм інфекції та здоровим агентом і тривалості захворювання l :

$$k'' = k' + l.$$

Контакт між агентами A_i та A_j оцінюється за різницею їх координат:

$$\begin{cases} |x_i^{(k)} - x_j^{(k)}| \leq \varepsilon, \\ |y_i^{(k)} - y_j^{(k)}| \leq \varepsilon. \end{cases}$$

Після завершення періоду захворювання агент переходить у клас R – здоровий агент, з імунітетом, що більше не може інфікуватись.

Результати та обговорення. Використовуючи запропоновану імітаційну модель було проведено серію обчислювальних експериментів. На рис. 1 зображено результати моделювання розповсюдження захворювання для 100 агентів з тривалістю захворювання $l = 5$.

Далі на всіх рисунках червоний колір відображає кількість хворих, зелений – агентів, що одужали, а сірий – здорових. З рис. 1, *a* видно, що на початку моделювання є лише один інфікований агент, після того як заражений агент наближається до інших він передає захворювання, таким чином починається стрімке розповсюдження інфекції, котре досягає свого максимального значення при $t = 7$ (див. рис. 1, *б*). Потім починається поступовий ріст кількості агентів R , а кількість агентів класу I поступово зменшується. Остаточне одужання усієї популяції досягається при значенні часу $t = 20$ (див. рис. 1, *в*).

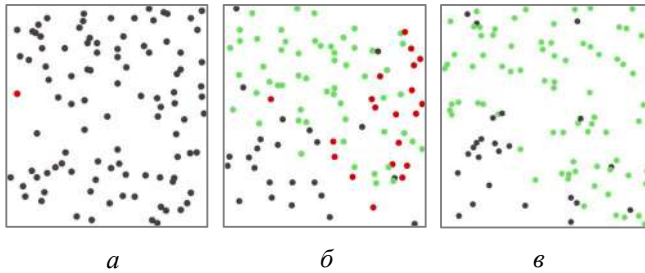


Рис. 1. Результати моделювання при різних значеннях часу:
a – початок моделювання при значенні часу $t = 0$;
б – результат моделювання при значенні часу $t = 7$;
в – результат моделювання при значенні часу $t = 20$

Так, на рис. 2 зображено результати моделювання розповсюдження захворювання для 100 агентів з тривалістю захворювання $l = 5$. Як можна побачити на рисунку, с початку інфікування йде стрімке розповсюдження інфекції, котре досягає свого максимального значення при $t = 7$. Потім починається поступовий ріст кількості агентів R , а значення агентів класу I поступово зменшується. Остаточне одужання усієї популяції досягається при значенні часу $t = 20$.

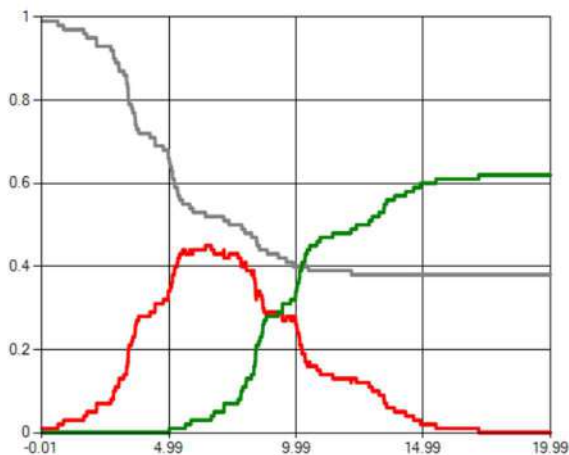


Рис. 2. Зміна динаміки захворювання з часом. Час кроку $\tau = 0.01$, кількість агентів $N = 100$, дистанція взаємодії $\varepsilon = 0.03$, тривалість захворювання $l = 5$

У даній роботі було проведено серію з 100 чисельних експериментів з тими ж самими параметрами моделювання (див. рис. 3). Як можна побачити на

рисунку, при збільшенні статистики тенденції розповсюдження захворюваності не змінюються: так саме пік захворюваності спостерігається біля значення часу $t = 7$, однак час повного одужання збільшується до $t = 40$, що може бути обумовлено впливом стохастичних факторів. Слід зазначити, що якісний перебіг інфекції не змінюється при збільшенні статистики (див. рис. 4).

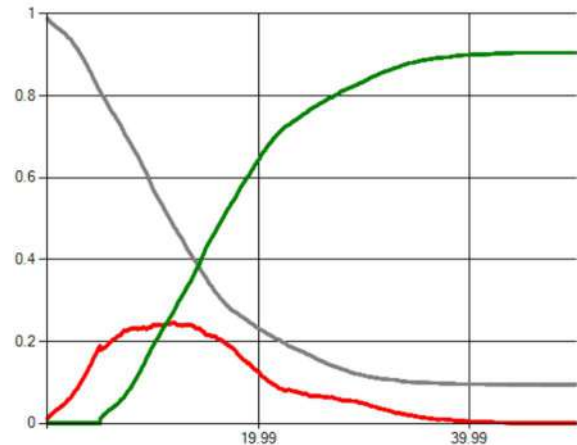


Рис. 3. Результати узагальнення 100 експериментів.
 Час кроку $\tau = 0.01$, кількість агентів $N = 100$,
 дистанція взаємодії $\varepsilon = 0.03$, тривалість
 захворювання $l = 5$, час моделювання $t = 50$

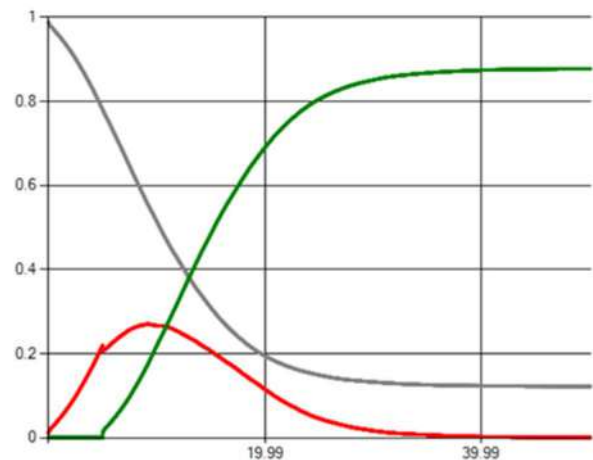


Рис. 4. Результати узагальнення 1000 експериментів.
 Час кроку $\tau = 0.01$, кількість агентів $N = 100$,
 дистанція взаємодії $\varepsilon = 0.03$, тривалість
 захворювання $l = 5$, час моделювання $t = 50$

В рамках даної роботи було проведено дослідження впливу тривалості захворювання агентів на перебіг розповсюдження інфекції. На рис. 5 наведено результати моделювання інфікування для різних значень l . Як видно з рисунку, збільшення тривалості захворювання суттєво впливає на динаміку поширення пандемії. Так, при збільшенні параметру l від 8 до 12 зміщується пік максимальної кількості захворювань спостерігається більш помітне зростання кількості заражених осіб на протязі певного періоду часу $t = 10$ до $t = 18$, а кількість інфікованих у піку захворювання

збільшується з 40 % до 65 %. Також, при тривалості захворювання $l \geq 10$ вже всі агенти інфікуються, що не спостерігається при менших значеннях параметру.

Таким чином, отримані результати підкреслюють важливість урахування тривалості захворювання при розробці стратегій контролю і прогнозування поширення пандемії. Врахування цього параметра дозволяє краще зрозуміти динаміку інфекційного процесу та розробляти ефективні заходи для його обмеження.

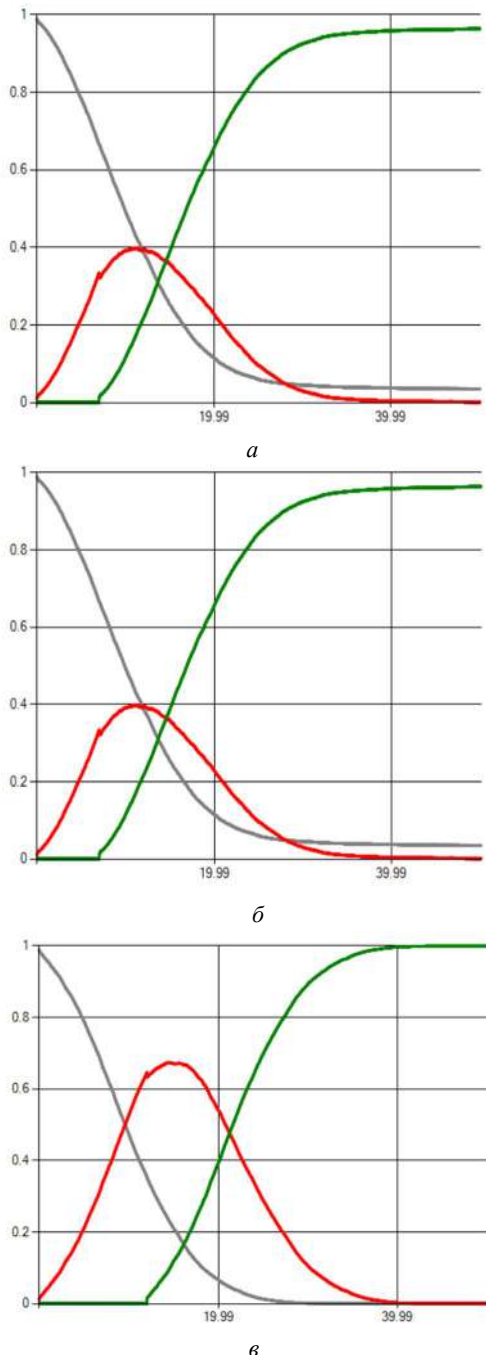


Рис. 5. Результати моделювання з різними часом захворювання: *a* – результат моделювання з тривалістю захворювання $l = 8$; *б* – результат моделювання з тривалістю захворювання $l = 10$; *в* – результат моделювання з тривалістю захворювання $l = 12$

Висновки. Отримані результати експериментів підтверджують важливість урахування тривалості захворювання при аналізі та прогнозуванні поширення інфекційних захворювань. Збільшення тривалості захворювання суттєво впливає на динаміку пандемії, що може призвести до затримки процесу вилікування та збільшення загальної кількості заражених, що свідчить про необхідність урахування цього параметра при розробці стратегій контролю та прогнозування поширення захворювань. Отримані результати можуть досить точно обґрунтувати прийняті управлінські рішення, спрямовані на обмеження поширення епідемії.

Список використаної літератури

1. Иванов М. В. *Математическое моделирование процесса пандемии: теория и практика*. URL: <https://indsi.ru/2020/04/30/математическое-моделирование-проце/> (дата звернення: 15.11.2020).
2. Іващенко Д. С., Куценко О. С. Огляд і аналіз методів моделювання процесу розвитку епідемії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2021. № 1 (5). С. 16–19.
3. Мاستихин А. В. *Финальные вероятности для марковских процессов эпидемии: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.01.05* Москва, 2011. 93 с.
4. Авиллов К. *Математическое моделирование в эпидемиологии как задача анализа сложных данных*. URL: <http://download.yandex.ru/company/experience/seminars/KAvilovmatmodelirovanie.pdf> (дата звернення: 07.04.2021).
5. Allen L. J. S. *An Introduction to stochastic epidemic models*. URL: <http://eaton.math.rpi.edu/csums/papers/epidemic/allenstochasticepidemic.pdf> (дата звернення: 03.04.2021).
6. Апонин Ю. М., Апонина Е. А. Математическая модель сообщества хищник – жертва с нижним порогом численности жертвы. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2009. № 1. С. 51–56.
7. Evans C., Findley G. A new transformation for the Lotka – Volterra problem. *Journal of Mathematical Chemistry*. 1999. № 25 (1). P. 105–110.
8. Fort H. On predicting species yields in multispecies communities: Quantifying the accuracy of the linear Lotka-Volterra generalized model. *Ecological Modelling*. 2018. Vol. 387. P. 154–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.09.009>.
9. Gray A., Greenhalgh D., Mao X., Pan J. The SIS epidemic model with markovian switching. URL: <http://strathprints.strath.ac.uk/41322> (дата звернення: 10.03.2021).
10. Асатрян М. Н., Салман Е. Р., Боев Б. В. Моделирование и прогнозирования эпидемического процесса гепатита В. *Эпидемиология и вакцинопрофилактика*. 2012. №1 (62). С. 49–54.
11. Carley K. M., Altman N., Kaminsky B., Nave D., Yahja A. BioWar: A City-Scale Multi-Agent Network Model of Weaponized Biological Attacks. *CASOS Technical Report*, 2004. URL: http://www.casos.cs.cmu.edu/publications/papers/carley_2004_biowarcityscale.pdf (дата звернення: 17.10.2020).
12. Bellu G., Saccomani M. P., Audoly S., Daisy D. L. A new software tool to test global identifiability of biological and physiological systems. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2007. Vol. 88, № 1. P. 52–61.

References (transliterated)

1. Ivanov M. V. *Matematicheskoe modelirovanie processa pandemii: teoriya i praktika* [Mathematical modeling of the pandemic process]. Available at: <https://indsi.ru/2020/04/30/математическое-моделирование-проце/> (accessed: 15.11.2020). (In Russ.).
2. Ivashchenko D. S., Kutsenko O. S. Ohliad i analiz metodiv modeliuвання protsesu rozvytku epidemii [Review and analysis of methods for modeling the development of the epidemic]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Systemnyy analiz, upravlinnya ta informatsiyni tekhnolohiyi [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Ser.: System analysis, control and information technology]. 2021, no. 1 (5), pp. 16–19. (In Ukr.).

3. Mastikhin A. V. (2011). Final'nye veroyatnosti dlya markovskikh processov epidemii: *dys. ... kand. fiz.-mat. nauk: 01.01.05* [Finalny imovirnosty for Markov processes of the Epidemic: dissertation of candidate of physical and mathematical sciences: 01.01.05 (PhD)]. Moscow, 2011. 93 p. (In Russ.).
4. Avilov K. *Matematicheskoe modelirovanie v epidemiologii kak zadacha analiza slozhnyh dannyh* [Mathematical modeling in epidemiology as a problem in the analysis of complex data]. Available at: <http://download.yandex.ru/company/experience/seminars/KAvilovmatmodelirovanie.pdf> (accessed 07.04.2021).
5. Allen L. J. *An Introduction to stochastic epidemic models*. URL: <http://eaton.math.rpi.edu/csums/papers/epidemic/allenstochasticepidemic.pdf> (accessed 03.04.2021).
6. Aponin Y. M., Aponina E. A. Matematicheskaya model soobshchestva hishnik – zhertva s nizhnim porogom chislennosti zhertyy [Mathematical model of a predator – prey community with a lower threshold for the number of prey]. *Kompyuternye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling]. 2009, no. 1, pp. 51–56. (In Russ.).
7. Evans C., Findley G. A new transformation for the Lotka – Volterra problem. *Journal of Mathematical Chemistry*. 1999, no. 25 (1), pp. 105–110.
8. Fort H. On predicting species yields in multispecies communities: Quantifying the accuracy of the linear Lotka-Volterra generalized model. *Ecological Modelling*. 2018, vol. 387, pp. 154–162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.09.009>.
9. Gray A., Greenhalgh D., Mao X., Pan J. *The SIS epidemic model with markovian switching*. URL: <http://strathprints.strath.ac.uk/41322> (accessed 10.03.2021).
10. Asatryan M. N., Salman E. R., Boev B. V. *Modelirovaniya i prognozirovaniya epidemicheskogo processa gepatita B* [Model and prognosis of the hepatitis B]. *Epidemiology and vaccine prophylaxis*. 2012, no. 1 (62), pp. 49–54. (In Russ.).
11. Carley K. M., Altman N., Kaminsky B., Nave D., Yahja A. *BioWar: A City-Scale Multi-Agent Network Model of Weaponized Biological Attacks*. *CASOS Technical Report 2004*. URL: http://www.casos.cs.cmu.edu/publications/papers/carley_2004_biowarcityscale.pdf (accessed 17.10.2020).
12. Bellu G., Saccomani M. P., Audoly S., Daisy D. L. A new software tool to test global identifiability of biological and physiological systems. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2007, vol. 88, no. 1, pp. 52–61.

Надійшла (received) 25.02.2024

UDC 004.942

D. S. IVASHCHENKO, Senior Lecturer of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; e-mail: daria.ivashchenko@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7365-111X>.

O. S. KUTSENKO, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: oleksandr.kutsenko@khp.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6059-3694>

MULTI-AGENT SIMULATION MODEL OF INFECTIOUS DISEASE SPREAD

The aim of the research is to develop a multi-agent simulation model for predicting the spread of infectious diseases, particularly COVID-19. In the context of the COVID-19 pandemic, there emerged an urgent need to create tools for forecasting and analyzing the dynamics of epidemics, as well as for evaluating the effectiveness of management decisions. The use of mathematical models in this process allows for an adequate description of the infection spread dynamics, which is essential for making informed decisions. The article discusses traditional approaches to epidemic modeling, such as the predator-prey model and the compartmental SIR (Susceptible-Infectious-Recovered) model. The predator-prey model describes the interaction between two species in an ecosystem using differential equations, which allows for modeling population dynamics. The compartmental SIR model divides the population into three groups: susceptible, infected, and recovered, which enables the analysis of the spread of infectious diseases. However, these models have limitations, particularly due to assumptions about population homogeneity and constant parameters. To more accurately model complex epidemic processes, a multi-agent simulation model was developed. In this model, agents interact within a defined area, mimicking real conditions of infection spread. Agents are divided into three classes: healthy, infected, and recovered. The movement of agents is modeled using random walk in a two-dimensional space, taking into account the possibility of contact between them, which can lead to infection. Infected agents transition to the recovered class after a certain period of illness and can no longer be infected. Modeling results showed that the multi-agent model allows for more accurate prediction of infection spread dynamics. Numerous experiments were conducted, demonstrating the model's adequacy in replicating the infection process, peak infection rates, and recovery periods. The influence of various parameters, such as the duration of illness, on the epidemic dynamics was investigated. The obtained results confirm that considering individual characteristics and behavioral traits of agents improves the accuracy of modeling. This allows the multi-agent simulation model to be used for developing effective control strategies and predicting the spread of infectious diseases, which can be useful for making management decisions in real pandemic conditions.

Keywords: epidemic, simulation modeling, model, SARS-CoV-2, pandemic, forecasting, mathematical modeling.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Івашченко Дар'я Сергіївна / Ivashchenko Daria Sergiivna

Автор 2 / Author 2: Куценко Олександр Сергійович / Kutsenko Oleksandr Sergiyovych

О. М. НИКУЛІНА, д-р техн. наук, професор, завідувачка кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; професор кафедри цифрових технологій та проєктно-аналітичних рішень ТОВ «ТУ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: valerii.severyn@khpi.edu.ua

О. М. КОНДРАТОВ, аспірант, старший викладач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-9944>; e-mail: kondratovolexy@gmail.com

О. М. ОЛЬХОВИЙ, старший викладач кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6409-2706>, e-mail: aleksey.olhovoy@khpi.edu.ua

МОДЕЛІ ДИСТАНЦІЙНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТРАНСФОРМЕРІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА ОПТИЧНОГО ПОТОКУ

Задачі дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів є важливими для різноманітних галузей, включаючи комп'ютерний зір, робототехніку, автономні транспортні засоби, системи відеоспостереження та багато інших. Традиційні методи розв'язання цих задач стикаються з проблемами недостатньої точності та ефективності визначення динамічних параметрів в умовах швидко змінюваних середовищ та складних динамічних сценаріїв. Розглядаються сучасні методи ідентифікації параметрів динамічних об'єктів з використанням технологій трансформерів виявлення та оптичного потоку. Трансформер виявлення є одним з новітніх підходів у галузі комп'ютерного зору, що використовує архітектуру трансформера для завдань детектування об'єктів. Цей трансформер інтегрує процеси виявлення об'єктів і визначення їхніх меж у єдину модель end-to-end, що значно покращує точність та швидкість обробки. Використання трансформерів дозволяє моделі ефективно обробляти інформацію з усього зображення одночасно, що сприяє кращому розпізнаванню об'єктів навіть у складних умовах. Оптичний потік є методом аналізу руху, що визначає швидкість та напрямок руху пікселів між послідовними кадрами відео. Цей метод дозволяє отримати детальну інформацію про динаміку сцени, що є критично важливим для точного відстеження та ідентифікації параметрів рухомих об'єктів. Пропонується інтеграція трансформерів виявлення та оптичного потоку для підвищення точності ідентифікації параметрів динамічних об'єктів. Комбінація цих двох методів дозволяє використовувати переваги обох підходів: високу точність детектування об'єктів та детальну інформацію про їхній рух. Проведені експерименти показують, що запропонована модель значно перевершує традиційні методи як у точності визначення параметрів об'єктів, так і у швидкості обробки даних. Ключові результати дослідження свідчать про те, що інтеграція трансформерів виявлення та оптичного потоку забезпечує надійне і швидке визначення параметрів рухомих об'єктів у реальному часі, що може бути застосовано у різних практичних сценаріях. Проведені дослідження також показали потенціал для подальшого вдосконалення методів обробки даних та їхнього застосування у складних динамічних середовищах. Отримані результати відкривають нові перспективи для розробки інтелектуальних систем моніторингу та керування, що здатні адаптуватися до швидкозмінливих умов навколишнього середовища, підвищуючи ефективність та безпеку їхньої роботи.

Ключові слова: дистанційна ідентифікація динамічних об'єктів, виявлення об'єктів, трансформер виявлення, оптичний потік, ідентифікація швидкості, глибоке навчання, згорткові нейронні мережі.

Вступ. Одними з ключових задач штучного інтелекту є виявлення та ідентифікація динамічних об'єктів у великих обсягах цифрових відео даних, що зазнають постійних змін. Ці задачі стають особливо актуальними у таких галузях як комп'ютерний зір, системи відеоспостереження, робототехніка, автономне керування транспортними засобами та багато інших.

Для розв'язання цих задач використовуються передові методи глибокого навчання, серед яких особливе місце займають засоби детектування та ідентифікації, такі як згорткові нейронні мережі (ЗНМ), кодувальні та декодувальні архітектури, а також нейронні мережі прямого поширення (НМПП). Використання цих методів є ключовим для ефективного виявлення та ідентифікації об'єктів у реальному часі, зокрема динамічних об'єктів, що зазнають змін у формі, розмірі, положенні та інших параметрах [1].

У статті розглянуті підходи до використання методів детектування на основі ЗНМ, а також інших

складових глибокого навчання, таких як кодувальні та декодувальні архітектури, у контексті дистанційної ідентифікації динамічних об'єктів (ДІДО) у зображеннях. Також досліджені переваги та обмеження цих методів і надані висновки щодо їхнього потенціалу для розв'язання актуальних задач в різних областях застосування [2].

З вибором технології трансформерів виявлення (ТРВИ) є кілька причин, чому цей підхід привабливий для ДІДО у зображеннях [3].

Трансформери виявлення базуються на трансформерних архітектурах, які виявилися дуже ефективними в обробці послідовностей даних, таких як мовний текст. Використання трансформерів у відображенні зображень дозволяє моделі визначати глобальні та локальні залежності у зображенні, що може бути корисним при ідентифікації об'єктів.

Трансформери виявлення використовують підхід end-to-end, що пропонує архітектуру, яка дозволяє здійснювати виявлення об'єктів та їхню класифікацію

© Нікуліна О. М., Северин В. П., Кондратов О. М., Ольховий О. М., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



у вигляді однієї моделі без необхідності в окремих компонентах, таких як anchor boxes або non-maximum suppression. Це спрощує процес навчання та інференсу, зменшуючи кількість гіперпараметрів, і оптимізує швидкість роботи моделі [3, 4].

Технологія ТРВИ результативно використана в різних областях, включаючи відеоаналітику, медичні зображення та інші. Це свідчить про універсальність моделі ТРВИ та її потенціал у різних завданнях, пов'язаних з ідентифікацією об'єктів [5].

Отже, обираючи технологію ТРВИ для ДІДО у зображеннях, можна розраховувати на високу точність та ефективність роботи моделі, яка здатна адаптуватися до різних сценаріїв та умов [5–7].

Мета та задачі дослідження. Мета статті полягає в аналізі моделей дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів з використанням трансформерів виявлення та оптичного потоку.

Для досягнення мети поставлені задачі дослідження.

1. Розглянути схему дистанційної ідентифікації з використанням ТРВИ та оптичного потоку.

2. Розглянути моделі технології ТРВИ.

3. Розглянути структуру кодера та декодера в технології ТРВИ.

4. Розглянути моделі багатоголової уваги та самоуваги в технології трансформерів виявлення.

Технологія дистанційної ідентифікації. Схема дистанційної ідентифікації параметрів динамічного об'єкта з використанням ТРВИ та оптичного потоку показана на рис. 1 і включає такі елементи.

1. Блок «Відео вхід». Кожен кадр відео даних (1 кадр, 2 кадр і т. п.) аналізується з використанням блоку «Відео вхід». Результати аналізу подаються на детектор виявлення.

2. Детектор (DETR) у вигляді трансформера виявлення. Детектор дозволяє визначати положення та межі об'єктів у кадрі.

3. Локалізація об'єктів. Дані положення та меж об'єктів у кадрі, визначені детектором виявлення, використовуються для локалізації об'єктів.

4. Оптичний потік (Optical Flow). Застосування алгоритмів оптичного потоку для визначення векторів руху об'єктів між послідовними кадрами дає можливість оцінити швидкість та напрямок руху об'єктів.

5. Аналіз параметрів динамічних об'єктів. На основі отриманих векторів руху проводиться аналіз параметрів об'єктів, включаючи швидкість руху, напрямок руху, траєкторію та інші динамічні характеристики.

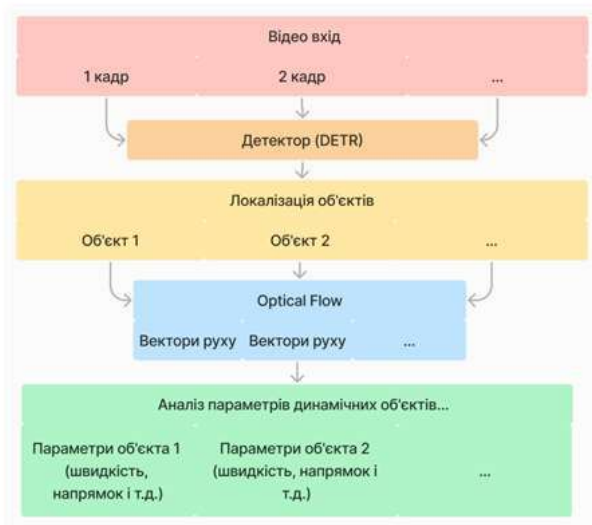


Рис. 1. Схема дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів

На рис. 2 показана схема технології трансформерів виявлення, що включає ЗНМ (а), кодер (б), декодер (в), НМПП (г).

Для виявлення просторових ознак у ЗНМ застосовується вхідний шар для зображень. У кодері який складається з декількох шарів, вхідні ознаки перетворюються у високорівневі представлення. Декодер формує набір обмежуючих рамок для передбачення виходів на основі представлень, отриманих від кодера.

Розроблена модель декодера має вигляд [8]

$$B_t = \text{DETR}(I_t) \quad (1)$$

де I_t – кадр;

t – індекс кадру;

B_t – набір обмежуючих рамок для кожного кадру.

Кожний кадр аналізується з використанням відео входу та детектора ТРВИ, що дозволяє точно визначати

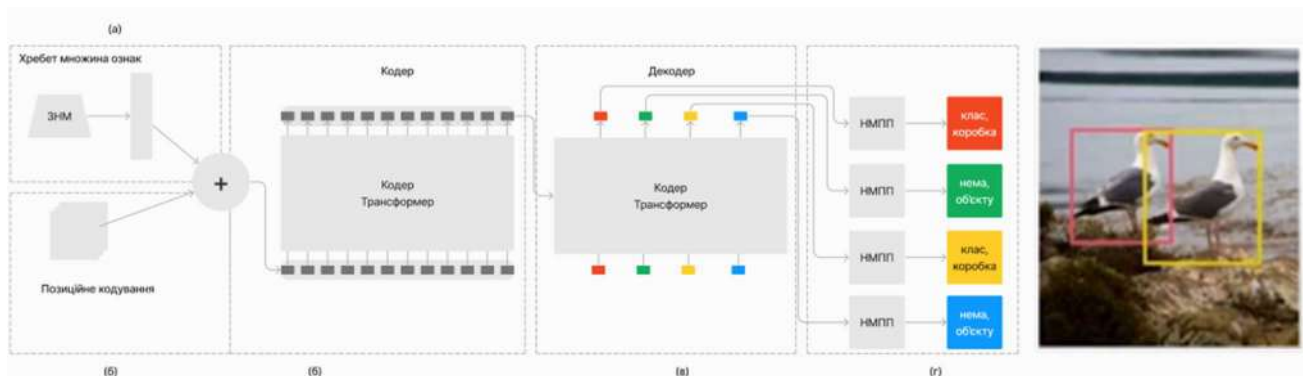


Рис. 2. Схема технології трансформерів виявлення: а – ЗНМ; б – кодер; в – декодер; г – НМПП

положення та межі об'єктів у кадрі. Блок оптичного потоку приймає вхідне зображення і генерує набір обмежувачів рамок для кожного кадру

$$F_{t \rightarrow t+1} = \text{OpticalFlow}(I_t, I_{t+1}), \quad (2)$$

де I_t та I_{t+1} – послідовні кадри;

$F_{t \rightarrow t+1}$ – оптичний потік.

Алгоритми оптичного потоку застосовуються для визначення векторів руху об'єктів між послідовними кадрами. Оптичний потік визначається як поле векторів, що описує рух кожної точки кадру.

$$v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \| F_{t \rightarrow t+1}(i) \|, \quad (3)$$

де N – кількість точок, що належать об'єкту;

$F_{t \rightarrow t+1}$ – вектори руху;

v – швидкість;

θ – кут напрямку руху.

На основі отриманих векторів руху проводиться аналіз параметрів об'єктів, включаючи швидкість та напрямок руху. Напрямок руху об'єкта визначається, як середнє значення напрямків векторів руху. Швидкість об'єкта розраховується як величина середнього вектору руху. Кут напрямку руху об'єкта обчислюється за формулою

$$\theta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{atan2}(F_{t \rightarrow t+1}^y(i), F_{t \rightarrow t+1}^x(i)). \quad (4)$$

Класична нейронна мережа з прямим поширенням обробляє вихід декодера для отримання кінцевих результатів.

Завдяки застосуванню технології ТРВИ вдалося значно підвищити точність виявлення об'єктів у відеопотоці, особливо в умовах складного фону та динамічного середовища. Використання оптичного потоку дозволило точно визначати параметри руху об'єктів, що є критично важливим для задач реального часу, таких як системи безпеки, автономні транспортні засоби та відеоспостереження [3, 6, 9].

Модель кодер – декодер. Схема моделі з'єднання елементів кодер – декодер показана на рис. 3. На рис. 3а надано схему кодера, який складається з шарів. Кожен шар має два основні підблоки – багатоголову самоувагу (Multi-Head Self-Attention) та НМПП, де використовується багатощаровий перцептрон.

На рис. 3б показано схему декодера, який має схожу структуру до кодера з додатковими компонентами. Список шарів включає багатоголову самоувагу, суму та нормування, багатоголову увагу (Multi-Head attention), суму та нормування, НМПП, де як і в кодері використовується багатощаровий перцептрон [3, 10].

Кодер – це частина трансформера, яка приймає на вхід ознаки, що отримані ЗНМ, та обробляє їх за допомогою механізмів багатоголової самоуваги. Завдання кодера полягає в кодуванні вхідних ознак у контекстні представлення, які зберігають інформацію про всі об'єкти в сцені. Декодер приймає на вхід

закодовані ознаки з кодера та використовує механізми багатоголової уваги для визначення набору фіксованих об'єктів. Виходом декодера є кінцеві координати та категорії виявлених об'єктів.

На етапі попередньої обробки зображення ЗНМ витягує відповідні просторові ознаки [1, 5].

Трансформери мають мережеву архітектуру, що базується на механізмах уваги для машинного перекладу. Маючи елемент запиту і набір ключових елементів, багатоголовий модуль уваги адаптивно агрегує ключовий зміст з відповідними вагами уваги, які вимірюють сумісність пар запит-ключ. Елементом запиту може бути цільове слово у вихідному реченні, а набір ключових елементів можуть складати вихідні слова у вхідному реченні.

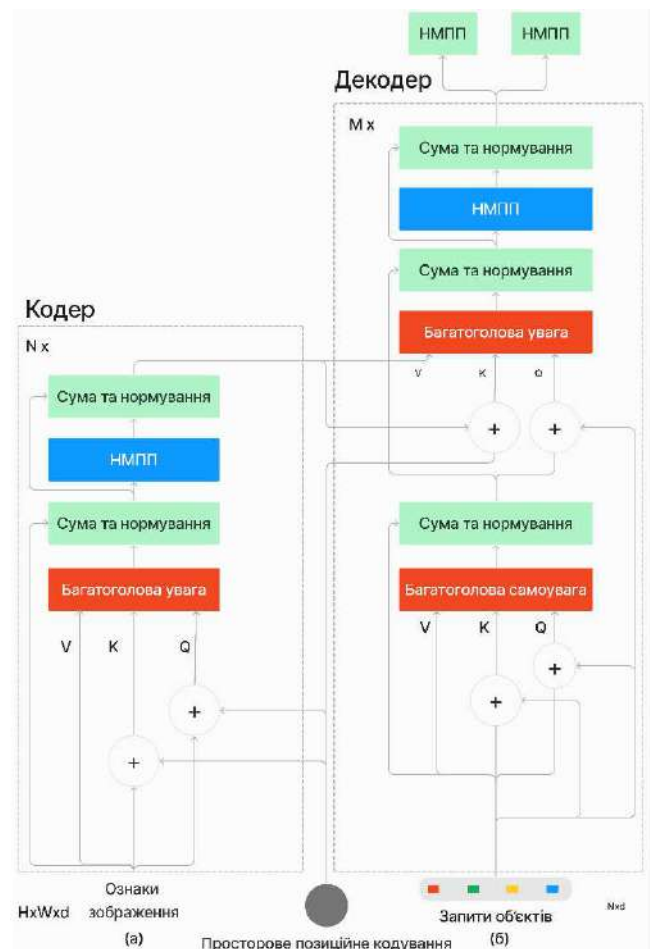


Рис. 3. Модель кодер – декодер: а) кодер; б) декодер

Щоб дозволити моделі фокусуватися на вмісті з різних підпросторів представлення і з різних позицій, виходи різних голів уваги лінійно агрегуються з перенавчальними важелями. Цей механізм забезпечує трансформерам здатність визначати складні залежності між елементами вхідних даних, що робить їх ефективними для широкого спектру задач обробки природної мови та інших областей.

Функція багатоголової уваги обчислюється за формулою [11]

$$\text{MultiHeadAttn}(z_q, x) = \sum_{m=1}^M W_m \left[\sum_{k \in \Omega_k} A_{mqk} * W'_m x_k \right], \quad (5)$$

де $q \in \Omega q$ – індекс елемента запиту;
 $z_q \in \mathbb{R}^C$ – ознака представлення запиту;
 m – індекс голови уваги;
 M – кількість голів уваги;
 $W_m \in \mathbb{R}^{C \times C_v}$ – вихідна проєкція матриці.
 $k \in \Omega k$ – індекс елемента ключа;
 A_{mqk} – важелі уваги;
 $W'_m \in \mathbb{R}^{C_v \times C}$ – вхідна проєкція матриці;
 $x_k \in \mathbb{R}^C$ – ознака представлення ключа;
 Ωq та Ωk – множини елементів запиту та ключа відповідно.

Вхідна та вихідна проєкції матриці мають перенавчальні важелі, що визначаються розмірністю уваги для кожної голови уваги

$$C_v = C / M, \quad (6)$$

де C – розмірність ознаки.

Важелі уваги обчислюються за формулою

$$A_{mqk} \propto e^{\frac{z_q^T U_m^T V_m x_k}{\sqrt{C_v}}}, \quad (7)$$

де $U_m, V_m \in \mathbb{R}^{C_v \times C}$ – перенавчальні важелі вхідних запитів та ключів для проєкції матриці на m -ту голову;

m, q та k – індекси голови, запиту та ключа відповідно.

Важелі уваги нормалізуються за формулою

$$\sum_{k \in \Omega k} A_{mqk} = 1. \quad (8)$$

Ознаки представлення z_q та x_k зазвичай є конкатенацією/сумою вмісту елементів та позиційних вкладок для розрізнення різних просторових позицій.

Вектори запитів, ключів і значень обчислюються за формулами:

$$q_i = X_i W^Q, \quad k_i = X_i W^K, \quad v_i = X_i W^V, \quad (9)$$

де X_i – вхідний вектор або матриця вхідних векторів;

W^Q – матриця ваг для перетворення в запити;

W^K – матриця ваг для перетворення в ключі;

W^V – матриця ваг для перетворення в значення;

q_i – вектор запиту, отриманий з вхідного вектору або матриці вхідних векторів;

k_i – вектор ключа, отриманий з вхідного вектору або матриці вхідних векторів;

v_i – вектор значення, отриманий з вхідного вектору або матриці вхідних векторів.

Щоб обчислити ваги уваги і зважити відповідні значення створені вектори запитів, ключів і значень використовуються в механізмі уваги з функцією

$$\text{Attention}(q_i, k_j, v_j) = \sum_{j=1}^n \text{softmax} \left(\frac{q_i \cdot k_j}{\sqrt{d_k}} \right) v_j, \quad (10)$$

де d_k – розмірність векторів ключів.

K – матриця ключів;

k_j – вектор-стовпець матриці ключів;

V – матриця значень;

v_j – вектор-стовпець матриці значень;

Механізм уваги призначає ваги ключам на основі їх схожості з запитом. Ці ваги використовуються для агрегування векторів значень у зважену суму, яка потім використовується в моделі трансформера. Оцінки уваги дозволяють моделі фокусуватися на різних частинах вхідної послідовності для кожної вихідної позиції, що дозволяє захоплювати залежності незалежно від їхньої відстані у послідовності. Увага цього типу застосовується для взаємодії між різними частинами послідовностей в трансформерних моделях. Вона розбиває вхідні дані на кілька голів, кожна з яких використовується для відповідних обчислень. Кожна голова вивчає взаємозв'язки між словами у різних контекстах та відповідності між різними частинами послідовності.

Результати обчислень кожної голови конкатенуються та проходять через додатковий проєкційний шар перед об'єднанням для подальшої обробки.

Багатоголова самоувага у трансформерів – це спеціалізований тип багатоголової уваги, де вхідні дані подаються одночасно на всі голови для обробки.

Кожна голова вивчає відносини між різними словами в межах цієї послідовності за принципом самоподібності.

Цей підхід дозволяє моделі вивчати взаємозв'язки між різними частинами послідовності без потреби у внутрішніх чи зовнішніх взаємодіях [2, 11].

Висновки. Динамічні об'єкти є важливим елементом в багатьох сферах, таких як автономні автомобілі, робототехніка, моніторинг безпеки та медична діагностика. Ідентифікація їх параметрів, таких як швидкість, напрямок руху та інші відіграє ключову роль у розумінні та прогнозуванні їх поведінки [10, 12].

Використання згорткових мереж для виявлення ознак з відеопослідовностей, інтеграція технік трансформерів для покращення точності виявлення та ідентифікації об'єктів, оптимізація методів навчання для обробки великих обсягів даних та динамічних змін у відеопослідовностях – ці засоби допомагають у створенні ефективної системи для ідентифікації параметрів динамічних об'єктів з використанням переваг як згорткових нейронних мереж, так і трансформерів та оптичного потоку [13].

Використання моделі, яка поєднує у собі ТРВИ та метод оптичного потоку для ефективної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів [2, 3, 5]. Трансформери виявлення є потужним інструментом для точного виявлення динамічних об'єктів на зображеннях. Цю модель доцільно використовувати для локалізації параметрів динамічних об'єктів на кадрах відео даних.

Запропоновані моделі та методи будуть використані для дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів, таких як автономні автомобілі, роботи, безпілотні літальні апарати, а також для моніторингу безпеки та медичної діагностики.

Список використаної літератури

- Wang Z., Turko R., Shaikh O., Park H., Das N., Hohman F., Kahng M., Chau D. *CNN Explainer: Learning Convolutional Neural Networks with Interactive Visualization*. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.15004> (дата звернення: 06.05.2024).
- Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A., Kaiser L., Polosukhin I. *Attention Is All You Need*. URL: <https://arxiv.org/abs/1706.03762> (дата звернення: 06.05.2024).
- Carion N., Massa F., Synnaeve G., Usunier N., Kirillov A., Zagoruyko S. *End-to-End Object Detection with Transformers*. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.12872v3> (дата звернення: 06.05.2024).
- Zou Z., Chen K., Shi Z., Shi Z., Guo Y., Ye J. *Object Detection in 20 Years: A Survey*. URL: https://arxiv.org/pdf/1905.05055.pdf?fbclid=IwAR0ILGAWTuwU-9-iH6lZyPFXyXA5JRWarM_XoSJ78QEhmnn-txvr_iGEzCio (дата звернення: 06.05.2024).
- Ammar A., Chebbah A., Fredj H., Souani C. *Comparative Study of latest CNN based Optical Flow Estimation*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9806070/references#references>. (дата звернення: 06.05.2024).
- Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. *Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation*. URL: <https://arxiv.org/abs/1311.2524> (дата звернення: 06.05.2024).
- Girshick R., Donahue J., Darrell T., and Malik J. Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2016. Vol. 38, no. 1. P. 142–158.
- Nikulina O. M., Severin V. P., Kondratov O. M., Reкова Н. Ю. Аналіз інформаційних технологій для дистанційної ідентифікації динамічних об'єктів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків. НТУ «ХПІ», 2023. № 1 (9). С. 110–115.
- Nikulina O. M., Kondratov O. M. Модель ідентифікації параметрів динамічного об'єкту з використанням DEtection TRansformer та Optical Flow. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, 22–24 травня 2024 р.* Харків, НТУ «ХПІ». 2024. С. 1047.
- Nikulina O. M., Kondratov O. M. Методи дистанційної ідентифікації динамічних параметрів об'єкта. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р.* Харків, НТУ «ХПІ». 2023. С. 1047.
- Zhu X., Hu H., Lin S., Dai J. *Deformable ConvNets v2: More Deformable, Better Results*. URL: <https://arxiv.org/abs/1811.11168> (дата звернення: 06.05.2024).
- Inomata T., Kimura K., Hagiwara M. *Object Tracking and Classification System Using Agent Search*. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejieiss/129/11/129_11_2065/_pdf-char/ja (дата звернення: 06.05.2024).
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*. 2012. P. 1097–1105.
- Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A., Kaiser L., Polosukhin I. *Attention Is All You Need*. URL: <https://arxiv.org/abs/1706.03762> (accessed 06.05.2024).
- Carion N., Massa F., Synnaeve G., Usunier N., Kirillov A., Zagoruyko S. *End-to-End Object Detection with Transformers*. URL: <https://arxiv.org/abs/2005.12872v3> (accessed 06.05.2024).
- Zou Z., Chen K., Shi Z., Shi Z., Guo Y., Ye J. *Object Detection in 20 Years: A Survey*. URL: https://arxiv.org/pdf/1905.05055.pdf?fbclid=IwAR0ILGAWTuwU-9-iH6lZyPFXyXA5JRWarM_XoSJ78QEhmnn-txvr_iGEzCio (accessed 06.05.2024).
- Ammar A., Chebbah A., Fredj H., Souani C. *Comparative Study of latest CNN based Optical Flow Estimation*. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9806070/references#references>. (accessed 06.05.2024).
- Girshick R., Donahue J., Darrell T., Malik J. *Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation*. URL: <https://arxiv.org/abs/1311.2524> (accessed 06.05.2024).
- Girshick R., Donahue J., Darrell T., and Malik J. Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2016, vol. 38, no. 1, pp. 142–158.
- Nikulina O. M., Severin V. P., Kondratov O. M., Reкова Н. Ю. Аналіз інформаційних технологій для ідентифікації динамічних об'єктів [Analysis of information technologies for remote identification of dynamic objects]. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: System analysis, management and information technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1 (9), pp. 110–115.
- Nikulina O. M., Kondratov O. M. Model ідентифікації параметрів динамічного об'єкту з використанням DEtection TRansformer та Optical Flow [Dynamic object parameter identification model using DEtection TRansformer and Optical Flow]. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, 22–24 травня 2024 р.* [Information technologies: science, technology, technology, education, health: Abstracts of reports of XXXII international scientific and practical conference MicroCAD-2024, May 22–24, 2024]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, p. 1047.
- Nikulina O. M., Kondratov O. M. Metody dystantsiinoi ідентифікації динамічних параметрів об'єкта [Methods of remote identification of dynamic object parameters]. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023, 17–20 травня 2023 р.* [Information technologies: science, technology, technology, education, health: Abstracts of reports of the XXXI international scientific and practical conference MicroCAD-2023, May 17–20, 2023]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, p. 1047.
- Zhu X., Hu H., Lin S., Dai J. *Deformable ConvNets v2: More Deformable, Better Results*. URL: <https://arxiv.org/abs/1811.11168> (accessed 06.05.2024).
- Inomata T., Kimura K., Hagiwara M. *Object Tracking and Classification System Using Agent Search*. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/ieejieiss/129/11/129_11_2065/_pdf-char/ja (accessed 06.05.2024).
- Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*. 2012, pp. 1097–1105.

References (transliterated)

- Wang Z., Turko R., Shaikh O., Park H., Das N., Hohman F., Kahng M., Chau D. *CNN Explainer: Learning Convolutional Neural Networks with Interactive Visualization*. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.15004> (accessed 06.05.2024).

Надійшла (received) 09.05.2024

UDC 004.8+004.9

O. M. NIKULINA, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; Professor of Department IT, Analysis and Project Decisions, Technical University "METINVEST POLYTECHNICS", LLC, Zaporizhzhia, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

V. P. SEVERYN, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department System Analysis and Information-Analytical Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: valerii.severyn@khpi.edu.ua

O. M. KONDRATOV, Postgraduate, senior lecturer of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-9944>; e-mail: kondratovolexiy@gmail.com

O. M. OLHOVOY, Senior lecturer of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6409-2706>; e-mail: aleksey.olhovoy@khpі.edu.ua

MODELS OF REMOTE IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF DYNAMIC OBJECTS USING DETECTION TRANSFORMERS AND OPTICAL FLOW

The tasks of remote identification of parameters of dynamic objects are important for various fields, including computer vision, robotics, autonomous vehicles, video surveillance systems, and many others. Traditional methods of solving these problems face the problems of insufficient accuracy and efficiency of determining dynamic parameters in conditions of rapidly changing environments and complex dynamic scenarios. Modern methods of identifying parameters of dynamic objects using technologies of detection transformers and optical flow are considered. Transformer detection is one of the newest approaches in computer vision that uses transformer architecture for object detection tasks. This transformer integrates the object detection and boundary detection processes into a single end-to-end model, which greatly improves the accuracy and speed of processing. The use of transformers allows the model to effectively process information from the entire image at the same time, which contributes to better recognition of objects even in difficult conditions. Optical flow is a motion analysis method that determines the speed and direction of pixel movement between successive video frames. This method allows obtaining detailed information about the dynamics of the scene, which is critical for accurate tracking and identification of parameters of moving objects. The integration of detection transformers and optical flow is proposed to increase the accuracy of identification of parameters of dynamic objects. The combination of these two methods allows you to use the advantages of both approaches: high accuracy of object detection and detailed information about their movement. The conducted experiments show that the proposed model significantly outperforms traditional methods both in the accuracy of determining the parameters of objects and in the speed of data processing. The key results of the study indicate that the integration of detection transformers and optical flow provides reliable and fast determination of parameters of moving objects in real time, which can be applied in various practical scenarios. The conducted research also showed the potential for further improvement of data processing methods and their application in complex dynamic environments. The obtained results open new perspectives for the development of intelligent monitoring and control systems capable of adapting to rapidly changing environmental conditions, increasing the efficiency and safety of their work.

Keywords: remote dynamic object identification, object detection, detection transformer, optical flow, velocity identification, deep learning, convolutional neural networks.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Нікуліна Олена Миколаївна, Nikulina Olena Mykolaivna

Автор 2 / Author 2: Северин Валерій Петрович, Sevryn Valerii Petrovych

Автор 3 / Author 3: Кондратов Олексій Михайлович, Kondratov Oleksii Mikhailovich

Автор 4 / Author 4: Ольховий Олексій Михайлович, Olhovoy Oleksii Mikhailovich

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

INFORMATION TECHNOLOGY

DOI: 10.20998/2079-0023.2024.01.09
УДК 004.41+004.8

О. Г. ВОРОЧЕК, кандидат технічних наук (PhD), доцент кафедри Програмної Інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: olga.vorochek@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9054-9894>

І. В. СОЛОВЕЙ, студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: illia.solovei@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5715-2755>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Предметом дослідження є засоби штучного інтелекту (ШІ) для автоматизації процесу тестування програмного забезпечення. Швидкий розвиток індустрії розробки програмного забезпечення останніми десятиріччями призвів до значного зростання конкуренції на ринку ІТ технологій і, як наслідок, жорсткіших вимог до відповідних продуктів та послуг. Автоматизація тестування за допомогою ШІ стає все більш актуальною завдяки своїй здатності вирішувати складні задачі, які раніше вимагали значних людських ресурсів.

Мета роботи – дослідження можливостей використання технологій ШІ для автоматизації процесів мануального тестування, що дозволить підвищити ефективність тестування, знизити витрати та покращити якість програмного забезпечення.

У статті вирішуються такі завдання: аналіз існуючих інструментів та підходів до автоматизації тестування за допомогою ШІ; розробка концептуальної моделі системи, що інтегрує ШІ у процес тестування; вивчення потенціалу ШІ для автоматизації різних аспектів тестування програмного забезпечення, таких як генерація тестових сценаріїв, виявлення дефектів, прогнозування помилок та автоматичний аналіз результатів тестування.

Використовуються такі методи: теоретичний аналіз літератури та існуючих рішень у галузі автоматизації тестування, експериментальне дослідження ефективності запропонованих методів автоматизації тестування.

Здобуто такі результати: представлено ідею системи, що інтегрує технології ШІ для автоматизації тестування програмного забезпечення. Виявлено, що використання ШІ дозволяє автоматизувати рутинні завдання тестування, значно знизити кількість людських помилок та покращити якість програмних продуктів та показники ефективності процесів верифікації та валідації.

Висновки: Розробка та впровадження систем автоматизації тестування на основі ШІ є надзвичайно актуальними і перспективними. Використання технологій ШІ дозволяє значно підвищити ефективність тестування, знизити витрати на його проведення та покращити якість програмного забезпечення. Запропонований підхід до розробки системи автоматизації тестування на основі ШІ може бути використаний як основа для подальших досліджень та розробок у цій галузі.

Ключові слова: штучний інтелект, автоматизація тестування, мануальне тестування, якість програмного забезпечення.

Вступ. Швидкий розвиток індустрії розробки програмного забезпечення останніми десятиріччями призвів до значного зростання конкуренції на ринку ІТ продуктів та послуг. У наслідок того, що кількість компаній, які готові надати замовнику якісну та професійну команду, або навпаки – команді професіоналів якісні та цікаві проекти, суттєво збільшилась виникає проблема забезпечення високого рівня якості розроблених систем.

Одним з процесів інженерії якості є тестування, до якого, зазвичай, залучається уся команда розробки – розробники займаються написанням unit-тестів [1], їх запуском у спеціалізованих програмах, щоб не допустити потрапляння неякісного коду до кінцевої версії продукту; тестувальники на своєму боці розробляють тестові стратегії, забезпечують тестове покриття, оцінюють метрики щодо забезпечення якості, запускають тест-кейси різними методами, надають

тестовий звіт та переслідують ту ж саму мету – надати якісний продукт кінцевому користувачу.

У свою чергу фахівці з тестування можуть бути двох типів: ті, хто займається мануальним тестуванням і ті, хто автоматизує процеси перевірки за допомогою написання програмного коду.

Треба розуміти, що автоматизація потребує значних фінансових витрат на налагодження і реалізацію відповідних процесів. Проте для деяких невеликих компаній, які вже мають команди ручного тестування, це не є економічно доцільним.

У свою чергу, великі компанії, що розробляють комплексні системи, наймають не одну, а навіть декілька команд тестування задля забезпечення ще більшого рівня якості продукту. Жодний продукт не може відмовитись від мануального тестування програмного забезпечення, де тести виконуються вручну тестувальниками.

© Ворочек О. Г., Соловей І. В., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом НТУ «ХПИ» у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПИ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Common Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



У будь-якому випадку постає питання підвищення продуктивності праці та оптимізації витрат при використанні мануального тестування. Поточні тенденції програмної інженерії характеризуються широким залученням засобів і технологій штучного інтелекту для вирішення такого типу задач завдяки своїм широким можливостям і здатності вирішувати складні проблеми, які раніше вимагали значних людських ресурсів. Він дозволяє автоматизувати процеси, які потребують аналізу великих обсягів даних, прийняття швидких і точних рішень, а також адаптації до нових реалій.

ШІ також використовується для розпізнавання образів та мови, машинного навчання, прогнозування, оптимізації процесів, аналізу даних та підтримки прийняття рішень. Він знайшов своє застосування в різних галузях, таких як медицина (діагностика захворювань, аналіз медичних зображень), фінанси (передбачення ринкових трендів, управління ризиками), транспорт (автономні транспортні засоби, оптимізація логістики), виробництво (контроль якості, автоматизація виробничих процесів), маркетинг (персоналізована реклама, аналіз поведінки споживачів) та освіта (адаптивне навчання, автоматичне оцінювання знань).

Системи тестування програмного забезпечення також починають використовувати можливості штучного інтелекту для підвищення ефективності та точності тестування. ШІ допомагає автоматизувати рутинні тестові сценарії, виявляти аномалії, генерувати тестові дані, прогнозувати потенційні дефекти та аналізувати результати тестів. Наприклад, інструменти на основі ШІ можуть автоматично створювати тест-кейси, адаптувати їх до змін у коді, ідентифікувати найбільш ризиковані ділянки коду та пропонувати їх для тестування.

Однак, на сьогоднішній день таких засобів небагато, і вони ще знаходяться на етапі розвитку. Більшість існуючих рішень вимагають значних ресурсів для впровадження та підтримки. Тому дослідження та розробка нових інструментів, що інтегрують ШІ у процес тестування, є дуже актуальними та необхідними. Це дозволить значно знизити витрати на тестування, підвищити якість програмного забезпечення та скоротити час виходу продукту на ринок. Наше дослідження зосереджено на аналізі можливості впровадження інструментарію штучного інтелекту у процес ручного тестування, що робить його актуальним та перспективним для подальшого розвитку галузі.

Мета статті. Метою даної статті є дослідження можливості використання засобів та технологій штучного інтелекту задля автоматизації процесів мануального тестування.

Виклад основного матеріалу. Тестування – це діяльність, яка відбувається протягом життєвого циклу розробки програмного забезпечення, основною метою якої є виявлення помилок і переконання, що розроблена система задовольняє вимоги клієнтів. Тестування програмного забезпечення – спосіб оцінки системи шляхом виявлення відмінностей між ідентифікованими

вимогами під час розробки вимог і отриманими результатами. Тестування можна проводити вручну або автоматизовано за допомогою спеціальних інструментів.

Під час мануального тестування перевіряються всі основні характеристики наданого програмного забезпечення – тестувальники запускають тест-кейси та генерують звіти без допомоги будь-яких автоматизованих інструментів тестування програмного забезпечення.

Серед переваг можна виділити швидкість та точність зворотного зв'язку, менші фінансові витрати через відсутність необхідності витрат бюджету на засоби автоматизації та окрему команду, непотрібність досвіду кодування для написання тестів.

До недоліків можна віднести меншу надійність результатів тестування через людський фактор, відсутність автоматичного створення логів (звітів), важкість виконання певних задач вручну та потреба у додатковому часі.

Автоматизоване тестування повністю покладається на попередньо розроблений тест, який запускається автоматично для порівняння фактичного результату з очікуваним [2]. Це допомагає тестувальнику визначити, чи працює програма у відповідності зі своїм функціоналом. Автоматизоване тестування дозволяє виконати повторювані завдання та тести регресії без додаткового втручання. Хоча всі процеси і виконуються автоматично, автоматизація вимагає певних ручних зусиль для створення початкових сценаріїв тестування.

До переваг автоматизованого тестування можна віднести більшу ефективність у пошуку помилок, порівняно з мануальним, підтримку різних технологій, поетапний запис зі збереженням процесу тестування, відсутність людського фактора та набагато більше покриття тестуванням, що дозволяє не пропустити навіть дрібні деталі.

Зазвичай впровадження автоматизованого тестування відбувається під час інтеграційного – фази перевірки програмного забезпечення, в якій окремі програмні модулі поєднуються та тестуються як група замість того, щоб розглядати кожний клас в окремоті [3]. Цього можна легко досягти, використовуючи Junit-бібліотеки для модульного тестування програмного забезпечення на мові Java для резервного коду та Selenium-інструменту для автоматизації взаємодії веббраузера із інтерфейсом користувача.

Проте для використання цих інструментів, тестувальник потребує певних знань та навичок. До цього, автоматизоване тестування також має ряд недоліків: складність у створенні уявлення про візуальні аспекти інтерфейсу (кольори, шрифт, масштаб, контраст або розміри кнопок) без залучення людського елемента, вартість наявних інструментів та налагодження тестового сценарію, створення якого не є швидким процесом.

Спираючись на усі недоліки, доцільно було б розробити програмну систему, яка б автоматизувала

Генеративний штучний інтелект домінує в дискусіях щодо ШІ, підвищуючи продуктивність розробників і спеціалістів у дуже реальні способи, використовуючи такі системи, як ChatGPT. Це змусило організації та галузі переглянути свої бізнес-процеси та цінність людських ресурсів, підштовхнувши GenAI до піку завищених очікувань у циклі ажіотажу.

Gartner бачить дві сторони генеративного руху ШІ на шляху до більш потужних систем:

- інновації, які будуть підтримуватися GenAI;
- інновації, які сприятимуть розвитку GenAI.

Генеративний штучний інтелект впливає на бізнес, оскільки він пов'язаний із виявленням, створенням, автентичністю та регулюванням інформації і, що суттєво, він також має можливість автоматизувати роботу людини та досвід клієнтів і співробітників [10].

Методи ШІ можуть підтримувати процес тестування програмного забезпечення різними способами.

Типовими задачами, що виконуються у процесі тестування є тестування інтерфейсу користувача (UI) та тестування інтерфейсу прикладних програм (API).

Особливістю таких перевірок при ручному тестуванні є те, що більшість їх виконується на підставі інформації про бізнес-логіку системи.

Тестування UI передбачає перевірку таких аспектів як:

- зовнішній вигляд інтерфейсу. Перевірка відповідності дизайну макетам, правильність відображення на різних пристроях, відповідність стилів тощо;
- елементи керування. Коректність їхньої роботи, доступність для користувачів;
- навігація. Перевірка простоти переміщення між частинами системи, працездатність меню та інше;
- адаптивність;
- повідомлення про помилки та підказки.

Для побудови таких тестів методи ШІ використовують розпізнавання зображень для перевірки навігації та візуального тестування об'єктів і компонентів інтерфейсу користувача. Інструменти автоматизації декодують об'єктну модель документа і пов'язаний код для визначення властивостей об'єктів у тестуванні інтерфейсу користувача на основі ШІ. Тести інтерфейсу користувача виконуються після проектування та розробки системи програмного забезпечення. Автоматизація цих перевірок є складною, і їх найважче автоматизувати.

У тестуванні API перевірка інтерфейсів прикладних програм (API) здійснюється шляхом тестування різних параметрів якості інтерфейсів, таких як функціональність, продуктивність, надійність і безпека. Автоматизація дозволяє почати перевірки на ранній стадії, що допомагає виявити та виправити помилки та зменшити зусилля під час тестування.

Типовий розподіл задач з верифікації та валідації з використанням ШІ можна представити схематично наступним чином (див. рис. 2) [11].



Рис. 2. Верифікація та валідація з використанням ШІ

На додаток до вищезгаданих стратегій автоматизації тестування ШІ також можна застосовувати як адаптивний метод для виявлення змін на рівні елементів, засіб передбачення неправильних тестових випадків та надання рекомендацій щодо вирішення цих проблем, як інструмент побудови моделей поведінки, для імітування поведінки користувачів під час використання системи за географічним положенням, пристроями та демографічними показниками, як вхідні дані для створення наборів тестів, як засіб прогнозування та автоматизації наборів тестів, для автоматизації сценаріїв.

Методи штучного інтелекту застосовуються для обслуговування тестів автоматизації, генерації тестових даних, раннього зворотного зв'язку під час тестування тощо (див. рис.3).



Рис. 3. Типові приклади використання ШІ

Приклади ШІ-інструментів автоматизації тестування, які представлені на ринку:

- Testim (<https://www.testim.io/>). Використовує машинне навчання для розробки, виконання та обслуговування автоматизованих тестів. Перевага – швидке створення стабільних тестів з навчанням, що нівелює

необхідність постійно підтримувати тести з кожною зміною коду;

- Functionize (<https://www.functionize.com/>). Інструмент тестування із застосуванням ШІ та алгоритмів машинного навчання для автоматизації тестування. Аналізує та вивчає поведінку користувачів, а потім генерує тести, що повторюють ці дії. Він також використовує технологію самовідновлення для автоматичного виявлення та вирішення проблем;

- Appvance (<https://appvance.ai/>). Використовує автоматизацію тестування на основі ШІ. Навчається на попередніх тестах і постійно вдосконалює свої методи тестування. Може створювати складні сценарії з мінімальними витратами часу та значно покращувати традиційне написання сценаріїв;

- Testcraft (<https://home.testcraft.app/>). Ця платформа автоматизації тестування на основі ШІ підтримує регресійне тестування, а також використовується для моніторингу вебдодатків;

- Watir (<https://github.com/watir/watir>). ШІ-інструмент з відкритим кодом для автоматизації тестування на основі Ruby. Він імітує взаємодію користувача з програмами, що підтримують тестування кількох браузерів;

- ACCELQ (<https://www.accelq.com/>). Потужний безкодовий інструмент на базі штучного інтелекту, який дозволяє автоматизувати багатоканальне тестування в Інтернеті, на мобільних пристроях, настільних комп'ютерах, API та серверній частині. Підтримує безперервну автоматизацію тестування;

- Katalon (<https://katalon.com/>). ШІ-інструмент для автоматизації тестування, який надає комплексне рішення для тестування мобільних додатків і вебсайтів. Він забезпечує вбудований інтерфейс для тестування. Він має надійне сховище об'єктів, багатомовну підтримку тощо;

- Selenium (<https://www.selenium.dev/>). Інструмент з використанням ШІ для автоматизації тестування, який в основному використовується для регресійного тестування, функціонального тестування та тестування продуктивності;

- Lambda Test (<https://www.lambdatest.com/>). ШІ-інструмент, який може запускати взаємне тестування та автоматизувати тестування понад 3000 пристроїв. Хмарна система безперервного тестування, яка підтримує 120 інтеграцій, а також тестування геолокації.

Проведений аналіз існуючих інструментів довів гіпотезу, що незважаючи на широке різноманіття продуктів автоматизації з ШІ, впровадження кожного з них у процес розробки передбачає певних витрат зусиль, часу та ресурсів, при цьому забезпечуючи надлишковий функціонал для невеликих команд, які як правило, складаються з розробників та, у найкращому випадку, мануальних тестувальників.

Все це зумовило спробу визначити концепт такої системи автоматизації процесу тестування, яка б дозволяла швидко і гнучко побудувати екосистему для контролю якості розробки програмних продуктів в умовах браку фахівців відповідної кваліфікації, тим самим забезпечивши можливість гарантування базової якості продуктів будь-якого виробника.

Основні проблеми, які повинна вирішувати така система: забезпечити зрозумілий фреймворк тестування; запропонувати можливість генерації адаптивної маршрутною карти процесу з виходом на вбудовані засоби сторонні інструменти, що реалізують відповідні типи тестування. Ця система має використовувати можливості ШІ, особливо генеративного, для реалізації тих дій, для яких потрібна кваліфікація розробника (наприклад, за необхідністю, для створення юніт-тестів).

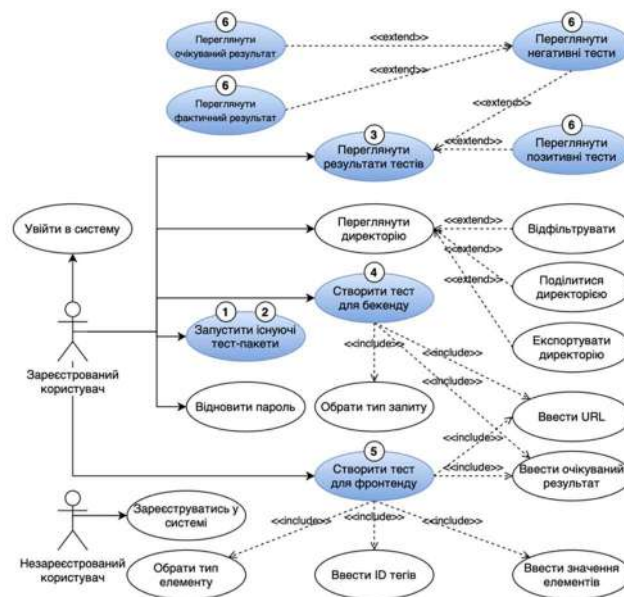


Рис. 4. UML діаграма прецедентів

Проілюструємо прикладом use-case діаграми прототипу такої системи, позначаючи елементи, для яких доцільно використання засобів ШІ.

Припустимо, що після входу в систему користувачу доступний ряд функцій. Він може переглянути вже збережені тестові набори та маніпулювати ними, тобто поділитись папкою з тестами, перейменувати, видалити, додати новий тест, експортувати або копіювати вже існуючий. Також є можливість шукати певний тестовий набір (папку) за допомогою пошукового поля. Також доступна функція перегляду та аналізу вже запущених раніше тестових компонентів, користувач може переглянути позитивні (passed) та негативні (failed) тести. У випадку якщо є негативні тести, користувач може переглянути очікуваний та фактичний результат, а також визначити розбіжності між ними.

Останні та найголовніші функції системи — це створення тестів для фронтенду та бекенду тощо. Після чого користувач матиме змогу згенерувати звіт визначеної форми (див. рис. 4).

Як видно з рисунку, інструменти штучного інтелекту будуть доречними для наступних складових системи [12].

1. Генерація маршрутної карти тестування продукту. Після входу до системи користувач вказує параметри розробки (тип продукту, архітектуру продукту, ключові функціональні та нефункціональні вимоги та інше), на підставі яких з використанням ШІ генерується Blueprint процесу тестування з посиланнями на інструментальні засоби, зовнішні чи вбудовані.

2. Розробка тестових артефактів (план тестування, тест-кейси, тестові сценарії, тестові набори даних) та формування тестових пакетів – інструменти генеративного ШІ дозволять оперувати не тільки базою знань самої системи, але й використовуючи глобальний пошук застосовувати досвід проектів інших виробників.

3. Перегляд та аналіз тестів. ШІ дозволить проводити актуалізацію тестового пакету і підтримувати їхню тестопридатність.

4. Тестування бекенду, а також розробка юніт-тестів. Автоматизована генерація коду.

5. Тестування фронтенду. Спектр можливостей ШІ описаний вище. Також може здійснюватись не тільки перевірка, але й генерування рекомендацій.

6. Генерація звітів, так само як і генерація тестових артефактів, може виконуватись зі ШІ, враховуючи формування додаткової аналітики щодо ефективності, виявлення причин і взаємозалежностей дефектів.

Безумовно, що це не повний перелік можливостей автоматизації, але достатній для підтвердження доцільності подальших досліджень і розвитку запропонованої ідеї.

Висновки. Основною проблемою сучасних систем автоматизації процесу тестування програмного забезпечення є тенденція до їхнього надмірного ускладнення. Це призводить до втрати можливості використання цих засобів розробниками, для яких

принциповими є обмеження ресурсів, доступних для процесів забезпечення якості. Дана стаття присвячена дослідженню існуючих можливостей використання технологій штучного інтелекту для організації процесів верифікації та валідації програмних продуктів, і спробі на його основі визначення необхідного і достатнього набору методів та засобів, використання яких дозволить підвищити рівень гарантування якості будь-якого проекту та суттєво знизити витрати на реалізацію таких процесів.

Список використаної літератури

- Osherove R. *The Art of Unit Testing. With Examples in C#*. New York: Manning, 2013. 292 p.
- Automation Testing – Software Testing. *GeeksForGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/automation-testing-software-testing/> (дата звернення: 09.05.2024).
- Richardson J. A. *Automating & Testing a REST API*. Hertfordshire: Compendium Developments, 2017. 450 p.
- Top Best 10 Automation Testing Tools in 2024. *Medium*. URL: <https://medium.com/@dmautomationqa/top-best-10-automation-testing-tools-in-2024-e88b0b2bf493> (дата звернення: 10.05.2024).
- Nayyar A. *Instant Approach to Software Testing Principles, Applications, Techniques, and Practices*. New Delhi: Bpb Publications, 2019. 370 p.
- Ponelat J., Rosenstock L. *Designing APIs with Swagger and OpenAPI*. New York: Manning, 2022. 424 p.
- Black R. *Advanced Software Testing - Vol. 1, 2nd Edition: Guide to the ISTQB Advanced Certification as an Advanced Test Analyst*. Los Angeles: Rocky Nook Inc., 2016. 376 p.
- Buenen M., Natarajan S. World Quality Report 2022-23. *Campgemini*. URL: <https://www.campgemini.com/wp-content/uploads/2022/10/WQR-2022-Report-Final.pdf> (дата звернення: 12.05.2024).
- Mariani L., Hao D., Subramanyan R., Zhu H. The central role of test automation in software quality assurance. *Software Quality Journal*. 2017. Vol. 25, No. 3. P. 797–802. DOI: doi.org/10.1007/s11219-017-9383-5.
- What's New in Artificial Intelligence from the 2023 Gartner Hype Cycle. *Gartner*. URL: <https://www.gartner.com/en/articles/whats-new-in-artificial-intelligence-from-the-2023-gartner-hype-cycle> (дата звернення: 12.05.2024).
- Minimol Anil Job. Automating and Optimizing Software Testing using Artificial Intelligence Techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2021. Vol. 12, No. 5. P. 594-602. DOI: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120571>.
- Wang J., Huang Y., Chen C., Liu Z., Wang S., Wang Q. Software Testing With Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2023. Vol. 50. P. 911-936. DOI: doi.org/10.1109/TSE.2024.3368208.

References (transliterated)

- Osherove R. *The Art of Unit Testing. With Examples in C#*. New York, Manning, 2013. 292 p.
- Automation Testing – Software Testing. *GeeksForGeeks*. Available at: <https://www.geeksforgeeks.org/automation-testing-software-testing/> (accessed 09.05.2024).
- Richardson J. A. *Automating & Testing a REST API*. Hertfordshire, Compendium Developments, 2017. 450 p.
- Top Best 10 Automation Testing Tools in 2024. *Medium*. Available at: <https://medium.com/best-automation-testing-tools> (accessed 10.05.2024).
- Nayyar A. *Instant Approach to Software Testing Principles, Applications, Techniques, and Practices*. New Delhi, Bpb Publications, 2019. 370 p.
- Ponelat J., Rosenstock L. *Designing APIs with Swagger and OpenAPI*. New York, Manning, 2022. 424 p.
- Black R. *Advanced Software Testing - Vol. 1, 2nd Edition: Guide to the ISTQB Advanced Certification as an Advanced Test Analyst*. Los Angeles, Rocky Nook Inc., 2016. 376 p.

8. Buenen M., Natarajan S. World Quality Report 2022-23. *Campgemini*. Available at: <https://www.campgemini.com/wp-content/uploads/2022/10/WQR-2022-Report-Final.pdf> (accessed 12.05.2024).
9. Mariani L., Hao D., Subramanyan R., Zhu H. The central role of test automation in software quality assurance. *Software Quality Journal*. 2017. Vol. 25, No. 3. pp. 797–802. DOI: doi.org/10.1007/s11219-017-9383-5.
10. What's New in Artificial Intelligence from the 2023 Gartner Hype Cycle. *Gartner*. Available at: <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-artificial-intelligence-from-the-2023-gartner-hype-cycle> (accessed 12.05.2024).
11. Minimol Anil Job. Automating and Optimizing Software Testing using Artificial Intelligence Techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2021. Vol. 12, No. 5. pp. 594-602. DOI: <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2021.0120571>.
12. Wang J., Huang Y., Chen C., Liu Z., Wang S., Wang Q. Software Testing With Large Language Models: Survey, Landscape, and Vision. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2023. Vol. 50. pp. 911-936. DOI: doi.org/10.1109/TSE.2024.3368208.

Надійшла (received) 15.05.2024

UDC 004.41+004.8

O. H. VOROCHKEK, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: olga.vorochkek@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9054-9894>

I. V. SOLOVEI, Student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: illia.solovei@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5715-2755>

RESEARCH ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS FOR AUTOMATING THE SOFTWARE TESTING PROCESS

The subject matter of the article is artificial intelligence (AI) tools for automating the software testing process. The rapid development of the software development industry in recent decades has led to a significant increase in competition in the IT technology market and, as a result, stricter requirements for corresponding products and services. AI-driven test automation is becoming increasingly relevant due to its ability to solve complex tasks that previously required significant human resources.

The goal of the work is to investigate the possibilities of using AI technologies to automate manual testing processes, which will increase testing efficiency, reduce costs, and improve software quality.

The following tasks were solved in the article: analysis of existing tools and approaches to test automation using AI; development of a conceptual model of a system that integrates AI into the testing process; exploring the potential of AI to automate various aspects of software testing, such as generating test scenarios, detecting defects, predicting errors, and automatically analyzing test results.

The following methods are used: theoretical analysis of the literature and existing solutions in the field of test automation, experimental study of the effectiveness of the proposed test automation methods.

The following results were obtained: the concept of a system that integrates AI technologies for automating software testing is presented. It has been found that the use of AI allows automating routine testing tasks, significantly reducing the number of human errors, and improving the quality of software products and the effectiveness of verification and validation processes.

Conclusions: The development and implementation of AI-based testing automation systems are extremely relevant and promising. The use of AI technologies makes it possible to significantly increase the efficiency of testing, reduce the costs of its implementation, and improve the quality of software. The proposed approach to the development of an AI-based test automation system can be used as a basis for further research and development in this field.

Keywords: Artificial Intelligence, test automation, manual testing, software quality.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Ворочек Ольга Григорівна / Vorochek Olga Hryhorivna

Автор 2 / Author 2: Соловей Ілля Владиславович / Solovei Illia Vladyslavovych

О. Ю. МЕЛЬНИКОВ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень; м. Краматорськ, Україна; e-mail: alexandr@melnikov.in.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>

В. О. ДЕНИСЕНКО, Донбаська державна машинобудівна академія, здобувачка вищої освіти, м. Краматорськ, Україна, e-mail: olegivna18@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0597-4567>

ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ РІВНЯ ЛІСИСТОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ СЕРВІСУ GLOBAL FOREST WATCH І МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ ДАНИХ R

Розглядається проблема розрахунку рівня лісистості, у тому числі – прогнозування зміни лісистості в окремому лісництві. Наведено, що автори раніше розробили програмне забезпечення для розрахунку лісистості та оброблення інформації про лісові насадження на прикладі селища Співаківка в Ізюмському районі Харківської області. Також було зроблено порівняння лісистості за низку років з використанням ресурсу Global Forest Watch. З цього ресурсу були взяті зображення Придонецького лісництва з нанесеними умовними позначеннями: синім кольором зображені території, де відбувається висадка нових лісових насаджень, а рожевим – де відбувається вирубування. Кожне із завантажених зображень обраного лісництва запропоновано розділити на квадрати, а потім аналізувати дані по кожному квадрату. Було розраховано насиченість рожевим кольором та збережено у таблиці. Зазначено, що прогнозування зміни лісових насаджень на обраній ділянці, тобто зміни відсотка вирубки, можна зробити різними шляхами. По-перше, використати регресійний аналіз – застосувати рівняння регресії окремо до значень кожного квадрату, а також для усього лісництва. По-друге – сформулювати перелік вхідних факторів, що містять показники на обраній ділянці у два попередні роки та ці ж показники на сусідніх ділянках. Таким чином, кількість факторів буде дорівнювати 27: 26 вхідних та 1 вихідний (значення на досліджуваному квадраті). Таку задачу прогнозування можна розв'язати або методом багатофакторної лінійної регресії, або методом штучних нейронних мереж. Для проведення розрахунків за обома методами було використано мову програмування та аналізу даних R. Створено скрипт, який виконує розрахунки побудовою лінійної регресії та штучної нейронної мережі, а також дозволяє визначити найкращу архітектуру нейронної мережі та більш ефективний метод її навчання для певного набору даних. Наведено розрахунок динаміки вирубки у цілому лісництві (прогноз на останній рік забезпечує похибку в 1 %) та розрахунок динаміки вирубки на обраному квадраті (прогноз на останній рік забезпечує похибку в 3.5 %). Після численних запусків скрипту з'ясовано, що найкращий результат забезпечує перцептрон з двома прихованими шарами та двома нейронами у кожному шарі. Результати розрахунків свідчать про високу кореляцію даних для визначення відсотка лісу, який буде вирубуватися на визначеному квадраті. Застосування цього перцептрону для прогнозування на останній рік показало похибку в 3 %.

Ключові слова: рівень лісистості, вирубування лісу, Global Forest Watch, кольорова насиченість, прогнозування, регресійний аналіз, штучні нейронні мережі, мова R

Вступ. В Україні питання збереження лісів регулюється низкою законодавчих актів [1]. Створення та використання спеціалізованого програмного забезпечення для оцінювання лісистості, оброблення інформації про лісові насадження та виявлення незаконної вирубки лісу, прогнозування зміни лісистості в окремому лісництві може стати суттєвим помічником у цьому напрямку.

Огляд літератури. Застосування математичного моделювання та інформаційних технологій для обробки інформації про лісові насадження можна зустріти у низці наукових праць. Так, автори [2] аналізують питання впливу показників заповідності та лісистості території окремих територіальних одиниць як основних індикаторів оцінки стану довкілля з метою знаходження шляхів щодо збільшення площі природно-заповідного фонду Полтавщини, виконують порівняльний аналіз індикаторів оцінки стану навколишнього природного середовища окремих громад між собою та із рівнем значень даних показників державного та європейського рівня.

У роботі [3] для дослідження обсягів порушень намету деревостанів в Українських Карпатах упродовж 1984–2016 рр. використано часові ряди зображень, отриманих із супутникових знімків проекту «Landsat» із застосуванням засобу візуалізації «TimeSync». Автори розраховали середню лісистість для всієї

досліджуваної території та навели перелік основних порушень, що були пов'язані як з антропогенними, так і з природними чинниками.

У роботі [4] досліджено стан лісових ресурсів України, побудовано імітаційну модель системної динаміки їхнього колообігу, визначено основні чинники впливу на розвиток лісового фонду та наслідки управління ним, здійснено прогнози основних показників лісового колообігу.

Роботи авторів та постановка задачі. Автори розробили програмне забезпечення для розрахунку лісистості та оброблення інформації про лісові насадження [5] на прикладі селища Співаківка в Ізюмському районі Харківської області [6]. Також було зроблено порівняння лісистості за низку років [7], для чого було використано ресурс Global Forest Watch (Всесвітня лісова карта) [8] – вебдодаток для моніторингу лісового покриття планети в реальному масштабі часу. На цьому сайті опубліковано фотографії із супутників NASA за 13 років, алгоритми обробки зображень дозволяють детально підрахувати обсяги втрачених та вирослих лісів на кожній території та в кожній країні по роках.

З даного ресурсу були взяті зображення Придонецького лісництва (рис. 1) з нанесеними умовними позначеннями: синім кольором зображені території, де відбувається висадка нових лісових насаджень, а рожевим – де відбувається вирубування.

© Мельников О. Ю., Денисенко В. О., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



Щоб визначити відсоток вирубки, необхідно розрахувати у відсотковому співвідношенні кількість рожевого кольору щодо інших. Формула знаходження відсотка вирубки за допомогою ресурсу Global Forest Watch:

$$V = \frac{P_r}{P_z} \cdot 10 \quad (1)$$

де V – відсоток вирубки;
 P_r – кількість пікселів рожевого кольору;
 P_z – загальна кількість пікселів на зображенні.

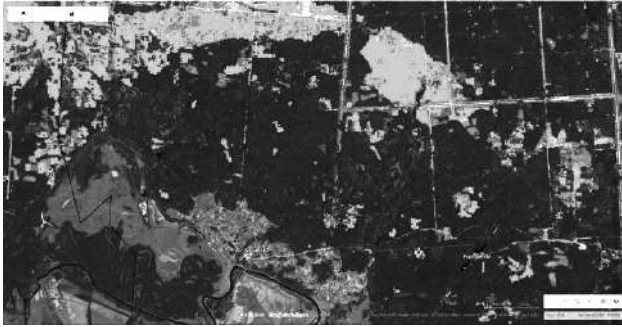


Рис. 1. Фото Придонецького лісництва у 2011 році

Оскільки нас цікавить не тільки загальна ситуація у лісництві [6], але і ситуація на окремих ділянках, кожне із завантажених зображень можна розділити на квадрати, а потім аналізувати дані по кожному квадрату (рис. 2). Для кожного квадрату було розраховано насиченість рожевим кольором (рис. 3) та збережено у таблиці (рис. 4) [9–10].



Рис. 2. Розподілення фото лісництва на 9 квадратів

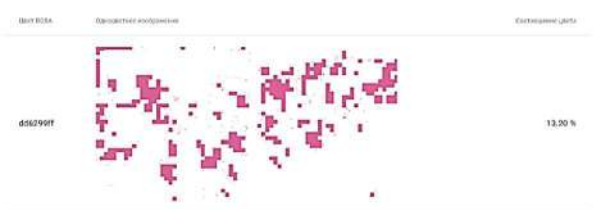


Рис. 3. Насиченість рожевим кольором для квадрата 11 за 2011 рік

Далі постає питання прогнозування зміни лісових насаджень на обраній ділянці, тобто зміни відсотка лісистості, або, навпаки, зміни відсотка вирубки.

Це можна зробити різними шляхами. По-перше, використати регресійний аналіз – застосувати рівняння регресії (лінійне, поліноміальне, експоненціальне тощо) окремо до значень кожного квадрату, а також для усього лісництва. Як показано на рис. 5, для прогнозування відсотка вирубки на усьому лісництві підходить лінійне рівняння (коефіцієнт певності апроксимації при цьому дорівнює 0.9845, що є гарним показником). Але для прогнозування на окремому

квадраті лінійне рівняння вже не підходить (коефіцієнт достовірності апроксимації $R^2 = 0.67$); найкращий показник у нашому випадку забезпечує експоненціальне рівняння ($R^2 = 0.74$). Можна підібрати «найкраще» рівняння для кожного квадрату.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|-------|-------|------|-------|--|------|-------|-------|------|-------|--|------|-------|-------|------|-------|--|
| 2011 | 13,2 | 14,75 | 2,46 | | | 2012 | 13,12 | 14,72 | 2,48 | | | 2013 | 13,12 | 15,01 | 2,39 | | |
| | 0,74 | 0,39 | 1,16 | 9,64 | | | 1,34 | 0,39 | 1,53 | 10,17 | | | 1,2 | 0,43 | 1,72 | 10,4 | |
| | 0 | 0,22 | 0,17 | | | | 0 | 0,29 | 0,38 | | | | 0 | 0,32 | 0,61 | | |
| 2014 | 13,02 | 14,98 | 2,02 | | | 2015 | 13,87 | 13,7 | 0,25 | | | 2016 | 13,5 | 14,98 | 2,54 | | |
| | 2,09 | 0,41 | 1,86 | 10,75 | | | 1,78 | 2,06 | 2,21 | 11,05 | | | 3,17 | 0,85 | 3,28 | 11,73 | |
| | 0 | 0,17 | 0,71 | | | | 0 | 0,27 | 1,42 | | | | 0 | 0,25 | 1,82 | | |
| 2017 | 13,38 | 15,05 | 2,29 | | | 2018 | 13,47 | 15,02 | 2,29 | | | 2019 | 13,19 | 14,93 | 2,27 | | |
| | 3,82 | 0,88 | 3,09 | 11,88 | | | 3,03 | 1,91 | 3,34 | 12,64 | | | 3,27 | 1,81 | 3,23 | 12,77 | |
| | 0,001 | 0,2 | 1,86 | | | | 0,01 | 0,21 | 1,86 | | | | 0,001 | 0,33 | 1,9 | | |
| 2020 | 12,93 | 15,85 | 2,32 | | | 2021 | 13,45 | 15,54 | 2,39 | | | | | | | | |
| | 3,37 | 1,91 | 3,83 | 13,04 | | | 3,42 | 2,04 | 3,7 | 13,34 | | | | | | | |
| | 0,002 | 0,27 | 2,04 | | | | 0,001 | 0,35 | 2,06 | | | | | | | | |

Рис. 4. Зведені дані по відсоткам вирубування за 2011–2021 роки

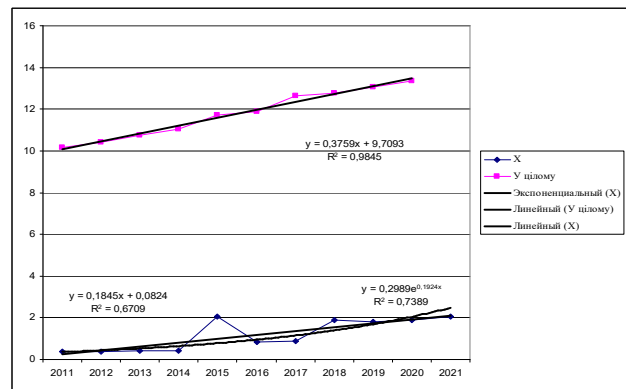


Рис. 5. Прогнозування рівняннями регресії

Інший шлях – формування переліку вхідних факторів. Як вхідні фактори можна розглядати, по-перше, показники на обраній ділянці у попередні роки (нехай це значення буде дорівнювати двом), а по-друге, ці ж показники на сусідніх ділянках [11]. Оскільки ми маємо значення по 9 (0.8) квадратах за три роки, то кількість факторів буде дорівнювати 27: 26 вхідних та 1 вихідний (значення на досліджуваному квадраті):

$$Y = F(X_{0m1}, X_{0m2}, X_{11}, X_{11m1}, \dots, X_{33m2}) \quad (2)$$

Після обробки даних з рис. 4 за формулою (2) отримаємо результат, що наведено на рис. 6.

Таку задачу прогнозування можна розв’язати різними математичними методами, наприклад, методом багатофакторної лінійної регресії або методом штучних нейронних мереж [12].

Результати розрахунків. Для проведення розрахунків за обома методами було використано мову програмування та аналізу даних R [13]. Створено скрипт, який виконує розрахунки побудовою лінійної регресії та штучної нейронної мережі, а також дозволяє визначити найкращу архітектуру нейронної мережі та більш ефективний метод її навчання для певного набору даних.

| Рік | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------|--------|--------|------|------|------|
| 2013 | 0.43 | 0.39 | 0.39 | 13.12 | 13.12 | 13.2 | 15.01 | 14.72 | 14.75 | 2.39 | 2.48 | 2.46 | 1.2 | 1.34 | 0.74 | 1.72 | 1.53 | 1.16 | 0 | 0 | 0 | 0.32 | 0.29 | 0.22 |
| 2014 | 0.41 | 0.43 | 0.39 | 13.02 | 13.12 | 13.12 | 14.98 | 15.01 | 14.72 | 2.02 | 2.39 | 2.48 | 2.09 | 1.2 | 1.34 | 1.86 | 1.72 | 1.53 | 0 | 0 | 0 | 0.17 | 0.32 | 0.29 |
| 2015 | 2.06 | 0.41 | 0.43 | 13.87 | 13.02 | 13.12 | 13.7 | 14.98 | 15.01 | 0.25 | 2.02 | 2.39 | 1.78 | 2.09 | 1.2 | 2.21 | 1.86 | 1.72 | 0 | 0 | 0 | 0.27 | 0.17 | 0.32 |
| 2016 | 0.85 | 2.06 | 0.41 | 13.5 | 13.87 | 13.02 | 14.98 | 13.7 | 14.98 | 2.54 | 0.25 | 2.02 | 3.17 | 1.78 | 2.09 | 3.28 | 2.21 | 1.86 | 0 | 0 | 0 | 0.25 | 0.27 | 0.17 |
| 2017 | 0.88 | 0.85 | 2.06 | 13.38 | 13.5 | 13.87 | 15.05 | 14.98 | 13.7 | 2.29 | 2.54 | 0.25 | 3.82 | 3.17 | 1.78 | 3.09 | 3.28 | 2.21 | 0.001 | 0 | 0 | 0.2 | 0.25 | 0.27 |
| 2018 | 1.91 | 0.88 | 0.85 | 13.47 | 13.38 | 13.5 | 15.02 | 15.05 | 14.98 | 2.29 | 2.29 | 2.54 | 3.03 | 3.82 | 3.17 | 3.34 | 3.09 | 3.28 | 0.01 | 0.001 | 0 | 0.21 | 0.2 | 0.25 |
| 2019 | 1.81 | 1.91 | 0.88 | 13.19 | 13.47 | 13.38 | 14.93 | 15.02 | 15.05 | 2.27 | 2.29 | 2.29 | 3.27 | 3.03 | 3.82 | 3.23 | 3.34 | 3.09 | 0.0014 | 0.01 | 0.001 | 0.33 | 0.21 | 0.2 |
| 2020 | 1.91 | 1.81 | 1.91 | 12.93 | 13.19 | 13.47 | 15.85 | 14.93 | 15.02 | 2.32 | 2.27 | 2.29 | 3.37 | 3.27 | 3.03 | 3.83 | 3.23 | 3.34 | 0.0016 | 0.0014 | 0.01 | 0.27 | 0.33 | 0.21 |
| 2021 | 2.04 | 1.91 | 1.81 | 13.45 | 12.93 | 13.19 | 15.54 | 15.85 | 14.93 | 2.39 | 2.32 | 2.27 | 3.42 | 3.37 | 3.27 | 3.7 | 3.83 | 3.23 | 0.0014 | 0.0016 | 0.0014 | 0.35 | 0.27 | 0.33 |

Рис. 6. Оброблені дані для прогнозування

Розрахунок динаміки вирубки у цілому лісництві наведено в табл. 1. Можна побачити, що прогноз на останній рік забезпечує похибку в 1 %.

Таблиця 1 – Результати прогнозування вирубки у цілому лісництві

| Рік | Y | Прогноз | Похибка |
|------|-------|---------|----------|
| 2011 | 9.64 | 9.687 | 0.004904 |
| 2012 | 10.17 | 10.066 | 0.010190 |
| 2013 | 10.40 | 10.445 | 0.004371 |
| 2014 | 10.75 | 10.825 | 0.006934 |
| 2015 | 11.05 | 11.204 | 0.013904 |
| 2016 | 11.73 | 11.583 | 0.012555 |
| 2017 | 11.88 | 11.962 | 0.006887 |
| 2018 | 12.64 | 12.341 | 0.023662 |
| 2019 | 12.77 | 12.720 | 0.003915 |
| 2020 | 13.04 | 13.099 | 0.004532 |
| 2021 | 13.34 | 13.478 | 0.010358 |

Розрахунок динаміки вирубки на обраному квадраті наведено в табл. 2. Можна побачити, що прогноз на останній рік забезпечує похибку в 3.5 %.

Таблиця 2 – Результати прогнозування вирубки на обраному квадраті

| Рік | Y | Прогноз | Похибка |
|------|------|---------|----------|
| 2011 | 0.39 | 0.2668 | 0.315851 |
| 2012 | 0.39 | 0.4513 | 0.157110 |
| 2013 | 0.43 | 0.6357 | 0.478436 |
| 2014 | 0.41 | 0.8202 | 1.000443 |
| 2015 | 2.06 | 1.0046 | 0.512312 |
| 2016 | 0.85 | 1.1891 | 0.398930 |
| 2017 | 0.88 | 1.3735 | 0.560847 |
| 2018 | 1.91 | 1.5580 | 0.184293 |
| 2019 | 1.81 | 1.7425 | 0.037318 |
| 2020 | 1.91 | 1.9269 | 0.008853 |
| 2021 | 2.04 | 2.1114 | 0.034982 |

Після численних запусків скрипту для різних параметрів кількості прихованих шарів та кількості нейронів у них з'ясовано, що найкращий результат забезпечує перцептрон з двома прихованими шарами та двома нейронами у кожному шарі (рис. 7). Результати розрахунків, що зведені до табл. 3, свідчать про високу кореляцію даних для визначення відсотка лісу, який буде вирубуватися на визначеному квадраті. Застосування цього перцептрону для прогнозування на останній рік показало похибку в 3 % (табл. 4).

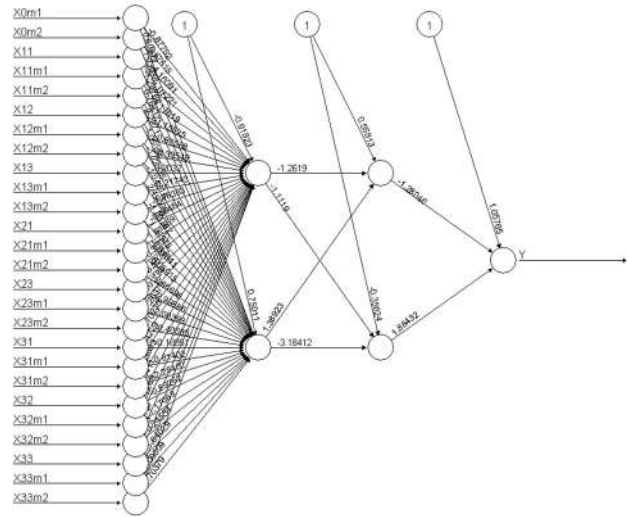


Рис. 7. Архітектура нейронної мережі

Таблиця 3 – Результати прогнозування тестової множини

| N | Y | Прогноз | Похибка |
|---|------|---------|---------|
| 1 | 0.43 | 0.4451 | 0.00917 |
| 6 | 1.91 | 1.8098 | 0.06075 |
| 9 | 2.04 | 1.9290 | 0.06730 |

Таблиця 4 – Результати прогнозування на обраному квадраті MLP 26x2x2x1

| Рік | Y | Прогноз | Похибка |
|------|------|---------|---------|
| 2011 | 2.04 | 1.99 | 0.03097 |

Висновки. Наведено математичну модель та розрахунки прогнозування зміни рівня лісистості за допомогою сервісу Global Forest Watch і мови програмування та аналізу даних R. Використано регресійний аналіз – застосовано рівняння регресії окремо до значень кожного квадрату, а також для усього лісництва. Сформовано перелік входних факторів, що містять показники на обраній ділянці у два попередні роки та ці ж показники на сусідніх ділянках. Другу задачу прогнозування розв'язано методами багатоваріантної лінійної регресії та методом штучних нейронних мереж. Створено скрипт мовою програмування та аналізу даних R, який виконує розрахунки ціми методами, а також дозволяє визначити найкращу архітектуру нейронної мережі та більш ефективний метод її навчання для певного набору даних. Наведено розрахунок динаміки вирубки у цілому лісництві (прогноз на останній рік забезпечує похибку в 1 %) та розрахунок динаміки вирубки на обраному квадраті (прогноз на останній рік забезпечує похибку в 3.5 %).

З'ясовано, що найкращий результат забезпечує перцептрон з двома прихованими шарами та двома нейронами у кожному шарі. Результати розрахунків свідчать про високу кореляцію даних для визначення відсотка лісу, який буде вирубуватися на визначеному квадраті. Застосування цього перцептрон для прогнозування на останній рік показало похибку в 3 %.

Список використаної літератури

1. Знищення лісів: причини і наслідки. URL: <https://tvr.biographiya.com/znishhennya-lisiv-prichini-i-naslidki/> (дата звернення: 21.03.2024).
2. Голік Ю. С., Чепурко Ю. В., Смоляр Н. О. Показники лісистості та заповідності територій, як одні з базових індикаторів оцінки екологічної безпеки. *Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій – 2022*: Дніпро: Середняк Т. К., 2022. С. 21–30.
3. Часковський О. Г., Карабчук Д. Ю., Іванюк А. П. Зміни лісового вкриття Українських Карпат за період 1984–2016 років. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 2. С. 9–14.
4. Негрей М. В., Гнот Т. В. Моделювання динаміки лісових ресурсів України. *Збірник науково-технічних праць «Науковий вісник НЛТУ України»*. 2014, вип. 24.9. С. 347–355.
5. Мельников О. Ю., Денисенко В. О. Програмне забезпечення для розрахунку лісистості та оброблення інформації про лісові насадження. *Збірник матеріалів III Міжнародної науково-практичної конференції «Використання інформаційних технологій для оптимізації процесів виробництва сільськогосподарської продукції та управління підприємствами» (Агро-ІТ)*, (м. Київ, 23-24 березня 2023 р.) / Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. Київ, 2023. С. 39–42.
6. Співаківка (Ізюмський район). *Вікіпедія*. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Співаківка_\(Ізюмський_район\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Співаківка_(Ізюмський_район)) (дата звернення: 21.03.2024).
7. Денисенко В. О., Мельников О. Ю. Дослідження збільшення вирубки лісу на території Придонецького лісництва. *Сучасні комп'ютерні системи та мережі в управлінні: матеріали VI Всеукраїнської наук.-практ. Інтернет-конф. здобувачів вищої освіти та молодих вчених (30 листопада 2023 р., м. Хмельницький, м. Херсон) / за ред. А. А. Григорової*. Херсон: Книжкове видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2023. С. 161–163.
8. *Global Forest Watch*. URL: <https://www.globalforestwatch.org/> (дата звернення: 21.03.2024).
9. Мельников О. Ю., Денисенко В. О. Дослідження зміни вирубування лісу за допомогою додатка власної розробки та сервісу Global Forest Watch. *Збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції «Використання інформаційних технологій для оптимізації процесів виробництва сільськогосподарської продукції та управління підприємствами» (Агро-ІТ)*, (м. Київ, 28-29 березня 2024 р.) / Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. Київ, 2024. У друку.
10. *Обробка фото онлайн*. URL: <https://www.imgonline.com.ua/cut-photo-into-pieces-result.php> (дата звернення: 21.03.2024).
11. Мельников О. Ю., Денисенко В. О. Задача прогнозування зміни щільності лісових насаджень. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції*. Черкаси, 2024. С. 347–349.
12. Гітис В. Б. *Нейромережні технології: навчальний посібник*. Краматорськ: ДДМА, 2021. 248 с.
13. Мельников О. Ю. *R – мова програмування та аналізу даних: навчальний посібник для здобувачів вищої освіти за спеціальностями «Системний аналіз» та «Інформаційні системи та технології»*. Краматорськ: ДДМА, 2023. 272 с.
1. *Znyshhennya lisiv: prychny i naslidky* [Deforestation: causes and consequences]. Available at: <https://tvr.biographiya.com/znishhennya-lisiv-prichini-i-naslidki/> (accessed 21.03.2024).
2. Golik Yu. S., Chepurko Yu. V., Smolyar N. O. Pokaznyky lisystosti ta zapovidnosti terytorij, yak odni z bazovyx indyikatoriv ocinky ekologichnoyi bezpeky [Indicators of forest cover and protected areas, as one of the basic indicators of environmental safety assessment]. *Podolannya ekologichnyx ryzykiv ta zagroz dlya dovkillya v umovax nadzvychajnyx sytuacij – 2022: kol. monogr.* [Overcoming ecological risks and threats to the environment in emergency situations – 2022]. Dnipro: Serednyak T. K. Publ., 2022, pp. 21–30.
3. Chaskovskyy O. G., Karabchuk D. Yu., Ivanyuk A. P. Zminy lisovogo vkrystta Ukrayinskyx Karpat za period 1984–2016 rokiv [Changes in the forest cover of the Ukrainian Carpathians for the period 1984–2016]. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny* [Scientific bulletin of NLTU of Ukraine]. 2019, vol. 29, no. 2, pp. 9–14.
4. Negrej M. V., Gnot T. V. Modelyuvannya dynamiky lisovyx resursiv Ukrayiny [Modeling the dynamics of forest resources of Ukraine]. *Zbirnyk nauково-technichnyx pracz «Naukovyy visnyk NLTU Ukrayiny»* [Collection of scientific and technical works "Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine"]. 2014, issue 24.9, pp. 347–355.
5. Melnykov O. Yu., Denysenko V. O. Programme zabezpechennya dlya rozrahunku lisystosti ta obroblyennya informaciyi pro lisovi nasadzhennya [Software for calculating forest cover and processing information about forest stands]. *Zbirnyk materialiv III Mizhnarodnoyi nauково-praktychnoyi konferenciyi «Vykorystannya informacijnyx tehnologij dlya optimizaciyi procesiv vyrobnyctva silskogospodarskoyi produkciyi ta upravlinnya pidpryyemstvamy» (Agro-IT)*, (m. Kyiv, 23-24 bereznya 2023 r.) / Sxidnoukrayinskij nacionalnyj universytet imeni Volodymyra Dalya [Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference "Using Information Technologies for Optimizing the Processes of Agricultural Production and Enterprise Management" (Agro-IT), (Kyiv, March 23-24, 2023) / Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dal]. Kyiv, 2023, pp. 39–42.
6. *Spivakivka (Izyumskyy rajon)*. *Vikipediya* [Spivakivka (Izyum district)]. Wikipedia. Available at: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Співаківка_\(Ізюмський_район\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Співаківка_(Ізюмський_район)) (accessed 21.03.2024).
7. Denysenko V. O., Melnykov O. Yu. Doslidzhennya zbilshennya vyrubky lisu na terytoriyi Prydoneczkogo lisyntstva [Research on the increase in deforestation in the territory of the Prydonetsk Forestry]. *Suchasni kompyuterni systemy ta merezhi v upravlinni: materialy VI Vseukrayinskoyi nauk.-prakt. Internet-konf. zdobuvachiv vyshhoyi osvity ta molodyx vchenykh (30 lystopada 2023 r., m. Xmelnytskyj, m. Xerson) / za red. A. A. Grygorovoyi* [Modern computer systems and networks in management: materials of the VI All-Ukrainian Science-Practice. Internet Conf. of higher education graduates and young scientists (November 30, 2023, Khmelnytskyi, Kherson) / edited by A. A. Grigороva]. Kherson: Book publishing house FOP Vyshemyrskyy V.S. Publ., 2023, pp. 161–163.
8. *Global Forest Watch*. Available at: <https://www.globalforestwatch.org/> (accessed 21.03.2024).
9. Melnykov O. Yu., Denysenko V. O. Doslidzhennya zminy vyrubuvannya lisu za dopomogyu dodatka vlasnoyi rozrobky ta servisu Global Forest Watch [Investigating changes in deforestation using a self-developed app and Global Forest Watch service.]. *Zbirnyk materialiv IV Mizhnarodnoyi nauково-praktychnoyi konferenciyi «Vykorystannya informacijnyx tehnologij dlya optimizaciyi procesiv vyrobnyctva silskogospodarskoyi produkciyi ta upravlinnya pidpryyemstvamy» (Agro-IT)*, (m. Kyiv, 28-29 bereznya 2024 r.) / Sxidnoukrayinskij nacionalnyj universytet imeni Volodymyra Dalya [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Using Information Technologies for Optimizing the Processes of Agricultural Production and Management of Enterprises" (Agro-IT), (Kyiv, March 28-29, 2024) / Eastern Ukrainian National University named after Volodymyr Dal]. Kyiv, 2024. In print.
10. *Obrobka foto onlajn* [Online photo processing]. Available at: <https://www.imgonline.com.ua/cut-photo-into-pieces-result.php> (accessed 21.03.2024).
11. Melnykov O. Yu., Denysenko V. O. Zadacha prognozuvannya zminy shhilnosti lisovyx nasadzen [The problem of forecasting changes in the density of forest stands]. *Avtomatyzaciya ta kompyuterno-integrovani tehnologiyi u vyrobnyctvi ta osviti: stan, dosyagnennya, perspektyvy rozvytku: materialy Vseukrayinskoyi nauково-*

References (transliterated)

1. *Znyshhennya lisiv: prychny i naslidky* [Deforestation: causes and consequences]. Available at: <https://tvr.biographiya.com/znishhennya-lisiv-prichini-i-naslidki/>

- praktychnoyi Internet-konferenciyi* [Automation and computer-integrated technologies in production and education: state, achievements, development prospects: materials of the All-Ukrainian scientific and practical Internet conference]. Cherkasy, 2024, pp. 347–349.
12. Gitis V. B. *Nejromereshni tehnologiyi: navchalnyj posibnyk* [Neural network technologies: a tutorial]. Kramatorsk: DDMA Publ., 2021. 248 p.
13. Melnykov O. Yu. *R – mova programuvannya ta analizu danyx: navchalnyj posibnyk dlya zdobuvachiv vyshhoyi osvity za specialnostyamy «Systemnyj analiz» ta «Informacijni systemy ta tehnologiyi»* [R – the language of programming and data analysis: a study guide for students of higher education majoring in "System Analysis" and "Information Systems and Technologies"]. Kramatorsk: DDMA Publ., 2023. 272 p.

Надійшла (received) 30.04.2024

UDC 004.41:502.57

O. Yu. MELNYKOV, Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Donbas State Engineering Academy, Associate Professor at the Department of Intelligent Decision Making Systems; Kramatorsk, Ukraine; e-mail: alexandr@melnikov.in.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>

V. O. DENYSENKO, Donbas State Engineering Academy, Student, Kramatorsk, Ukraine, e-mail: olegivna18@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0597-4567>

FORECASTING CHANGE IN THE LEVEL OF FOREST COVERAGE USING THE GLOBAL FOREST WATCH SERVICE AND THE PROGRAMMING AND DATA ANALYSIS LANGUAGE R

The problem of calculating the level of forest cover is considered, including forecasting changes in forest cover in individual forestry. It is stated that the authors previously developed software for calculating forest cover and processing information about forest plantations using the example of the village of Spivakivka in the Izyum district of the Kharkiv region. A comparison of forest cover over a number of years was also made using the Global Forest Watch resource. From this resource, images of Prydonetsk Forestry were taken with conventional designations: areas where new forest plantations are being planted are shown in blue, and areas where cutting is taking place are shown in pink. It is proposed to divide each of the uploaded images of the selected forestry into squares, and then analyze the data for each square. The pink color saturation was calculated and stored in the table. It is noted that forecasting the change in forest stands on the selected site, that is, the change in the percentage of felling, can be done in different ways. First, use regression analysis - apply the regression equation separately to the values of each square, as well as to the entire forestry. Secondly, to form a list of input factors containing indicators on the selected plot in the two previous years and the same indicators on neighboring plots. Thus, the number of factors will be equal to 27: 26 input and 1 output (values on the studied square). Such a forecasting problem can be solved either by the method of multivariate linear regression or by the method of artificial neural networks. The R programming and data analysis language was used to perform calculations using both methods. A script was created that performs calculations by constructing regression lines and an artificial neural network, and also allows determining the best architecture of a neural network and a more effective method of its training for a certain data set. The calculation of the felling dynamics in the entire forestry (the forecast for the last year provides an error of 1 %) and the calculation of the felling dynamics in the selected square (the forecast for the last year provides an error of 3.5 %) are given. After many runs of the script, it was found that the best result is provided by a perceptron with two hidden layers and two neurons in each layer. The results of the calculations indicate a high correlation of the data for determining the percentage of forest that will be cut down in a certain square. Application of this perceptron for forecasting for the last year showed an error of 3 %.

Keywords: level of forest cover, deforestation, Global Forest Watch, color saturation, forecasting, regression analysis, artificial neural networks, R language.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Мельников Олександр Юрійович, Melnykov Oleksandr Yuriyovych

Автор 2 / Author 2: Денисенко Вікторія Олегівна, Denysenko Viktoriia Olegivna

В. О. ШАРОВ, аспірант кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3152-0650>; e-mail: wuyctpiy@gmail.com

О. М. НИКУЛІНА, д-р техн. наук, професор, завідувачка кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

ДВОРІВНЕВА КОНЦЕПЦІЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЄДИНОЇ ЗАВАДОСТІЙКОЇ ПЕРЕДАЧІ ЦИФРОВИХ ДАНИХ

У статті формалізується, створюється та надається для розглядання концепція єдиного безпечного завадостійкого каналу передачі цифрових даних. У сучасній теорії та практиці з кібербезпеки існує набір рекомендацій по зниженню ризиків для організацій NIST Cybersecurity Framework. Для того, щоб дані високого рівня були безпечними, висуваються вимоги для CIA-тріади, а саме до конфіденційності, цілісності та доступності інформації. Тому, у подальшому доцільність роботи та її результат напряду будуть залежати від задоволення виконання CIA-умов. Як відомо, дані високого рівня: як e-mail, візуальні дані у GUI різних додатків, тощо, передаються по каналам зв'язку низького рівня: як кабелі, бездротові канали радіозв'язку та інші. На кожному з рівнів для безпечної передачі інформації існують специфічні шкідники. На високих рівнях основною загрозою для інформації є людина та людський фактор. Чим нижче стає рівень передачі інформації, тим більше починає впливати природа, натуральні перепони і випадкові короткі явища. Для того, щоб користувач міг без загрози для конфіденційності, цілісності та доступності інформації користуватись різноманітними приладами, необхідно активно і безперервно розробляти, вдосконалювати та покращувати вже існуючі способи захисту, відновлення, передачі та зберігання даних. Кожний аспект у цій боротьбі за безпеку є як і перевагою так і недоліком: надлишкова безпечність не доцільна для масового трафіку, складність не завжди надає відповідну захищеність і так далі. Тому важливим фактором постає оптимальність і доцільність методів, що використовуються для передачі даних. З цих причин, у роботі пропонується відносно простий, але не менш ефективний від того підхід для збереження CIA-вимог.

Ключові слова: завадостійкість, завадостійкі коди, безпека даних, канали передачі даних, VPN, CIA, NIST, OWASP.

Вступ. Розвиток моделей і методів забезпечення безпеки цифрової інформації є надзвичайно важливим напрямком інформаційних технологій, пов'язаним із захистом особистих даних, фінансової інформації, інтелектуальної власності та загальною безпекою держав і організацій. Відсутність належної безпеки для інформації може спричинити великі ризики від втрати інформації і негативні наслідки від її використання супротивниками [1–3].

Важливим є забезпечення безперервного удосконалення засобів безпеки цифрової інформації, адже це забезпечує захист особистих даних, фінансів, інтелектуальної власності, підтримання операційної та національної безпеки.

Захист особистих даних забезпечує конфіденційність та приватність інформації. Конфіденційність полягає у забезпечення того, що особисті дані користувачів (медичні записи, фінансові дані, адреси) залишаються конфіденційними і не потрапляють до рук зловмисників. Право на приватність надає користувачам можливість контролювати доступ до їхніх особистих даних та їх використання.

Захист фінансів забезпечує захист від крадіжок та шахрайства. Захист від крадіжок протидіє хакерам, які можуть отримати доступ до банківських рахунків, кредитних карток, криптовалютних гаманців, що може призвести до фінансових втрат для окремих осіб та організацій. Безпека даних допомагає запобігти фінансовим шахрайствам, які можуть бути вчинені через викрадену інформацію.

Захист інтелектуальної власності забезпечує захист комерційних таємниць і збереження конкурентних переваг. Комерційна таємниця даних повинна

забезпечуватись, тому що багато компаній мають інтелектуальну власність (патенти, авторські права, комерційні таємниці), яка є критично важливою для їхнього успіху на ринку. Конкурентні переваги надаються шляхом захисту інформації про розробки, дослідження та стратегії компаній від конкурентів.

Підтримання операційної безпеки забезпечує безперервність бізнесу і протидіє репутаційним ризикам. Безперервність бізнесу може бути порушена тим, що витоки даних можуть призвести до зупинки роботи компаній, порушення логістичних ланцюгів та інших операційних проблем. Витік або компрометація даних може серйозно пошкодити репутацію компанії або організації та привести до репутаційних ризиків.

Підтримання національної безпеки протидіє кібертероризму і шпигунству. Держави та організації можуть бути атаковані хакерами з метою порушення роботи критичної інфраструктури, таких як енергетичні системи, транспорт, фінансові системи. Викрадення державних та військових секретів може поставити під загрозу національну безпеку та суверенітет країни.

При відсутності безпеки для інформації, будь-яка організація сприяє підвищенню ризиків, серед яких кіберзлочини, масові витоки інформації, фінансові збитки, порушення приватності, конкурентних переваг.

Кіберзлочини – витоки даних, зломи, шантаж та інші форми кіберзлочинності, які можуть спричинити фінансові втрати та шкоду репутації.

Масові витоки інформації, що можуть призвести до розголошення особистих даних мільйонів

© Шаров В. О., Нікуліна О. М., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом НТУ «ХПІ» у збірнику «Вісник Національного технічного університету "ХПІ" Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Конфлікт інтересів: Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



користувачів, що може спричинити масштабні юридичні наслідки та втрату довіри.

Фінансові збитки – витрати на ліквідацію наслідків атак, штрафи за недотримання законодавства про захист даних (наприклад, GDPR в Європі), втрати від крадіжок і шахрайств.

Порушення приватності – неконтрольований доступ до особистих даних може призвести до порушення приватного життя користувачів, шантажу та інших форм зловживань.

Втрата конкурентних переваг – викрадення або компрометація інтелектуальної власності може призвести до втрати конкурентних переваг на ринку.

Отже, робота над безпекою цифрової інформації є критично важливою для захисту даних, забезпечення безперервності бізнесу, збереження конкурентних переваг та загальної безпеки суспільства [2, 3].

Мета та задачі дослідження. Мета даної статті полягає у аналізі способів підтримання безпеки передачі інформації, розробці моделі єдиної концепції безпечної та завадостійкої передачі даних для інформаційної технології оптимізації управління динамічними системами.

Для досягнення мети поставлені задачі дослідження:

- 1) проаналізувати перешкоди для безпечної передачі даних;
- 2) проаналізувати методи боротьби з перешкодами;
- 3) розробити модель захисту цифрової інформації від усіх типів перешкод.

Перешкоди безпечної передачі даних та методи захисту. Перепоми для цілісної та конфіденційної передачі інформації можуть бути як штучними так і натуральними. Штучні перешкоди виникають переважно, коли зловмисники втручаються в процес передачі інформації. Натуральні перешкоди відбуваються коли сигнал, що передається, затухає при передачі, трапляються помилки при кодуванні, тощо.

Перешкоди для безпечної передачі цифрових даних можуть включати різні загрози, вразливості та технічні проблеми [3].

Загрози та вразливості створюються кіберзлочинцями, зловмисним програмним забезпеченням, перехопленням даних. Хакери використовують вразливості в програмному забезпеченні або мережах для несанкціонованого доступу до даних. Фішинг виконується шахрайськими методами для обману користувачів з метою отримання конфіденційної інформації, такої як паролі або фінансові дані.

Зловмисне програмне забезпечення – віруси, трояни, руткіти може викрадати або пошкоджувати дані. Шкідливе програмне забезпечення-вимагач (Ransomware) блокує доступ до даних і вимагає викуп за їх відновлення;

В інформаційних атаках типу «людина посередині» зловмисники перехоплюють і змінюють дані, що передаються між двома сторонами. Може бути підслуховування та нелегальне перехоплення комунікацій через незашифровані канали [1, 4].

Технічні проблеми та вразливості виникають через незашифровані з'єднання, слабкі або застарілі алгоритми шифрування, недостатню автентифікацію та авторизацію, вразливі програмні забезпечення та апаратні засоби.

У незашифрованих з'єднаннях передача даних виконується через незахищені канали, такі як HTTP замість HTTPS, що робить їх вразливими до перехоплення.

Використання слабких або застарілих алгоритмів шифрування (наприклад, MD5 або SHA-1) може призвести до легкого зламу даних.

Слабкі або відсутні механізми автентифікації та авторизації можуть дозволити зловмисникам отримати доступ до системи.

Вразливі програмні забезпечення та апаратні засоби такі як баги та експлойти в програмному забезпеченні або апаратних засобах можуть бути використані для отримання доступу до даних.

Організаційні та людські фактори також впливають на безпеку передачі даних. Відсутність освіти та навчання користувачів, недостатня обізнаність про безпеку даних може призвести до помилок, таких як використання слабких паролів або відкриття фішингових електронних листів. Порушення політик та процедур безпеки, таких як незахищене зберігання даних або обмін конфіденційною інформацією через незахищені канали, а також інсайдерські загрози, ненавмисні або зловмисні дії працівників або інших інсайдерів, які мають доступ до конфіденційної інформації зменшують безпеку передачі даних [3].

Природні та техногенні фактори також впливають на безпеку передачі даних. Перебої в електропостачанні можуть призвести до втрати даних або пошкодження обладнання. Природні катастрофи – пожежі, повені, землетруси можуть пошкодити фізичну інфраструктуру, в якій зберігаються або передаються дані. відмова апаратного забезпечення. Вихід з ладу серверів, мережевого обладнання або інших критичних компонентів може призвести до втрати або порушення передачі даних. Природні перешкоди у каналах передачі даних викликають затухання сигналів, магнітні перешкоди, перекручування бітів, дроблення сигналу, фазовий зсув.

Проти подібних загроз існують наступні методи захисту: шифрування даних, регулярне оновлення програмного забезпечення, двофакторна автентифікація, навчання та освіта користувачів, використання VPN і завадостійких кодів.

Шифрування даних використовує сучасні методи шифрування для захисту даних під час передачі та зберігання:

- регулярне оновлення програмного забезпечення – встановлення останніх патчів та оновлень для усунення вразливостей;
- двофакторна автентифікація – використання додаткових методів автентифікації для підвищення безпеки доступу;
- навчання та освіта користувачів – постійне навчання працівників щодо кращих практик безпеки;

- використання VPN – створення захищених тунелів для передачі даних через незахищені мережі;
- використання завадостійких кодів – кодування даних завадостійкими комбінаціями, які за рахунок введення надлишковості можуть ігнорувати певні помилки, які трапляються у фізичних каналах зв'язку.

Всі ці заходи допомагають знизити ризики та забезпечити безпечну передачу цифрових даних [1, 4].

Постановка задачі. У роботі розглядається саме процес передачі інформації, тому основними перепонами для нього будуть саме перешкоди штучні, створені людиною на високому апаратному рівні, а також натуральні природні явища в каналах передачі даних. Для них шифрування даних і використання VPN – для високого рівня, а також завадостійкі коди – для фізичного рівня являються одними з найбільш ефективних методів, тому їх дослідження та інтеграція у одну систему може значно спростити і покращити умови для безпечної передачі даних. З цієї причини розробка єдиної моделі, яка поєднувала б безпекові протоколи та підходи у один алгоритм є актуальним.

Верхній рівень концепції. Оскільки перепони для збереження конфіденційності, цілісності та доступності інформації можуть виникати на різних рівнях, необхідно обрати методи боротьби, які будуть захищати інформацію на кожному етапі її передачі. Для зручності, як орієнтир можна використовувати стандартну модель OSI. Одним з обраних методів боротьби з перешкодами – використання VPN.

VPN (Virtual Private Network) забезпечує захищений і приватний доступ до Інтернету, створюючи шифрований тунель між користувачем та віддаленим сервером. Основні принципи роботи VPN:

- шифрування трафіку – VPN використовує протоколи шифрування (наприклад, OpenVPN, IKEv2, IPSec) для захисту даних, що передаються між користувачем та VPN-сервером, це запобігає перехопленню даних третіми сторонами;
- маршрутизація трафіку через VPN-сервер, коли користувач підключається до VPN, його трафік перенаправляється через VPN-сервер, цей сервер виступає як посередник між користувачем та Інтернетом, приховуючи реальну IP-адресу користувача;
- приховування IP-адреси – VPN змінює IP-адресу користувача на адресу VPN-сервера, що забезпечує анонімність та допомагає обійти географічні обмеження доступу до контенту;
- аутентифікація – VPN використовують різні методи аутентифікації для перевірки користувачів, наприклад, логін-пароль, двофакторна аутентифікація, цифрові сертифікати.

Ефективність VPN можна оцінювати за кількома ключовими показниками.

Швидкість підключення може бути виміряна як різниця між швидкістю інтернет-з'єднання без VPN та зі включеним VPN.

$$\Delta V = \left(\frac{V - V_{\text{VPN}}}{V} \right) \times 100, \quad (1)$$

де ΔV – зниження швидкості (%);

V – швидкість без VPN;

V_{VPN} – швидкість з VPN.

Затримка вимірюється як час (у мілісекундах), який потрібен для передачі даних від користувача до сервера і у зворотному напрямку:

$$D = \frac{t_f - t_b}{2}, \quad (2)$$

де D – затримка;

t_f – це час передачі даних до сервера;

t_b – це час повернення даних.

Надійність підключення вимірюється як кількість успішних підключень до VPN-сервера без розривів

$$R = \left(\frac{C_s}{C_o} \right), \quad (3)$$

де R – надійність (%);

C_s – кількість успішних підключень;

C_o – кількість спроб підключень.

Час підключення вимірюється як середній час, необхідний для встановлення VPN-з'єднання.

$$T_{ca} = \frac{t_c}{C_o}, \quad (4)$$

де T_{ca} – середній час підключення;

t_c – загальний час підключення.

Ефективність шифрування – як рівень шифрування даних (наприклад, AES-256), який визначає складність зламування шифру.

Ефективність шифрування не має прямої формули, але можна враховувати довжину ключа та методи шифрування, що використовуються.

Тестування швидкості: використання інструментів на кшталт Speedtest для вимірювання швидкості Інтернету з VPN та без нього.

Моніторинг затримки – використання команд, таких як ping, для перевірки затримки між клієнтом та VPN-сервером.

Перевірка надійності тривалості та стабільності з'єднання протягом певного часу, фіксування випадків розриву.

Оцінка рівня шифрування технічної документації VPN-провайдера щодо використовуваних протоколів та методів шифрування.

Забезпечення ефективної роботи VPN є важливим для гарантування безпеки та приватності користувачів, а також для підтримання високої продуктивності та надійності з'єднань.

Після того як код шифрується та створюється VPN тунель, виникають вже суто фізичні перешкоди, які заважають швидкій, достовірній та безпечній передачі інформації. Для мінімізації наслідків ефективно використовуються завадостійкі коди.

Нижній рівень концепції. Щоб код можна було назвати завадостійким, він має надавати можливість для виявлення або виправлення різних помилок, що

можуть генеруватись при передачі даних з причини різноманітних завад. Можливість коду виявляти ці помилки отримується за допомоги введення надмірності в початкову інформаційну кодову комбінацію. Ті самі додаткові надмірні символи створюються за предписаними правилами і називаються перевірочними або контрольними. Збільшення числа надмірних символів у кодовій комбінації збільшує детективну і виправляючу властивості коду, але знижає швидкість передачі інформації [5–7].

Видів надлишковості може бути два: абсолютна та відносна. Абсолютну надлишковість можна визначити за допомогою кількості додаткових вводимих розрядів

$$k = n - m, \tag{5}$$

де k – абсолютна надлишковість або кількість перевірочних елементів;

n – загальна кількість елементів у кодовій комбінації, довжина кодової комбінації;

m – загальна кількість інформаційних елементів у кодовій комбінації.

Нехай на вхід кодувального пристрою надійшла деяка послідовність m інформаційних двійкових розрядів. На виході їй буде відповідати послідовність з n двійкових символів, де $n > m$. Усього може бути 2^m різних послідовностей з 2^n , які є дозволеними кодovими комбінаціями. Інші $2^n - 2^m$ з можливих вихідних послідовностей для передачі не використовуються, тому вони будуть називаються забороненими [7–10].

Завадостійких кодів зараз існує досить багато. На рис. 1 приводиться неповна ієрархія завадостійких кодів [9–11].

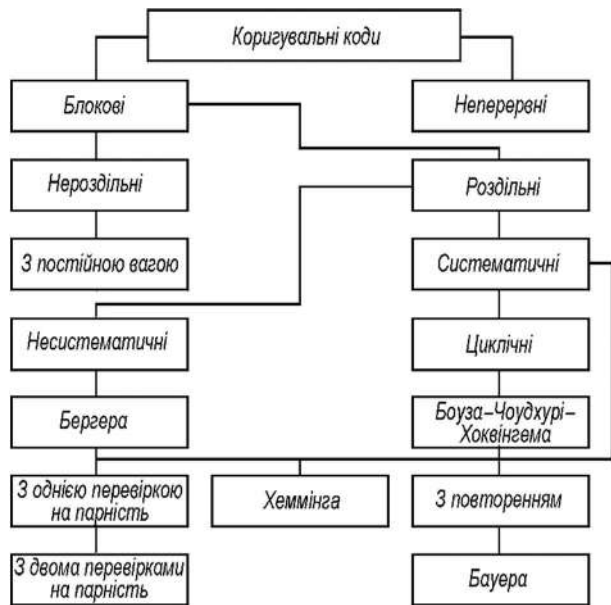


Рис. 1. Види завадостійких кодів

У роботах, що стосувались безпосередньо завадостійких кодів, було прийнято рішення розглядати і працювати з кодами Хеммінга з багатьох причин, у тому числі, тому що вони являються оптимальними для виконання поставлених у роботі завдань [5–7].

Оскільки просто використання кодів Хеммінга може бути недостатньо, було запропоновано використовувати каскадні коди.

Каскадний код, у нашому випадку, буде використовувати паралельний, блоковий, систематичний код Хеммінга, який здатен виправляти помилки, що виникають при передачі цифрової інформації каналом зв'язку з шумами – як першу ступінь, а у якості другого ступеня буде простий та надійний код (біт) перевірки кодової комбінації на парність.

Тобто, каскадні коди складаються з двох або більше, менших за розміром і простіших кодів. Головна ідея каскадного коду, у тому числі у нашій моделі, полягає у тому, що початкове інформаційне повідомлення повідомлення кодується кодером 1, потім це повідомлення з додатковими бітами першого завадостійкого коду кодується поверх кодером 2. При декодуванні процес зазначений процес виконується у зворотному порядку.

Поширену схему каскадних кодів можна побачити на рис. 2 [12].

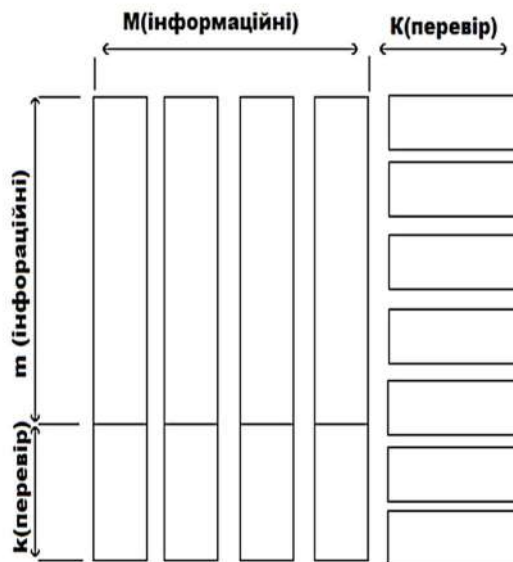


Рис. 2. Загальна схема каскадного коду

Поширена схема-алгоритм для кодування та декодування каскадним кодом наведена на рис. 3 [13, 14].

Об'єднання двох рівнів концепції. Для того, щоб була можливість оцінити та візуалізувати поєднання двох рівнів безпеки, запропоновано використовувати модель OSI.

На рис. 4 VPN протоколи SSL, IPSec, PPTP, L2TP поєднуються у єдиному контурі безпеки з завадостійкими кодами.

Висновки. Об'єднання двох рівнів боротьби з перешкодами для конфіденційної, достовірної та доступної передачі інформації надає переваги у плануванні та керуванні різними системами, адже в умовах динамічних завад дозволяє оцінити та швидко імплементувати вже готові методи, які на практиці довели свою надійність і є доступними для кожного, адже всі базові протоколи-фреймворки з кібербезпеки є відкритими для використання і впровадження, а

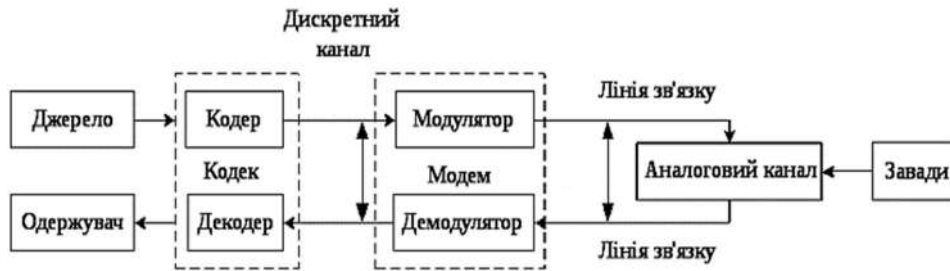


Рис. 3. Загальна схема кодування та декодування

заводостійкі коди є досить легкими, логічними й доступними для реалізації у широкому спектрі систем управління. Подальше дослідження, уточнення та покращення ідеї є актуальним.

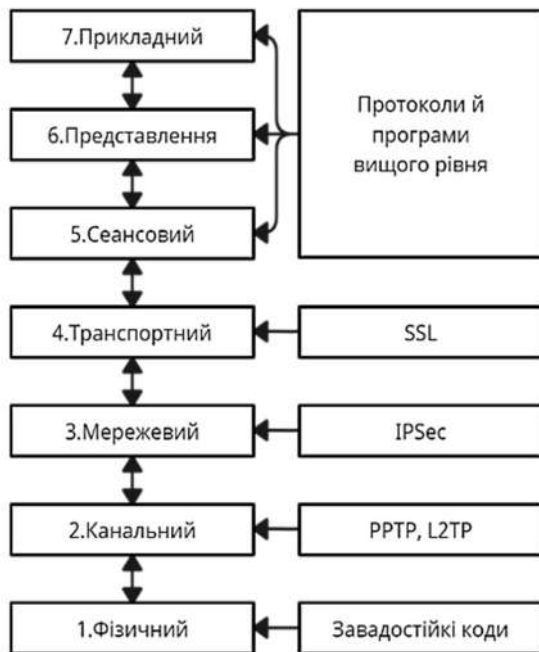


Рис. 4. Ключові елементи концепції на моделі OSI

Список використаної літератури

- Nieles M., Dempsey K., Pillitteri V. Y. *An Introduction to Information Security. National Institute of Standards and Technology Special Publication 800-12 Revision 1, June 2017*. 101 p. URL: <https://nsarchive.gwu.edu/document/22632-document-07-michael-nieles-kelley-dempsey-and> (дата звернення: 25.04.2024).
- Stallings W., Brown L. *Computer Security: Principles and Practice*. New York: Prentice Hall, 2008. 817 p.
- Pfleeger C. P., Pfleeger S. L. *Security in Computing*. New Jersey: Prentice Hall, 2003. 746 p.
- Tiller J. S. *The Ethical Hack: A Framework for Business Value Penetration Testing*. Auerbach Publications, 2005. 352 p.
- Шаров В. О., Нікуліна О. М., Северин В. П. Моделювання та аналіз кодерів заводостійких каскадних кодів для динамічних систем. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2023, № 1 (9). С. 64–69.
- Шаров В. О., Нікуліна О. М., Северин В. П. Розробка моделі заводостійкої передачі даних для інформаційної технології

оптимізації управління динамічними системами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2022, № 2 (8). С. 57–62.

- Шаров В. О., Нікуліна О. М., Лошкарьова С. Є. Розробка гнучкої моделі заводостійкої передачі даних для управління динамічними системами. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXXI міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2023*. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. С. 1048
- Захарченко Н. В., Горохов С. М., Кочетков А. В. *Інформаційні параметри позиційних кодів*. Одеса: ОНАС, 2018. 212 с.
- Eklund J.-E., Arvidsson R. A multiple sampling, single A/D conversion technique for I/Q demodulation in CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1996. Vol. 31, is. 12. P. 1987–1994.
- Blahut R. E. *Theory and Practice of Error Control Codes*. Addison-Wesley Publishing Company, 1983. 500 p.
- Лосев Ю. І., Шматков С. І. *Основи теорії передачі інформації*. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2013. 290 с.
- Yue Tang, Tian Mao, Bing Jiang, Design and Experiment of Multi-resolution Composite Digital Array Antenna. *Journal of Radars*. 2016, 5 (3). P. 265.
- Банкет В. Л., Іващенко П. В., Іщенко М. О. Заводостійке кодування в телекомунікаційних системах. Одеса: ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2011. 100 с.
- Жураковський Ю. П., Полторак В. П. *Теорія інформації та кодування*. Київ: Вища шк., 2001. 255 с.
- Кожевников В. Л., Кожевников В. Л. *Теорія інформації та кодування*. Дніпропетровськ: НГУ, 2011. 108 с.

References (transliterated)

- Nieles M., Dempsey K., Pillitteri V. Y. *An Introduction to Information Security. National Institute of Standards and Technology Special Publication 800-12 Revision 1, June 2017*. 101 p. Available at: <https://nsarchive.gwu.edu/document/22632-document-07-michael-nieles-kelley-dempsey-and> (accessed 25.04.2024).
- Stallings W., Brown L. *Computer Security: Principles and Practice*. New York, Prentice Hall, 2008. 817 p.
- Pfleeger C. P., Pfleeger S. L. *Security in Computing*. New Jersey, Prentice Hall, 2003. 746 p.
- Tiller J. S. *The Ethical Hack: A Framework for Business Value Penetration Testing*. Auerbach Publications, 2005. 352 p.
- Sharov V. O., Nikulina O. M., Severyn V. P. Modelyuvannya ta analiz koderiv zavodostiikyh kodiv dlya dynamichnykh system [Modeling and analysis of coders of secure cascade codes for dynamic systems]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI", Publ., 2023, no.1 (9), pp. 64–69. (In Ukr.).
- Sharov V. O., Nikulina O. M., Severyn V. P. Rozrobka modeli zavodostiikoji peredachi danyh dlja informatsionnoyi tekhnologii optimizatsii upravlinnja dynamichnymy sistemamy [Development of a data transfer model for information technology optimization of dynamic systems control]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb.*

- nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI", Publ., 2022, no. 2 (8), pp. 57–62. (In Ukr.).
7. Sharov V. O., Nikulina O. M., Loshkaryova S.E. Rozrobka gnuchkoi modeli zavodostiikoi peredachi danyh dlya upravlinnya dynamychnymy systemamy [Development of a flexible model of data transmission for controlling dynamic systems]. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: Abstracts of the XXXI International Scientific and Practical Conference MicroCAD-2023*. Kharkiv, NTU "KhPI", Publ., 2023, p. 1048. (In Ukr.).
 8. Zakharchenko N. V., Gorokhov S. M., Kochetkov A. V. *Informatsijni parametry pozitsijnyh kodiv* [Information parameters of positional codes]. Odesa, ONAS Publ., 2018. 212 p. (In Ukr.).
 9. Eklund J.-E., Arvidsson R. A multiple sampling, single A/D conversion technique for I/Q demodulation in CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1996, vol. 31, is. 12, pp. 1987–1994.
 10. Blahut R. E. *Theory and Practice of Error Control Codes*. Addison-Wesley Publishing Company, 1983. 500 p.
 11. Losev Yu. I., Shmatkov S. I. *Osnovy teotiji peredachi informatsiji* [Fundamentals of the theory of information transfer]. Kharkiv, KhNU named V. N. Karazina Publ., 2013. 290 P. (In Ukr.).
 12. Yue Tang, Tian Mao, Bing Jiang Design and Experiment of Multi-resolution Composite Digital Array Antenna. *Journal of Radars*, 2016, 5 (3). pp. 265.
 13. Banket V. L., Ivashchenko P. V., Ishchenko M. O. *Zavadostijke koduvannja v telekomunatsijnyh systemah* [Interference-resistant coding in telecommunication systems]. Odesa, ONAZ named O. S. Popova Publ., 2011. 100 P. (In Ukr.).
 14. Zhurakovsky Yu. P., Poltorak V. P. *Teorija informatsiji ta koduvannja* [Theory of information and coding]. Kyiv, Vyscha shk. Publ., 2001. 255 p. (In Ukr.).
 15. Kozhevnikov V. L., Kozhevnikov V. L. *Teorija informatsiji ta koduvannja* [Theory of information and coding]. Dnipropetrovsk: NGU Publ., 2011. 108 p. (In Ukr.).

Hadziuuna (received) 06.05.2024

UDC 004.9+519.85

V. O. SHAROV, Postgraduate of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3152-0650>; e mail: wycptiy@gmail.com

O. M. NIKULINA, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department Information Systems and Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e mail: elniknik02@gmail.com

TWO-LEVEL CONCEPT FOR SIMULATING UNIFORM INTERFERENCE-RESISTANT DIGITAL DATA TRANSMISSION

The article formalizes, creates and provides for consideration the concept of a single secure interference-resistant data transmission channel. In modern cybersecurity theory and practice, there is the NIST Cybersecurity Framework, which is a set of recommendations for reducing risks for organizations. In order for high-level data to be secure, there are requirements for the SIA triad, namely confidentiality, integrity and availability of information. Therefore, in the future, the expediency of the work and its result will directly depend on the satisfaction of the SIA conditions. As you know, high-level data: such as e-mail, visual data in the GUI of various applications, etc., are transmitted over low-level communication channels: such as cables, wireless radio communication channels, and others. At each of the levels for safe transmission of information, there are specific pests. At high levels, the main threat to information is man and the human factor. The lower the level of information transmission becomes, the more nature, natural obstacles and random short phenomena begin to influence. In order for the user to be able to use various devices without a threat to the confidentiality, integrity and availability of information, it is necessary to actively and continuously develop, improve and improve the existing methods of data protection, restoration, transmission and storage. Each aspect in this struggle for security is both an advantage and a disadvantage: excessive security is not appropriate for mass traffic, complexity does not always provide adequate security, and so on. Therefore, the optimality and expediency of the methods used becomes an important factor. For these reasons, the paper proposes a relatively simple, but no less effective approach to maintaining SIA requirements.

Keywords: noise immunity, immunity codes, data security, data channels, VPN, CIA, NIST, OWASP.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Шаров Владислав Олегович / Sharov Vladyslav Olegovych

Автор 2 / Author 2: Нікуліна Олена Миколаївна / Nikulina Olena Mykolaivna

К. В. ЯГУП, доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; Харків, Україна; e-mail: kata3140@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/orcid.org/0000-0002-9305-8169>

В. Г. ЯГУП, доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри комп'ютерних систем; м. Харків, Україна; e-mail: yagup.walery@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ ЕЛЕМЕНТІВ СИМЕТРО-КОМПЕНСУВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ НЕСИМЕТРИЧНОЇ СИСТЕМИ З НУЛЬОВИМ ПРОВОДОМ

У статті досліджується можливість використання нейронних мереж у галузі підвищення енергетичних показників чотирипровідної системи електропостачання з нерівномірним навантаженням у фазах. Нерівномірне навантаження у фазах спричиняє несиметрію струмів у мережі і сприяє зростанню струму в нульовому проводі, що вкрай негативно впливає, як на саму мережу, так і на її споживачів. Для усунення несиметрії і зниження струму в нульовому проводі можна підключити симетро-компенсувальний пристрій. Такий пристрій представляє собою набір реактивних елементів, параметри яких визначаються шляхом пошукової оптимізації. Для визначення типу необхідного елемента виконується перерахунок визначених параметрів. Тобто вирішення такої задачі складається з двох складових підзавдань – структурного та параметричного синтезу. Такий підхід надає високу точність розрахунків, але має суттєвий недолік – обчислення представляються громіздкими і затратними. Задля спрощення вирішення задачі синтезу має сенс визначити тип елементів за допомогою нейронних мереж, що дозволить значно скоротити час та ресурси, що витрачаються на розрахунок величин параметрів симетро-компенсувального пристрою. Предметом дослідження статті є вивчення можливості використання нейромереж з метою прогнозування типів реактивних елементів симетро-компенсувального пристрою. У ході дослідження було визначено параметри і тип нейронної мережі, що забезпечують найточніше прогнозування топології структури симетро-компенсувального пристрою. Вхідні параметри нейромережі формувалися з наборів, що складаються з восьми параметрів – опорів та індуктивностей ліній передач і нульового дроту. Матриця цілей формувалася з множини наборів даних, що складаються з шести елементів, що містять інформацію про типи елементів, що підключаються (0 – конденсатор, 1 – індуктивність) між фазами та між фазами та нульовим проводом. У ході дослідження були отримані результати квазірішення, значення яких виявилися співрозмірними з точними розрахунками визначення структури симетро-компенсувального пристрою системи електропостачання з нульовим проводом. Це свідчить про високу якість роботи розробленої нейромережі. Застосування мінімаксної стратегії до отриманих результатів надає можливість звести отримані значення до 0 та 1, щоб забезпечити наявність отриманих нейромережею результатів.

Ключові слова: нейронна мережа, Байєсівська регуляризація, структурний та параметричний синтез, мінімаксна стратегія, система електропостачання з нульовим проводом.

Вступ. Підвищення якості електричної енергії дозволяє значно зекономити ресурси, що витрачаються на електроенергію, і тому є актуальним завданням. У даний час найбільш поширеним типом системи електропостачання є трифазна мережа з нульовим проводом. Якість електричної енергії в такій мережі значно знижується при несиметрії струмів та за наявності струму в нульовому проводі. Вирішенням такої проблеми може бути підключення спеціального симетро-компенсувального пристрою. Такий пристрій представляє собою набір реактивних елементів – конденсаторів або котушок індуктивностей, які підключаються між фазами та між фазами і нульовим проводом [1, 2]. Однак правильне визначення належного типу елемента або можливості його виключення зі схеми вимагає вирішення комплексного завдання структурного і параметричного синтезу [1, 2]. Завдання вирішується у декілька етапів. На першому етапі підключається симетро-компенсувальний пристрій, що складається з 12 елементів, де між фазами і між кожною фазою і нульовим проводом підключаються паралельно підключені конденсатор і котушка індуктивності, що шунтують один одного. Такий прийом штучного збільшення вдвічі елементів використовується для подальшого визначення кінцевого типу елемента, виходячи із значень параметрів цих

елементів після виконання оптимізації та відповідних перерахунків [2]. На наступному етапі змінюється топологія схеми симетро-компенсувального пристрою, яка складається вже не з 12, а з шести чи п'яти елементів. Якщо визначено надлишковий елемент і симетро-компенсувальний пристрій містить п'ять елементів, то виконується повторна оптимізація параметрів системи електропостачання, яка знаходить кінцеві значення параметрів встановлених реактивних елементів. Слід зазначити, що розв'язання задачі дає точне значення, але потребує великих витрат часу та ресурсів для проведення розрахунків та оптимізації при виконанні пошукової оптимізації в системі електропостачання із 12-елементним симетрувальним пристроєм. Крім того, процес є не автоматичним і вимагає втручання людини для зміни топології симетро-компенсувального пристрою. Таке завдання можна автоматизувати шляхом застосування нейронних мереж, які заздалегідь визначають необхідні типи елементів [3–11].

Метою статті є дослідження можливості застосування нейронних мереж для визначення типів реактивних елементів у симетро-компенсувальному пристрої трифазної системи електропостачання з нульовим проводом.

© Ягуп К. В., Ягуп В. Г., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



Основна частина. На рис. 1 зображено модель чотирипровідної системи електропостачання із симетро-компенсувальним пристроєм, що створена за допомогою пакета SimPowerSystem програми MATLAB.

Нерівномірне навантаження у фазах, що задається за допомогою елементів z_{na} , z_{nb} , z_{nc} при відсутності симетро-компенсувального пристрою створює несиметричний режим у фазах та спричиняє зростання струму в нульовому дроті (рис. 2), що є вкрай негативним явищем як для самої мережі, так і для її споживачів.

Спеціальна програма запускаючи модель виконує оптимізацію методом Нелдера – Міда, здійснюючи пошук значень параметрів реактивних елементів симетро-компенсувального пристрою, який задовольняє такому критерію оптимізації, що струми у фазах стають симетричними, а струм у нульовому проводі дорівнює нулю. Після цього виконуються спеціальні розрахунки, що визначають типи елементів і їх значення.

Наступним етапом є заміна шунтувальних конденсаторів і котушок індуктивностей відповідним єдиним елементом із визначеним типом [1]. Такий підхід забезпечує високу точність розрахунків, однак визначення значень параметрів 12 елементів методом оптимізації займає забагато часу і ресурсів (від 800 до 5000 ітерацій).

Сучасні дослідження у сфері нейромереж надають широку можливість визначити практично одразу вихідні параметри системи [3–11]. Тому в таких розрахунках є доцільним розробити спеціальну нейронну мережу, яка б одразу визначала топологію симетро-компенсувального пристрою.

У проведеному дослідженні в якості інструменту машинного навчання побудови нейромережі було обрано спеціальний пакет Neural Network Toolbox у системі MATLAB. Цей засіб для роботи з нейромережами дозволяє моделювати нейронні мережі та корегувати їх основні параметри, застосовуючи методи Байєсівська регуляризація, метод Левенберга – Марквардта

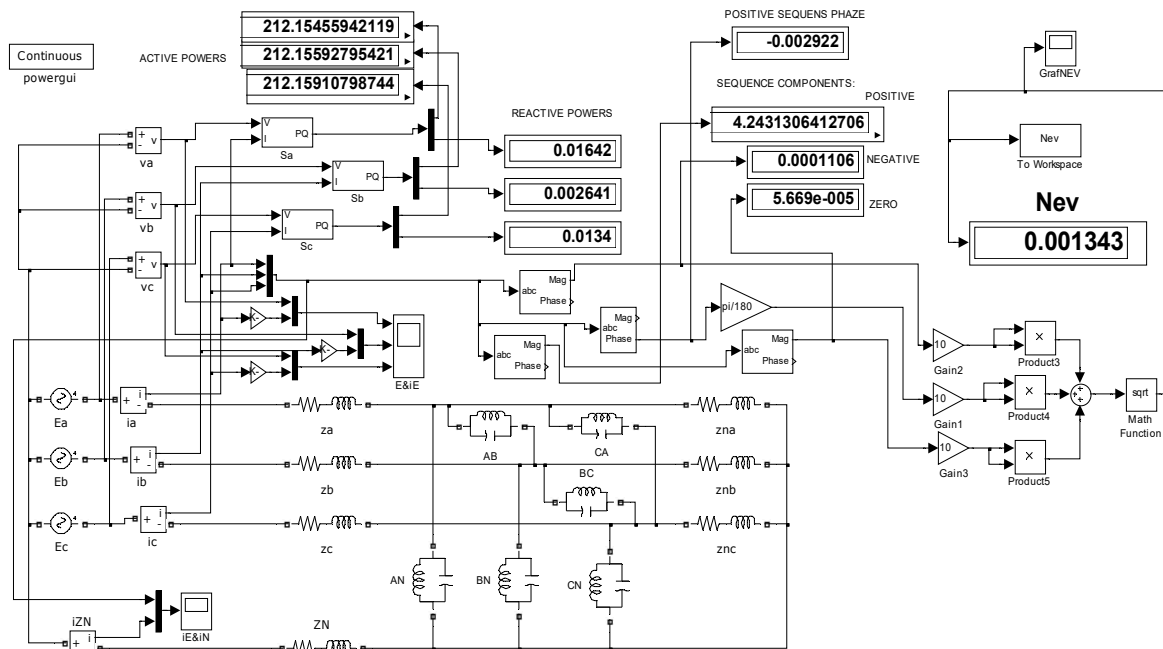


Рис. 1. Модель трифазної системи із нульовим проводом з підключеним симетро-компенсувальним пристроєм

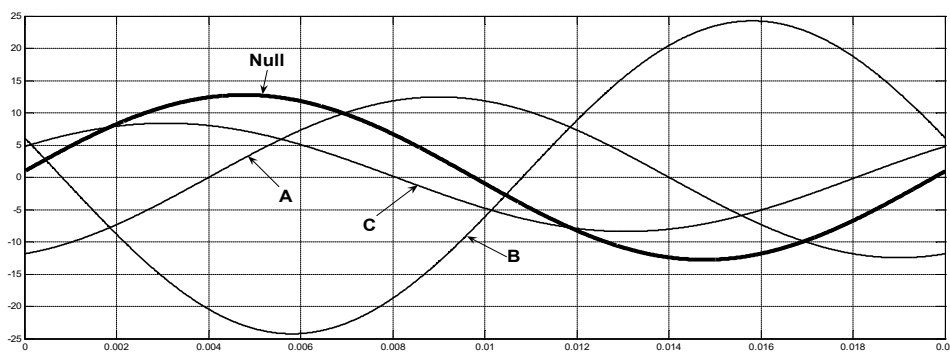


Рис. 2. Струми у фазах (A, B, C) і в нульовому проводі (Null) для несиметричного режиму

та конгруентний градієнт, що масштабується. Для тренування мережі було попередньо проведено 300 експериментів з результатами, які надали можливість сформувати кортежі вхідних та вихідних даних. Матриця вхідних даних представляє собою набір значень резисторів та котушок індуктивностей у фазах, при цьому значення навантаження в нульовому проводі залишалося незмінним. Матриця цілей представляє собою кортеж із шести значень, які приймають значення 0, якщо елемент визначений як конденсатор, і 1, якщо елемент привалює до індуктивності. Експериментальним шляхом було встановлено, що найбільш точну відповідь формує нейронна мережа, створена із застосуванням методу Байєсівської регуляризації, що складається із 22 шарів.

У табл. 1 наведено низку результатів проведених експериментів, із аномальними параметрами, які не входили до даних, при формуванні нейромережі. У другій колонці таблиці, наведені точні данні, які були отримані в результаті оптимізації і перерахунків, які визначали тип реактивного елемента. А третя колонка містить данні, отримані в результаті їх визначення за допомогою створеної нейромережі. Якщо порівнювати результати двох колонок, можна побачити закономірність, що значення елементів, визначених нейромережею, які мають бути конденсаторами значно менші тих, що мають бути представленими індуктивностями. Логічним у цій ситуації є подальше застосування мінімаксної стратегії, яка має для наявності округлювати відповідним чином отримані значення до 0 чи 1.

Висновки. Сформована методом Байєсівської регуляризації нейромережа надає можливість визначити топологію симетро-компенсувального пристрою, що значно скорочує час розрахунків і спрощує задачу синтезу. Для обробки результатів цільової матриці має сенс застосувати мінімаксну стратегію для округлення результатів, щодо визначення типу елемента.

Список використаної літератури

1. Ягуп Е. В. Определение режима компенсации реактивной мощности в четырехпроводной трехфазной системе электроснабжения с помощью поисковой оптимизации. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 1. С. 60–66.
2. Ягуп К. В., Ягуп В. Г. *Моделирование та оптимізація режимів систем енергопостачання та електроспоживання. Навчальний посібник*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 183 с.
3. Ягуп К. В., Ягуп В. Г. Application of Bayesian regularization for improving the quality of electrical energy in the electrical supply system. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*.

- Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ». 2023. №2 (10). С. 15–20.
4. Hu W., Liu B., Gomes J. *Strategies for Pre-training Graph Neural Networks*. URL: <https://arxiv.org/abs/1905.12265> (дата звернення: 01.11.2023).
 5. Dahl G., Jaitly N., Salakhutdinov R. *Multi-task neural networks for QSAR predictions*. URL: <https://arxiv.org/abs/1406.1231> (дата звернення: 01.11.2023).
 6. Graves A., Wayne G., Danihelka I. *Neural Turing machines*. URL: <https://arxiv.org/abs/1410.5401> (дата звернення: 01.11.2023).
 7. Haykin S. *Neural networks: A comprehensive foundation*. New York: McMillan College Publ., 1994. 696 p.
 8. Глибовець М. М., Олецкий О. В. *Штучний інтелект*. Київ: КМ Академія, 2002. 366 с.
 9. Xianjun Ni Research of Data Mining Based on Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008. Vol. 39. P. 381–384.
 10. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the success of adaboost and random forests as interpolating classifiers. *The Journal of Machine Learning Research*. 2017. Iss. 18, vol. 1. P. 1558–1590.
 11. Opper M., Archambeau C. The variational gaussian approximation revisited. *Neural Computation*. 2009. Vol. 21, iss. 3. P. 786–792.

References (transliterated)

1. Yagup E. V. Opredelenie rezhima kompensatsii reaktivnoy moschnosti v chetyrehprovodnoy trehfaznoy sisteme elektrosnabzheniya s pomoschyu poiskovoy optimizatsii. [Determination of reactive power compensation mode in a four-wire three-phase power supply system using search optimization]. *Tekhnichna elektrodinamika* [Technical electrodynamic]. 2016, no. 1, pp. 60–66. (In Russ.).
2. Yagup K. V., Yagup V. H. *Modeliuvannia ta optymizatsiia rezhymiv sistem enerhopostachannia ta elektrospozhyvannia. Navchalnyi posibnyk* [Modeling and optimization of modes of energy supply and electricity consumption systems. Tutorial]. Kharkiv, KhNAME after O. M. Beketov Publ., 2019. 183 p. (In Ukr.).
3. Yagup K. V., Yagup V. H. Application of Bayesian regularization for improving the quality of electrical energy in the electrical supply system. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. *Seriia: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, management and information technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 2 (10), pp. 15–20.
4. Hu W., Liu B., Gomes J. *Strategies for Pre-training Graph Neural Networks*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1905.12265> (accessed 01.11.2023).
5. Dahl G., Jaitly N., Salakhutdinov R. *Multi-task neural networks for QSAR predictions*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1406.1231> (accessed 01.11.2023).
6. Graves A., Wayne G., Danihelka I. *Neural Turing machines*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1410.5401> (accessed 01.11.2023).
7. Haykin S. *Neural networks: A comprehensive foundation*. New York, McMillan College Publ., 1994. 696 p.
8. Hlybovets M. M., Oletsnyi O. V. *Shtuchnyi intelekt* [Artificial intelligence]. Kyiv, KM Akademiia Publ., 2002. 366 p. (In Ukr.).
9. Xianjun Ni Research of Data Mining Based on Neural Networks. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2008, vol. 39, pp. 381–384.

Таблиця 1 – Результати дослідження роботи створеної нейромережі

| Вхідні параметри мережі | Значення, отримані в ході оптимізації і перерахунків | Матриця цілей |
|------------------------------------|--|--|
| 1.2 0.025 1 0.01 2 0.04 0.3 0.003 | 0 0 0 0 0 1 | 0.0847 0.0491 –0.0529 0.0196 0.2773 0.6523 |
| 1.0 0.010 5 0.07 8 0.01 0.3 0.030 | 0 1 0 0 0 0 | –0.0731 0.6278 0.0227 0.1415 0.1817 0.2131 |
| 1.0 0.010 4 0.07 5 0.06 0.3 0.003 | 0 0 0 0 1 1 | –0.0330 0.0621 0.0232 –0.0766 0.9714 0.2931 |
| 0.5 0.070 5 0.06 9 0.03 0.3 0.003 | 1 1 0 0 0 0 | 0.5832 1.1574 –0.0858 –0.1204 0.1654 –0.0345 |
| 0.5 0.060 5 0.07 10 0.03 0.3 0.003 | 0 1 0 0 0 0 | 0.1404 0.8871 –0.0144 0.1105 –0.1202 –0.0515 |

10. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the success of adaboost and random forests as interpolating classifiers. *The Journal of Machine Learning Research*. 2017, iss. 18, vol. 1, pp. 1558–1590.
11. Opper M., Archambeau C. The variational gaussian approximation revisited. *Neural Computation*. 2009, vol. 21, iss. 3, pp. 786–792.

Надійшла (received) 27.05.2024

UDC 004.89

K. V. YAGUP, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies;

Kharkiv, Ukraine; e-mail: kata3140@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9305-8169>

V. G. YAGUP, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkov National Automobile and Highway University, Professor at the Department of Computer Systems; Kharkiv, Ukraine; e-mail: yagup.walery@gmail.com;

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>

APPLICATION OF A NEURONETWORK FOR DETERMINING THE TYPE OF ELEMENTS OF A SYMMETRICAL COMPENSATION DEVICE OF AN UNSYMMETRICAL SYSTEM WITH A ZERO WIRE

In article the possibility of using neural networks in the field of increasing the energy performance of a four-wire power supply system with an uneven load in the phases is being investigated. An uneven load in the phases causes asymmetry of currents in the network and contributes to the increase in the current in the neutral wire, which has an extremely negative effect on both the supply itself and its consumers. To eliminate asymmetry and reduce the current in the neutral wire, you can connect a symmetrical compensating device. Such a device is a set of reactive elements, the parameters of which are determined by search optimization. To determine the type of the required element, the defined parameters are recalculated. That is, the solution of such a problem consists of two component sub-problems – structural and parametric synthesis. This approach provides a high accuracy of calculations, but has a significant drawback: the calculations are cumbersome. In order to simplify the solution of the synthesis problem, it makes sense to determine the type of elements using neural networks, which will significantly reduce the time and resources spent on calculating the values of the parameters of the symmetrical compensating device. The subject of the article is the study of the possibility of using neural networks to predict the types of reactive elements of the symmetrical compensating device. During of the study, the parameters and type of neural network were determined, which provide the most accurate prediction of the topology of the structure of the symmetric-compensating device. The input parameters of the neural network were formed from sets consisting of eight parameters – resistances and inductances of the transmission lines and the neutral wire. The target matrix was formed from a set of data sets consisting of six elements containing information on the types of elements connected (0 – capacitor, 1 – inductance) between phases and between phases and the neutral wire. During research, the results of a quasi-solution were obtained, the values of which turned out to be commensurate with the accurate calculations for determining the structure of the symmetrical compensating device of the power supply system with a zero wire. This indicates the high quality of the developed neural network. Applying the minimax strategy to the received results provides an opportunity to reduce the received values to 0 and 1 to ensure clarity of the results obtained by the neural network.

Keywords: neural network, Bayesian regularization, structural and parametric synthesis, minimax strategy, zero-wire power supply system.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Ягуп Катерина Валеріївна, Yagup Kateryna Valeriivna

Автор 2 / Author2: Ягуп Валерій Григорович, Yagup Valery Grygorovych

M. D. VERES, Student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: maksym.veres@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1768-8693>

N. V. GOLIAN, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine; e-mail: nataliia.golian@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1390-3116>

OPTIMIZATION OF THE DEVELOPMENT PROCESS OF MONOLITHIC MULTI-MODULE PROJECTS IN JAVA

In recent years, there has been an increase in the complexity of Java software development and a change in the scope of projects, including an increase in the number of modules in projects. The multi-modularity of projects, although it improves manageability to a certain extent, but often creates a number of problems that can complicate development and, a problem that will appear in the future, require more resources to support. This article will analyze the main problems of monolithic multi-module Java projects and will try to consider a number of possible solutions to overcome the above problems. The article discusses the peculiarities of working with multi-module monolithic projects using Java as the main programming language. The purpose of this article is to identify features and obstacles using the above architectural approach of the software, analysis of the main possible issues of working with the monolithic multi-module Java projects, as well as providing recommendations for eliminating these obstacles or describing the features of the process that could help engineers in supporting this kind of projects. In other word the main goal of this work is to create recommendations, provide modern best practices for working with monolithic multi-modular software architecture and the most popular modern technological solutions used in corporate development. The proposed recommendations allow the team, primarily developers and the engineering side, to avoid possible obstacles that lead to the loss of efficiency of the monolithic software development process. The most important advantage, from the recommendations given in the article, is the optimization of resource costs (time, money and labor) for the development process. As a result of the article, a general list of recommendations was obtained, which allows the developer to better analyze what changes in the project should (if necessary) be made to optimize the development, assembly and deployment processes of a monolithic Java project, as well as advice before designing new software to avoid the main obstacles of monolithic architecture in the future.

Keywords: monolithic architecture, multi-module architecture, Java, project build, module, development, project deployment.

Introduction. To begin with, here is a short description of monolithic architecture and its features. To do this, let's turn to the article «Microservices vs. monolithic architecture» by Atlassian marketing strategist Chandler Harris [1].

A monolithic application is a single common project, while a microservice architecture, in turn, is a combination of small, independently deployed services. Monolithic architecture has already become a traditional software model; it represents a single project that works autonomously and independently of other applications. In turn, the code base in such an architecture combines all business tasks.

Let us highlight the main advantages and disadvantages of monolithic architecture. The advantage is the ease of deploying applications with a monolithic architecture. Fewer independent modules reduce configuration and deployment costs. Using a single code base in some situations leads to simplified development, however, making fundamental changes to its structure can, on the contrary, significantly increase costs.

In some situations, the performance of monolithic applications can be higher than that of applications with a microservice architecture. For example, in a centralized codebase it is sometimes possible to use a single API, which often immediately sends a request to the data storage system, when, in turn, a microservice architecture requires calling various APIs, as well as transferring data through application communication interfaces (for example, REST).

In cases where at the initial stages, as the monolithic application grows, its main disadvantages begin to appear.

One of the main ones is a significant increase in resource costs for development (both material and time). Especially, this flaw will manifest itself during major changes in a single code base, which may affect all functionality. Not only does the developer need to take this into account, but also a competent team lead must realize that it is necessary to almost completely test the functionality of the project, which could be affected by these changes. This is a rather unpleasant factor, especially during the period when, for example, the release date is approaching, and changes to the code base are requested and occur after the main business functionality has been tested. Thus, there is a need to retest the application, where there is a risk that it will not be fully completed by the release date.

As a possible example, a situation where the business side urgently requires new functionality, in addition to what was planned in advance, and from the technical management side, closer to the end of the development period, a request comes for a mandatory update of the project build system plugins to close a technical vulnerability. After updating the plugins, part of the project's functionality stops working with an error. The development team needs to try to fix the problem with urgency, and the testing team has even more urgency to verify that the problem is fixed.

The next disadvantage of such an architecture - unreliability. An instability or bug in one module has the risk of affecting the availability of the entire application.

Scalability is the third key problem. Individual components cannot be scaled, since they are part of a single code base and are not presented, at least, as a separate stand-alone module [2].

© Veres M. D., Golian N. V., 2024



Research Article: This article was published by the publishing house of *NTU "KhPI"* in the collection "Bulletin of the National Technical University "KhPI" Series: System analysis, management and information technologies." This article is distributed under an international license [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Conflict of Interest:** The author/s declared no conflict of interest.



About multimodularity. Let us briefly recall what multimodularity is, why this approach is used, and what advantages and disadvantages it has. To do this, let's turn to Google's article on using the modularization approach in Android development [3].

And so, modularization is a practical approach that consists of breaking the project's code base into loosely coupled and autonomous parts, each of which is a separate module. Each such module is independent and created for a clear purpose. For example, a simple application that has a presentation module, a module that represents business logic, and a module for communicating with the data storage environment. Thus, dividing the code base into modules can reduce the complexity of designing and maintaining especially large systems. Let us highlight the main advantages of this approach.

The multimodular approach opens up the possibility that a module's code base can be reused both within a project and across multiple applications. In this case, modules are individual building blocks. An example would be where an application has multiple presentation modules, say a UI module and multiple REST API modules. In this case, they can reuse the functionality of the module (modules) for working with business logic, which in turn uses the module for working with the data storage environment.

Another benefit is increased efficiency in dependency management. It becomes possible to control which module dependencies and which part of its code base needs to be transferred to other modules, and which needs to be hidden or encapsulated.

The next advantage is scalability. When using a properly implemented principle of separation of concerns, changes in one module will not cause a cascade of changes in all other modules of the project [4]. However, often, in practice, in both old and new monolithic projects, this principle is not taken into account, which subsequently significantly increases support resources.

However, in the process of implementing a modularization approach, developers can often encounter risks and common architectural mistakes. For example, each module will introduce additional costs in the form of increased assembly complexity and cumbersome boilerplate code. At the same time, the complexity of the module assembly configuration creates the risk of making it difficult to maintain configuration consistency across all project modules in the long term. The costs of implementing this approach should be assessed to see if they will hinder the improvement in scalability. In such cases, a possible solution would be to conduct an architectural refactoring to find modules that could be consolidated.

Conversely, in some cases, especially on large monolithic multimodule projects that are already quite old, the problem arises that the modules can become too large, thereby spawning another monolith, which in turn deprives almost all the benefits of the multimodularity of the project. For example, business logic modules quite often grow in applications, but some functionality is used only once, at the same time requiring quite a lot of configurations and resource costs [5].

The next danger in implementing a multimodule approach is unnecessary complexity. It is necessary to analyze whether, in principle, it makes sense to split the project into modules. The main thing to pay attention to is the size of the codebase. If the project is not expected to exceed a certain size limit, the scalability gain will be either so small or non-existent that implementing the approach discussed will make no sense. As an example, there is no point in splitting very small microservices that perform one single simple action into modules.

To summarize, to determine whether multimodularity is suitable for a particular project, you can only first assess its expected size, the need for scalability, encapsulation, or simply reduce build time, then it makes sense to consider the possibility of switching to a multimodular architecture.

Multimodularity in Java. Java is one of the most popular object-oriented programming languages today [6]. Generally, more commonly used today for either enterprise development or Android development. In addition to a number of advantages that this language has, one of them has only recently begun to appear in a real development environment - the Java Platform Module System (JPMS). Let's look at how this works, using an article from the Baeldung resource [7] as well as material presented in the book «The Java Module System» [8].

JPMS arrived with the 9th release of Java and brought with it a new layer of abstraction over packages known as the Java Platform Module System.

A module in JPMS itself is a group of closely related packages and resources, along with a newly introduced module descriptor file. The packages within each such module are identical to those already existing in Java. Each module is responsible for its own resources, such as, for example, media or properties and configuration files.

At the time of writing, there are four types of modules: system modules - modules that are listed when the list-modules command is run. They include Java SE and JDK modules. Application modules are those modules that are usually created when there is a need to use multimodularity. They are defined in the compiled «Module-info.class» file included in the compiled JAR file. Automatic modules are unofficial modules that can be added to a project by appending existing JAR files to the module path. The module name will be derived from the name of the JAR file. Automatic modules receive full read access to all other modules that have been written to the path. Unnamed Module - In situations where a class or JAR file is loaded on the classpath but not on the module path, it automatically becomes part of the unnamed module. Thus, it is a universal module that allows backward compatibility with previously written Java code.

Modules have two distribution methods. The first is in the form of a JAR file or in the form of a «disassembled» compiled project. It is also possible to create multimodule projects consisting of a «main program» and several library modules. When creating new modules, you need to make sure that there is only one module in each JAR file. When setting up the build file, it is necessary to combine each project module into a separate JAR file. To configure the module, you need to place a specialized file named Module-info.java in the root of the packages. This file is

known as a module descriptor, containing all the data necessary to create and use a new module.

It is worth highlighting a number of problems associated with using the Java Platform Module System. Large number of projects (especially in the corporate environment) are currently avoiding the implementation of this technology due to the difficult migration of existing projects, since it requires quite significant resources and changes. Also, managing dependencies between modules can add complexity to the development process. JPMS requires explicit definition of dependencies, which in turn creates the possibility that the project structure will become more granular and more additional code will need to be written to manage dependencies. Another problem is the limited support for JPMS by the currently extremely popular Maven and Gradle build and deployment systems, which often results in a refusal to implement JPMS into a project. Quite often third-party libraries and frameworks do not have support with JPMS, in cases where their dependency structure is quite complex, or the Java Reflection API is used. In this case, it is necessary to create additional «adapters» that will allow the implementation of JPMS. In some cases, the use of JPMS, like any complex module management structure, can lead to a drop in performance and additional resource costs, which can be especially sensitive for some projects.

Perhaps, the lack of sufficient experience with this technology and, accordingly, its support by third-party frameworks and code makes JPMS a rather controversial option for implementation as a project modularization system, inferior in capabilities to the same tools for assembling and deploying applications such as Gradle and Maven.

Popular solutions. Let's look at popular solutions to improve the process of working with monolithic multimodule applications. The very first and obvious thing is to use popular project build systems for Java projects, such as Apache Maven and Gradle.

Apache Maven is a dependency management and build automation tool primarily used for Java projects [9]. The core concepts of Maven include the POM (Project Object Model) approach, which is an XML file that describes the project structure, its dependencies, plugins and other settings. This file is the main configuration element for Maven and, in turn, contains project information such as name, version, dependencies, etc.

The next concept of Maven is the automatic downloading and management of dependencies, which are specified in the POM file and downloaded automatically using the central Maven repository or other remote repositories. This process build system contains a division of the project build process into several phases, which include compilation, testing, packaging, deployment and others. Each such phase is performed in a specific project and can be configured using plugins. Plugins, in turn, allow you to expand functionality by introducing new build goals or performing other tasks. Maven has both built-in plugins and support for creating your own plugins.

Let's look at how to use Maven for a new project. To do this, we will generate code using the application

archetype «maven-archetype-quickstart». We will use the next example command:

```
mvn archetype:generate -DgroupId=com.example -
DartifactId=my-project -DarchetypeArtifactId=maven-
archetype-quickstart -DinteractiveMode=false
```

Further, as the code is written, the necessary dependencies will be added to the project, for example, the JUnit testing framework. To do this, we need to edit the «pom.xml» file and declare the dependency in it. The example for JUnit dependency is displayed on fig. 1.

```
<dependency>
  <groupId>junit</groupId>
  <artifactId>junit</artifactId>
  <version>4.12</version>
  <scope>test</scope>
</dependency>
```

Fig. 1. The example of the «pom.xml» modification

And when everything is ready, we can run the following command to get the project JAR file in the local Maven repository «mvn clean install».

Gradle is also a tool for automating project build, testing, and deployment, with an emphasis on a declarative paradigm as opposed to an imperative one [10]. The project structure and its dependencies are described using DSL (Domain Specific Language). This tool is more flexible in describing the project structure; DSL can be used based on Groovy, Kotlin. There is also support for parallel builds, incremental builds, the ability to create separate tasks, and much more. For example, the ability to define various assembly tasks, configure dependencies, source code sources, resource management, etc. While Maven can also be used for monolithic, multimodule Java projects, Gradle, due to its flexibility and rich customization options, is often preferred for more complex projects with a large number of modules and components.

Let's look on at a simple example of how Gradle allows us to create a task to package, test, further build and deploy a JAR file of a specific module to a specific path. The example is on fig. 2.

The image describes the general example structure of the «build.gradle» files. With defining the plugins, group, version, module dependencies, configured repository sources and specific tasks created manually. This file is placed in each module of the project supported by Gradle build system. The configuration properties could be changed in the «gradle.properties» file placed in resources.

This «build.gradle» file defines the following tasks. «buildModule» – the task that builds the module will first execute the «clean» (to clean up previous builds) and «test» (to run tests) commands, after which a JAR file will be created using the corresponding «Jar» plugin. «testModule» is a task that runs unit tests for the module. «deployModule» – this task deploys the assembled JAR file to the specified directory. Thus, you can execute all three commands by running only one of them.

```

plugins {
    id 'java'
}

group 'com.example'
version '1.0-SNAPSHOT'

repositories {
    mavenCentral()
}

dependencies {
    testImplementation 'junit:junit:4.12'
}

task buildModule(type: Jar) {
    dependsOn 'clean', 'test'
    archiveFileName = "${project.name}-${project.version}.jar"
    destinationDir = file("${buildDir}/libs")
    from sourceSets.main.output
}

task testModule(type: Test) {
    testClassesDirs = sourceSets.test.output.classesDirs
    classpath = sourceSets.test.runtimeClasspath
}

task deployModule(type: Copy) {
    dependsOn 'buildModule'
    from "${buildDir}/libs"
    into 'path/to/deployment/directory'
}

```

Fig. 2. The example of the «build.gradle» file

Gradle has incremental (enabled by default) and parallel project builds.

Parallel assembly, while reducing time costs, especially for multicore systems, can also significantly increase the required computing resources of the system where it occurs.

And the next recommendation is to use Docker to simplify the deployment process [11]. The use of this technology will bring a number of advantages to the project. The ability to flexibly configure Docker files for each module has a positive impact on the scalability of the project.

Perhaps one of the few disadvantages of this technology is the complexity of configuring the Docker images themselves, especially for beginners and in cases where the project has a complex structure with a large number of dependencies. Docker containers themselves will require additional computing resources to operate. This may result in increased costs for maintaining the application deployment environment [12].

Thus, Docker may introduce additional costs for maintenance and support, including container orchestrators (for example, Kubernetes). However, for large projects this is a good solution that will make the deployment process much more efficient.

Let's look at how to use Docker in practice. Let's imagine that we have a monolithic project in Java, which has several modules, let's call them abstractly «repository», «api», «service», «web». First of all, we will define a Dockerfile for each of the modules. The example of the Dockerfile for «api» is displayed on fig. 3.

The next step will be building and running the Docker images for each of the modules with the next type of commands. «docker build -t myproject-api:1.0 api» and «docker run -d --name api-container myproject-api:1.0» And this is how we get a running container for the «api» module in the background.

```

# Using a base JDK image
FROM openjdk:11
# Copy a JAR-file from the project build to the container
COPY build/libs/api.jar /app/api.jar
# Define a command for project start
CMD ["java", "-jar", "/app/api.jar"]

```

Fig. 3. The example of the Dockerfile

Conclusions. The result of this article, is examined features of working with multimodule monolithic Java projects.

Listed the key problems of this type of project architecture, ways to solve them, as well as technologies and tools that can improve the efficiency of the development and deployment of these projects, and gave practical examples of their use. Discovered the ways to replace the monolithic architecture with the microservice architecture.

As a summary, the main recommendation discovered in this article is to get rid of most of the problems is to switch to a microservice architecture whenever possible, use the Gradle project build tool and Docker containerization. This makes the development process more effective and reduces the project support costs.

References

1. Atlassian. *Microservices vs. monolithic architecture*. URL: <https://www.atlassian.com/microservices/microservices-architecture/microservices-vs-monolith> (дата звернення: 3.05.2024).
2. Martin R. *Clean architecture*. Prentice Hall, 2017. 432 p.
3. *Microservices.io. Pattern: Monolithic Architecture*. URL: <https://microservices.io/patterns/monolithic.html> (дата звернення: 10.05.2024).
4. Fowler M. *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Addison-Wesley Professional, 2003. 560 p.
5. *Android Developers. Guide to android app modularization*. URL: <https://developer.android.com/topic/modularization> (дата звернення: 10.05.2024).
6. Bloch J. *Effective Java*. Addison-Wesley Professional, 2017. 416 p.
7. Franklin C. *A guide to java 9 modularity*. Baeldung. URL: <https://www.baeldung.com/java-9-modularity> (дата звернення: 10.05.2024).
8. Parlog N. *Java module system*. Manning Publications Co. LLC, 2019. 440 p.
9. Lalou J. *Apache Maven Dependency Management*. Packt Publishing, 2013. 158 c.
10. Muschko B. *Gradle in action*. Manning Publications Co. LLC, 2014. 480 p.
11. Mouat A. *Using docker: developing and deploying software with containers*. O'Reilly Media, Incorporated, 2015. 354 p.
12. Oggl B., Kofler M. *Docker: practical guide for developers and devops teams (the rheinwerk computing)*. Rheinwerk Computing, 2023. 491 p.

References (transliterated)

1. Atlassian. *Microservices vs. monolithic architecture*. Available at: <https://www.atlassian.com/microservices/microservices-architecture/microservices-vs-monolith> (accessed 10.05.2024).
2. Martin, R. C. *Clean Architecture*. Prentice Hall, 2017. 432 p.
3. *Microservices.io. Pattern: Monolithic Architecture*. Available at: <https://microservices.io/patterns/monolithic.html> (accessed 10.05.2024).
4. Fowler M. *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Addison-Wesley Professional, 2003. 560 p.
5. *Android Developers. Guide to Android app modularization*. Available at: <https://developer.android.com/topic/modularization> (accessed 10.05.2024).
6. Bloch, J. *Effective Java*. Addison-Wesley Professional, 2017. 416 p.

7. Franklin, C. *A Guide to Java 9 Modularity. Baeldung*. Available at: <https://www.baeldung.com/java-9-modularity> (accessed 10.05.2024).
8. Parlog, N. *The Java Module System*. Manning Publications Co. LLC, 2019. 440 p.
9. Lalou, J. *Apache Maven Dependency Management*. Packt Publishing, 2013. 158 p.
10. Muschko B. *Gradle in action*. Manning Publications Co. LLC, 2014. 480 p.
11. Mouat A. *Using docker: developing and deploying software with containers*. O'Reilly Media, Incorporated, 2015. 354 p.
12. Oggel B., Kofler M. *Docker: practical guide for developers and devops teams (the rheinwerk computing)*. Rheinwerk Computing, 2023. 491 p.

Received 15.05.2024

УДК 004.41

М. Д. ВЕРЕС, студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: maksym.veres@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1768-8693>

Н. В. ГОЛЯН доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна, 61166; e-mail: nataliia.golian@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1390-3116>

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ РОЗРОБКИ МОНОЛІТНИХ БАГАТОМОДУЛЬНИХ ПРОЄКТІВ НА JAVA

В останні роки спостерігається зростання складності розробки програмного забезпечення на Java та зміна обсягу проєктів, у тому числі збільшення кількості модулів у проєктах. Багатомодульність проєктів хоча й покращує певною мірою керованість, але часто створює низку проблем, які можуть ускладнити розробку та, проблему, яка з'явиться в майбутньому, вимагати більше ресурсів для підтримки. У цій статті буде проаналізовано основні проблеми монолітних багатомодульних Java-проєктів і зроблена спроба розглянути ряд можливих рішень для подолання вищезазначених проблем. У статті розглядаються особливості роботи з багатомодульними монолітними проєктами з використанням Java як основної мови програмування. Метою даної статті є виявлення особливостей і перешкод при використанні вищезазначеного архітектурного підходу програмного забезпечення, аналіз основних можливих проблем роботи з монолітними багатомодульними Java-проєктами, а також надання рекомендацій щодо усунення цих перешкод або опису особливостей процесу, який може допомогти інженерам у підтримці такого роду проєктів. Іншими словами, основною метою даної роботи є створення рекомендацій, надання сучасних кращих практик роботи з монолітною багатомодульною архітектурою програмного забезпечення та найпопулярнішими сучасними технологічними рішеннями, які використовуються в корпоративній розробці. Запропоновані рекомендації дозволяють команді, насамперед розробникам та інженерній стороні, уникнути можливих перешкод, які призводять до втрати ефективності процесу розробки монолітного програмного забезпечення. Найважливішою перевагою, з рекомендацій, наведених у статті, є оптимізація витрат ресурсів (часових, грошових і трудових) на процес розробки. У результаті статті отримано загальний список рекомендацій, який дозволяє розробнику краще проаналізувати, які зміни в проєкті необхідно (якщо необхідно) внести для оптимізації процесів розробки, збірки та розгортання монолітного Java-проєкту, а також поради для розробки нового програмного забезпечення, щоб уникнути основних перешкод монолітної архітектури в майбутньому.

Ключові слова: монолітна архітектура, багатомодульна архітектура, Java, збірка проєкту, модуль, розробка, розгортання проєкту.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Верес Максим Дмитрович / Veres Maksym Dmytrovych

Автор 2 / Author 2: Голян Наталія Вікторівна / Golian Natalia Viktorivna

Д. І. ГОЛЬДІНЕР, аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна; e-mail: denys.holdiner@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-1867>

РОЗРОБКА АРХІТЕКТУРИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПІД ІМПЛЕМЕНТАЦІЮ МОВОЮ ПРОГРАМУВАННЯ GO

Предметом дослідження статті є – методи та підходи до організації архітектури програмної реалізації, призначеної для моделювання поведінки систем масового обслуговування. Мета роботи – спроектувати архітектуру програмного забезпечення під реалізацію мовою Go, призначену для відтворення поведінки систем масового обслуговування різних типів, без урахування виходу з ладу окремих каналів обслуговування, з використанням паралельних обчислень. У статті вирішуються наступні завдання: розглянути підстави для проектування архітектури та зробити висновок про її доцільність; розробити вимоги до майбутнього програмного продукту задля більш ефективного використання ресурсів та чіткого визначення успішного завершення роботи; провести аналіз підходів до організації архітектури програмного забезпечення й прийняття обґрунтованого рішення щодо застосування одного з них; спроектувати загальну схему алгоритму з урахуванням всіх вимог; визначити компоненти системи, що моделюється, та їхні взаємодії; побудувати процесні діаграми з урахуванням особливостей мови програмування Go; визначити спосіб та контракти взаємодії з програмним забезпеченням. Для досягнення поставлених цілей дослідження використовуватимуться такі методи: мова програмування Go, конкаренсі, архітектурні UML діаграми, C4 діаграми, процесні діаграми. Було здобуто такі результати: визначено вимоги до програмного забезпечення моделювання СМО; розглянуто поширені підходи до організації архітектури та проведено для них порівняльний аналіз; розроблено структуру майбутньої програми на необхідних рівнях абстракції; вперше запропоновано архітектуру програмного продукту для моделювання різноманітних систем масового обслуговування із застосуванням паралельних обчислень та підходу конкаренсі під реалізацію мовою програмування Go.

Ключові слова: архітектура програмного забезпечення, комп'ютерне моделювання, система масового обслуговування, мова програмування Go, конкаренсі, паралелізм.

Вступ. Першим, і безперечно базовим кроком при роботі над якісним програмним забезпеченням – є його архітектурне рішення. Адже, як дім не будують без креслень – програмний продукт не пишуть без архітектури. Саме архітектура системи визначає компоненти, що прийматимуть участь в обробці даних, їхню будову, а також спосіб взаємодії [1]. Вона являє собою чіткий рецепт, що буде однаково сприйнятий будь-яким інженером, і дозволить уникнути непорозумінь при реалізації задуманого. Відповідно, ми уникаємо залежності від конкретних особистостей, розблокуємо потенціал до розширення команди розробки, а також нівелюємо ризики, пов'язані зі зміною ключових членів колективу інженерів.

Разом з тим, на початку роботи над новим продуктом у більшості випадків існує тільки часткове розуміння потреб та призначення майбутнього програмного забезпечення. Це пов'язано зі складністю проєктованих систем та незліченною кількістю сторонніх чинників, що впливають на них. У зв'язку з цим, розуміння реальних потреб виникає на етапі проєктування під впливом дослідження проблематики, а також правильної постанови запитань до бізнес-доменів [2].

Не можна забувати й про подальший розвиток програмного забезпечення. Згодом дуже ймовірно постає потреба в одному або декількох одночасно підкласів масштабування:

- Збільшення навантаження й пропускної здатності окремих частин програми;
- Зміна або розширення користувацьких потреб з подальшою надбудовою функціоналу;
- Розширення команди або декомпозиція зон відповідальності з подальшою делегацією

повноважень між кількома автономними командами розробки.

Кожен з наведених різновидів масштабування потребує завчасно закладеного підґрунтя, що надає можливість безшовної, поетапної розбудови програмного продукту, без необхідності глибокої переробки вже існуючого функціоналу [3].

Разом з тим, передбачити абсолютно всіх потенційних сценаріїв розвитку подій неможливо. Відповідно, пошук балансу між гнучкістю та складністю – є черговою задачею, що закладено у процес побудови архітектури. Зазвичай вирішення полягає у завчасному застосуванні абстракцій, що відокремлюватимуть конкретну реалізацію від функціоналу, що очікується.

Гарна ізоляція компонентів дозволяє підвищити надійність та стійкість програмного забезпечення до помилок виконання, а також знизити потенційний вплив змін, що вносяться в окремі частини програми, локалізуючи їх у рамках фіксованих абстракцій [1].

Додатковим приводом до того, щоб приділити достатньо уваги проєктуванню перед початком роботи – є ціна виправлення помилки. На етапі побудови архітектури задля виправлення недоліків проєктування, необхідно переписати документацію та внести зміни до діаграм і блок-схем, на відміну від кількості часу та зусиль, що вимагаються для модифікації вже існуючої програми. І чим більш пізня фаза розробки розглядається – тим складніше буде виправити недолік [1]. Отже, приділивши більше часу й зусиль до розробки архітектури програмного продукту, ми значно економимо час та ресурси, необхідні на внесення правок у майбутньому.

Окрім того, цілком можливо, що під час проєктування або незабаром, після закінчення процесу

© Гольдінер Д.І., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом **НТУ «ХПІ»** у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



побудови архітектури, проєкт буде визнаний недоцільним. Адже, знайдеться інший шлях до вирішення потреби, суттєво дешевший або швидший. Відповідно, задача архітектурного рішення полягає, зокрема, у загальній оцінці витрат, ризиків, а також в обґрунтуванні необхідності саме такого шляху до забезпечення потреб.

Роль маяку доповнює перелік задач, що покликана вирішувати архітектура програмного забезпечення. Доволі часто трапляється, що під час роботи над імплементацією проєкту, виникають нові іспити та необхідно підлаштовуватись під змінені потреби [2]. Архітектура системи забезпечує орієнтир, що має використовуватись для звірки відповідності чергового рішення загальному курсу й стратегії розвитку.

Мета дослідження. За визначенням архітектура програмного забезпечення зобов'язана задовольняти потребам чітко визначеної задачі. Саме тому є вкрай важливим приділити достатню увагу специфікації проблеми, що вирішується. У нас на меті стоїть побудова програмного забезпечення для моделювання поведінки систем масового обслуговування. При цьому є велика кількість різновидів СМО, що поділяються за наступними критеріями [4]:

- Наявність одного чи більшої кількості каналів обслуговування, що надають послугу;
- Наявність або відсутність черги очікування для новоприбулих заявок, на випадок, якщо всі наявні канали обслуговування зайняті;
- Кінцевість або необмежений розмір черги очікування;
- Політика пріоритизації вимог, що визначає, яка саме вимога з очікуючих буде приступати до обслуговування в разі звільнення каналу;
- Наявність обмежень часу перебування в системі або часу обслуговування.

У рамках даного дослідження нас цікавить у першу чергу моделювання багатоканальної системи з обмеженою чергою та відмовами новоприбулим вимогам, у разі відсутності місця для очікування. Але при цьому ми закладатимемо можливість розширення та підтримки всіх інших різновидів СМО у майбутньому. Кінцевою метою програмного продукту є універсальна програма, що надає можливість моделювати різноманітні процеси, порівнювати поведінку систем зі змінними режимами та параметрами [5]. Не останню роль гратиме швидкодія моделювання, яка має надати можливість отримувати швидше результат відтворення поведінки складних систем та оптимізувати процес завдяки результатам експериментів. Допоміжним підходом у досягненні мети – буде застосування паралельних обчислень. А залучення підходу конкурентності – наблизить поведінку моделі до природнього досліджуваного процесу.

Постановка задачі. У даному розділі ми перелічимо ті чіткі вимоги, які ми встановлюємо як ключові для результуючого програмного забезпечення.

1. Можливість перед початком роботи програми визначити основні характеристики системи, що описуватимуть її поведінку, а саме – кількість каналів

обслуговування, сміність черги. На даному етапі моделюються СМО з обмеженою чергою.

2. Можливість визначати максимальний час перебування заявки у системі, а також граничну тривалість обслуговування. У випадку перевищення даного часу обробка переривається та вимога покидає систему з помилкою.

3. Обслуговування полягає у виконанні функції, заданої перед початком роботи програми. Вона є єдиною для всіх вимог і використовує для розрахунків вхідні параметри, що визначаються заявкою. Сама функція може мати довільну логіку, але має очікувати вхідні параметри й повертати результат обробки або помилку.

4. Забезпечити підрахунок та збір інформації щодо кількості провалених задач задля подальшого аналізу ефективності системи.

5. Обслуговування черги заявок у послідовності їхнього надходження (FIFO).

6. Співпадіння послідовності повернення результатів виконання вимог із їхнім надходженням не гарантується системою.

Сформульовані таким чином вимоги вписуються у визначення систем масового обслуговування та мають надавати вичерпний функціонал для моделювання широкого спектру процесів [5].

Визначення типу архітектури. Першим значним роздоріжжям на шляху до побудови архітектурного рішення є відповідь на запитання про тип програмного забезпечення. Існує кілька підходів до того, як буде викликатись та виконуватись застосунок [6]. Умовно їх можна оцінити за наступними критеріями:

- Чи має програмне забезпечення свою незалежну область пам'яті та планувальник виконання.
- Чи є застосунок доступним неперервно, чи він запускається за вимогою на час обробки;
- Яким саме чином забезпечується взаємодія з функціоналом і передача параметрів.

За даними ознаками можна поділити підходи на кілька груп, що наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація видів програмного забезпечення

| | Окремий рантайм | Доступність | Пряма взаємодія |
|-------------------|-----------------|-------------|-----------------|
| Утиліта | + | - | - |
| Серверлес | + | - | - |
| Сервер (HTTP/RPC) | + | + | - |
| Пакет | - | + | + |

Командна утиліта має свій рантайм, але при цьому її необхідно запускати кожен раз, коли з'являється необхідність взаємодії, що погіршує її доступність. Крім того, з недоліків маємо ускладнену комунікацію через передачу параметрів та результатів у вигляді параметрів командного рядку.

Серверлес – це технологія що пропонується представниками великих хмарних провайдерів. По суті являє собою гібрид командної утиліти та серверу. За такого підходу відповідальність за запуск програми та

комунікацію беруть на себе відповідні сервіси провайдера. З суттєвих недоліків такого підходу – велика кількість посередників, слабко типізовані контракти та нестабільність часу очікування через те, що функції, які певний час не викликаються, переводяться у гібернацію. І наступний раз необхідно чекати на їхній перезапуск. Проблема контактів можна вирішити із застосуванням додаткових сервісів, але це в значній мірі ускладнює систему [7].

Наступною групою є сервери. Вони працюють неперервно й незалежно від клієнтського застосунку, що спрощує раптову взаємодію та робить час відповіді прогнозованим. Однак, і в цьому випадку для використання у контрактах ми обмежені типами даних, що можуть приймати текстовий формат. У випадку з функцією такий підхід вимагатиме перетворення тексту запиту на програмний код та підключення його до виконання сервером. Такі дії значно збільшують складність та додають вразливостей системі.

У мові програмування Go найменший рівень абстракції, а також інкапсуляції забезпечується пакетом [8]. При цьому пакети є частиною рантайму загального застосунку та на них поширюються всі можливості по використанню системи типів мови програмування Go. Отже, ми можемо визначити тип параметра як функції та застосувати дженерік типи для абстрагування від фактичних значень зі збереженням жорсткої типізації.

Кожен з перелічених підходів має свої переваги та недоліки. Однак, враховуючі вимогу щодо гнучкості функції, яка описуватиме логіку обслуговування, перед нами постає необхідність визначати саму функцію на боці клієнтського коду й передавати до функціоналу, що обслуговуватиме процес моделювання. Це можна реалізувати за допомогою кодогенерації. Однак за такого підходу ми значно ускладнюємо реалізацію. Отже, наша стратегія полягатиме в тому, щоб реалізувати найпростіший і найбільш природний для мови програмування Go варіант із забезпеченням ізоляції відповідальності. Це дозволить відокремити спосіб комунікації в окремі абстракції та зробити можливим перевикористання однієї логіки за потреби у багатьох різних способах. Ми приймаємо рішення про розробку

архітектури програмного продукту як пакету з делегацією відповідальності за спосіб комунікації рівню взаємодії.

Вирішення проблеми. Для початку необхідно визначитись із загальними компонентами, що приймають участь у побудові алгоритму [9], а саме:

- Приймач заявок – по суті є публічним API пакетом. Задача полягає в прийомі вимог, загальній валідації та постанові до черги. У випадку переповнення черги – заявці буде відмовлено в обслуговуванні;

- Черга очікування – приймає та утримує вимогу до звільнення каналу обслуговування. Надає перевагу заявкам, що надійшли раніше;

- Канал обслуговування – безпосередньо обробник заявок. За раз може опрацьовувати не більше однієї вимоги. Перед початком виконання перевіряє чи не вичерпано час перебування заявки у системі. У випадку виникнення помилки при роботі або перевищення часу обслуговування має переривати виконання. Одразу після звільнення переходять у режим очікування чергової заявки;

- Пост-обробник результатів – відокремлює вдалі заявки від таких, яким було відмовлено в обслуговуванні. У подальшому реєструє причини провалів, а також може виконати інші допоміжні задачі, такі, як ведення обліку подій.

- Потік результатів – повертає користувачу API результат обробки заявок з додаванням додаткової інформації щодо причин відмови на випадок помилки під час обслуговування.

Такий розподіл компонентів повністю лягає на теорію масового обслуговування і забезпечує вичерпну функціональність щодо моделювання СМО [5]. Загальну схему компонентів та послідовність обробки заявки [9] зображено на рис. 1.

Наступним етапом необхідно підготувати цикл діаграм, що описуватимуть майбутню імплементацію з інженерної точки зору. Для цього скористаємось моделлю С4 – простим, прозорим і легким у використанні інструментом для розробників та архітекторів. Він покликаний стандартизувати поетапне проектування складних систем, де ми починаємо

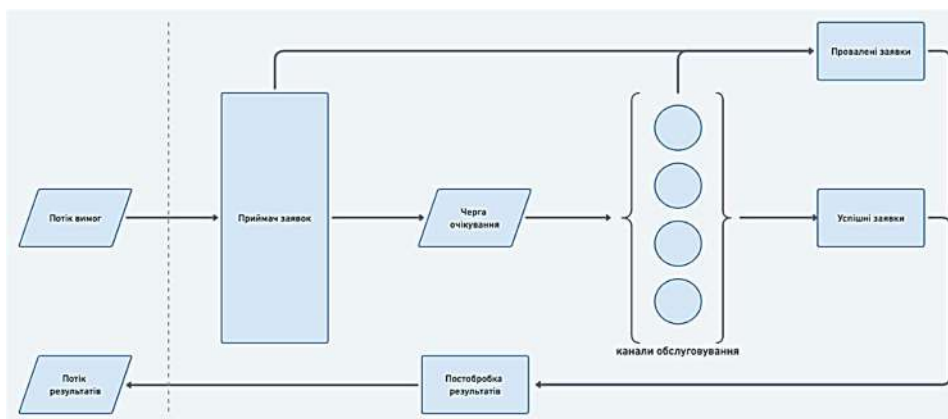


Рис. 1. Загальна схема алгоритму

занурення із загального вигляду системи та наближаємось з кожним наступним етапом ближче до реалізації. Така модель включає в себе всього 4 кроки.

Найвищий рівень абстракції – це C1. На ньому відображається контекстна діаграма із загальним зображенням системи. На рис. 2 можемо спостерігати дві сутності: користувача та кінцевий програмний продукт, що містить експеримент. Пакет, архітектуру якого ми закладаємо в рамках дослідження, на даному етапі не має значення оскільки він інтегрований всередину експерименту.



Рис. 2. Рівень моделі C1

На наступному рівні, також відомому як контейнерний, нас вже цікавить загальна будова системи без надмірних подробиць, але на рівні, необхідному для розуміння взаємодії глобальних складових. Дану діаграму зображено на рис. 3.



Рис. 3. Рівень моделі C2

Нарешті, час перейти до компонентної діаграми. Її роль в описі системи полягає в зображенні структурної будови досліджуваних компонентів. Нас найбільш цікавить саме пакет, архітектуру якого ми і будемо. З рис. 4 випливає, що ключову роль системи відіграватиме канал обслуговування. Саме в цьому вузлі буде відбуватися обробка заявки, а також всі додаткові умови щодо часу перебування. Роль оркестрації та застосування конкаренсі має опрацьовувати окремий пакет [10]. Відокремлення реалізації паралелізму дозволить перевикористати даний функціонал для інших потреб, а також обмежити доступ користувачам.

Наступним рівнем абстракції буде діаграма коду, на ній будуть зображені подробиці реалізації специфічні для конкретної мови програмування Go. На рівні C4 найбільш цікавими для нас є дві зони відповідальності: симуляція СМО та організація паралельних обчислень шляхом застосування підходу конкаренсі [11].

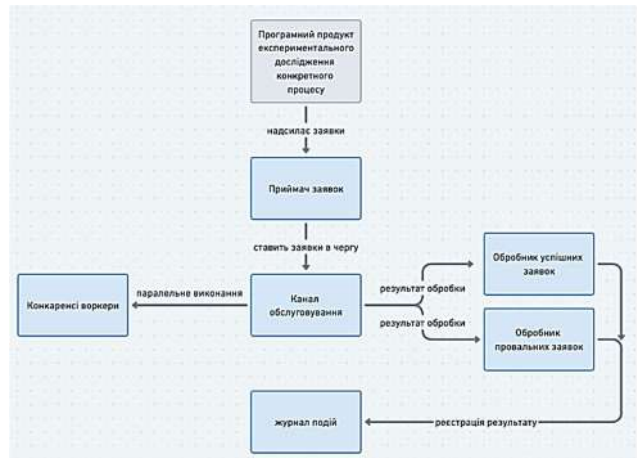


Рис. 4. Рівень моделі C3

Основна ідея полягає в чіткому розподіленні обов'язків і побудова абстракцій на місцях перетину. Відповідно до визначених вимог, будемо будувати два окремих пакети, кожен з яких буде надавати публічне API, і при цьому ховати всі деталі реалізації. При цьому сама заявка має бути обгорнута опціями, які будуть додавати додаткові властивості процесу без прямого в нього втручання. Дана діаграма наведена на рис. 5.

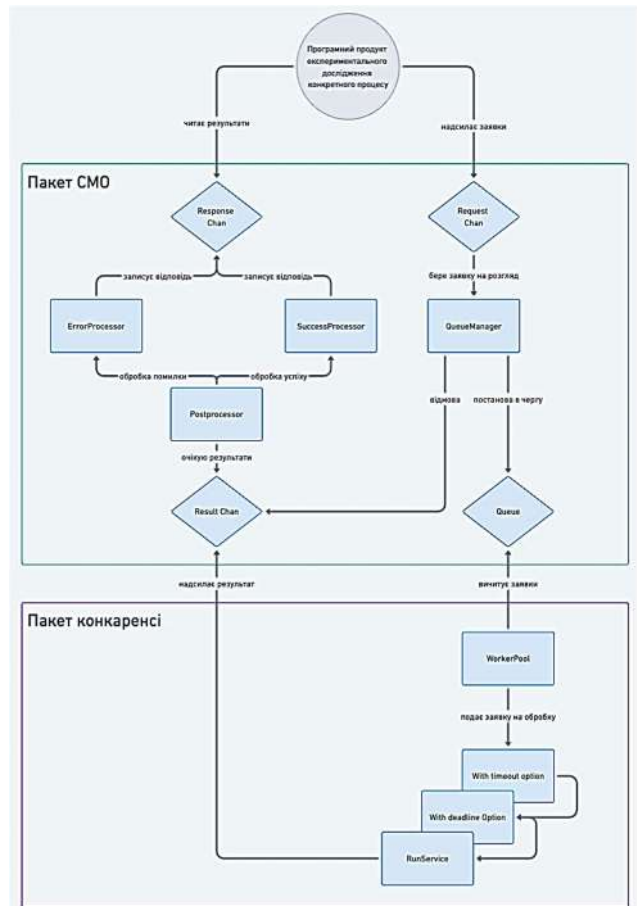


Рис. 5. Рівень моделі C4

У мові програмування Go асинхронна комунікація може бути забезпечена за рахунок вбудованого типу "канал" [8]. Ця структура даних надає можливість

організувати безпечний доступ до заявок, які очікують у буфері й будуть поступати одержувачам у послідовності, що співпадає з надходженням до черги. Оскільки запис у переповнений канал у мові Go неможливий – це дає нам зручну обставину для відмови. Максимальний час перебування в системі може бути обмежений із застосуванням контексту з тайм-аутом. Після вичерпання часового ліміту буде подано сигнал, який буде доступний в горутині, що обслуговує заявку, і буде надавати право переривання обробки. Кількість каналів обслуговування для системи буде визначатись кількістю горутин, які задіяні в пулі обробки. Самі по собі канали СМО можуть бути реалізовані за допомогою патерну паралельного програмування "worker" [10], реалізованого за допомогою легких програмних потоків – горутин. Такий підхід чудово гармоніє з іншим дуєтом підходів fan-in та fan-out [10][12]. Вони описують взаємодію між паралельними процесами та організацію асинхронної комунікації за умов різної кількості споживачів та генераторів повідомлень. Задля відокремленої та гнучкої пост-обробки ми додаємо кілька додаткових елементів, які будуть тимчасово розділяти успішні та провалені заявки. І після здійснення необхідних кроків передавати у канал відповіді заявнику.

Отже, дана система може бути реалізована мовою програмування Go, і в повній мірі задовільнити вимоги, сформовані у постановці задачі.

Гарною практикою при проектуванні API пакетів у мові програмування Go – є зменшення кількості способів взаємодії, а також максимальне їх спрощення [10]. Метою такого підходу є унеможливлення хибного використання функціоналу та скорочення часу необхідного для засвоєння можливостей пакету. У нашому випадку кількість функцій, що доступні до використання клієнтам, може бути доведено до всього лиш однієї. Це буде операція по ініціалізації СМО із заданими параметрами й передачею каналу, що буде використовуватись для подачі заявок. У відповідь дана функція (конструктор) поверне змінну типу канал для читання результатів, і вся подальша взаємодія буде відбуватись за допомогою двох каналів. Як результат, замість кооперації через надання спільного доступу до певних ділянок пам'яті кільком паралельним процесам, ми перебудовуємо механізм на взаємодію через спілкування повідомленнями. Такий підхід було введено і детально описано в роботі Ентоні Хоара у рамках його роботи з "Communicating Sequential Processes", або скорочено CSP [13]. Для завершення роботи з СМО буде достатньо закриття каналу для надходження заявок, що призведе до лагідного згортання всіх процесів. Як і було зазначено у вимогах, всі характеристики системи мають задаватись через структуру конфігурації перед початком роботи та бути використані при ініціалізації процесу

Висновки. У ході дослідження було розглянуто підстави до дизайну архітектури програмного забезпечення, призначеного для моделювання систем масового обслуговування. Аргументи були достатньо вагомими для прийняття рішення про доцільність

проектування. Для отримання задовільних результатів було сформовано ряд вимог щодо майбутньої реалізації та оцінені їх пріоритети. З метою досягнення високої якості й зручності у використанні майбутньої програми, було розглянуто декілька можливих підходів до архітектури. З урахуванням особливостей мови програмування Go, було обрано шлях розробки застосунку у вигляді пакету. Для поставленої задачі було підготовлено загальну діаграму алгоритму опрацювання заявок, а також спроектовано всі чотири рівні моделі С4. Була також врахована вимога щодо паралельного обслуговування заявок СМО з використанням підходів конкаренсі. Вся проектна документація розроблена під імплементацію мовою Go з використанням вбудованого функціоналу. У ході дослідження вперше було запропоновано архітектуру програмного забезпечення, призначену для моделювання різноманітних систем масового обслуговування із застосуванням паралельних обчислень і підходів конкаренсі під імплементацію мовою програмування Go.

Список використаної літератури

1. Conery R., Hanselman S., Haack P., Guthrie S. *Microsoft Application Architecture Guide, 2nd Edition: Designing Applications on the .NET Platform*. Microsoft Press, 2009. 560 p.
2. Кірхар Н. В. Застосування технології архітектурного проектування програмного забезпечення. *Проблеми інформатизації та управління*. 2019. Т. 1, № 64. С. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.61.14038>
3. Форкун Ю., Мартинюк В., Яшина О. Метод розробки та проектування архітектурної складової програмного застосунку. *Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. № 4. С.87–93. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-11>
4. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. Москва: Наука, 1987. 336 с.
5. Литвинов А. Л. *Теория систем массового обслуживания*. Харьков: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 141 с.
6. Морозов А., Вакалюк Т., Кубрак Ю., Зосімович Д. Аналіз факторів впливу на архітектуру програмних систем. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2022. № 1, С. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-7>
7. System Architecture. URL: <https://rubygarage.org/blog/monolith-soa-microservices-serverless> (дата звернення: 03.03.2024).
8. Donovan A. A., Kernighan B. W. *The Go programming language*. New York: Addison-Wesley Professional, 2015. 400 p.
9. Лісняк А. О., Мильцев О. М., Мухін В. В., Чопорова О. В. *Архітектура та проектування програмного забезпечення: метод. рек-ції до лаб. зан. для здобувачів ступ. вищ. осв. бакалавра спец. 121 «Інженерія програмного забезпечення» осв.-проф. прог. «Програмна інженерія»*. Запоріжжя: ЗНУ, 2022. 53 с. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/xmlui/handle/12345/11642> (дата звернення: 01.04.2024).
10. Castro Contreras M. *Go Design Patterns*. Birmingham: Packt, 2017. 402 p.
11. Hoare C. A. R. *Communicating sequential processes*. New Jersey: Prentice Hall, 1985. 235 p. DOI: <https://doi.org/10.1145/359576.359585>
12. Cox-Buday K. *Concurrency in Go: Tools and Techniques for Developers 1st Edition*. Sebastopol: O'reilly Media, 2017. 236 p.
13. Hoare C. A. R. *Communicating sequential processes. Communications of the ACM*. 1978. Vol. 21. № 8. P. 666–677. DOI: <https://doi.org/10.1145/359576.359585>.

References (transliterated)

1. Conery R., Hanselman S., Haack P., Guthrie S. *Microsoft Application Architecture Guide, 2nd Edition: Designing Applications on the .NET Platform*. Microsoft Press, 2009. 560 p.

2. Kirkhar N. V. Zastosuvannia tekhnologii arkhitekturnoho proektuvannia programnoho zabezpechennia [Application of software architectural design technology]. *Problemy informatyzatsii ta upravlinnia* [Problems of informatization and management] 2019, vol. 1, no. 64, pp. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.61.14038> (In Ukr.)
3. Forkun Yu., Martyniuk V., Yashyna O. Metod rozrobky ta proektuvannia arkhitekturnoi skladovoi programnoho zastosunku [The method of development and design of the architectural component of the software application]. *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh* [Measuring and computing equipment in technological processes]. 2023, no. 4, pp. 87–93. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-11> (In Ukr.)
4. Gnedenko B. V., Kovalenko I. N. *Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* [Introduction to Queuing Theory]. Moskva, Nauka, 1987. 336 p. (In Russ.)
5. Lytvynov A. L. *Teoriia system masovoho obsluzhuvannia* [Queuing Theory System]. Kharkiv, KhNUMH im. O. M. Beketova, 2018. 141 p. (In Ukr.)
6. Morozov A., Vakaliuk T., Kubrak Yu., Zosimovych D. Analiz faktoriv vplyvu na arkhitekturu programnykh system [Analysis of influencing factors on the architecture of software systems]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2022, no. 1, pp. 44–52. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-1-7> (In Ukr.)
7. System Architecture. URL: <https://rubygarage.org/blog/monolith-soa-microservices-serverless> (accessed 03.03.2024).
8. Donovan A. A. A., Kernighan B. W. *The Go programming language*. New York, Addison-Wesley Professional, 2015. 400 p.
9. Lisniak A. O., Myltsev O. M., Mukhin V. V., Choporova O. V. *Arkhitektura ta proektuvannia programnoho zabezpechennia: metod. rek-tsii do lab. zan. dlia zdobuvachiv stup. vyshch. osv. bakalavra spets. 121 "Inzheneriia programnoho zabezpechennia" osv.-prof. progr. "Prohramna inzheneriia"* [Software architecture and design: methodical recommendations for laboratory classes for higher education bachelor degree holders, specialty 121 "Software engineering" of the educational and professional program "Software engineering"]. Zaporizhzhia: ZNU, 2022. 53 p. URL: <https://dspace.znu.edu.ua/xmlui/handle/12345/11642> (accessed 01.04.2024). (In Ukr.)
10. Castro Contreras M. *Go Design Patterns*. Birmingham, Packt, 2017. 402 p.
11. Hoare C. A. R. *Communicating sequential processes*. New Jersey, Prentice Hall, 1985. 235 p. DOI: <https://doi.org/10.1145/359576.359585>
12. Cox-Buday K. *Concurrency in Go: Tools and Techniques for Developers 1st Edition*. Sebastopol, O'reilly Media, 2017. 236 p.
13. Hoare C. A. R. *Communicating sequential processes. Communications of the ACM*. 1978, vol. 21, no. 8, pp. 666–677. DOI: <https://doi.org/10.1145/359576.359585>.

Надійшла (received) 08.05.2024

UDC 004.9

D. I. GOLDINER, National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine, Graduate student, Kharkiv, Ukraine; e-mail: denys.holdiner@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1456-1867>

SOFTWARE ARCHITECTURE SYSTEM DESIGN FOR THE MASS SERVICE SYSTEMS MODELING TO BE IMPLEMENTED IN GO PROGRAMMING LANGUAGE

The subject of the article is the methods and approaches to organizing the architecture of software implementation designed for modeling the behavior of mass service systems. The goal of the work is to design a software architecture for implementation in Go language, intended to replicate the behavior of various types of mass service systems, without considering the failure of individual service channels, using parallel computing. The article addresses the following tasks: consider the basis for designing the architecture and conclude its appropriateness; develop requirements for the future software product for more effective resource use and clear definition of successful completion; analyze the approaches to organizing software architecture and make a justified decision on the application of one of them; design a general algorithm scheme taking into account all requirements; identify the components of the modeled system and their interactions; build process diagrams considering the specifics of the Go programming language; define the method and contracts of interaction with the software. The research will utilize the following methods: Go programming language, concurrency, architectural UML diagrams, C4 diagrams, process diagrams. The following results were obtained: the requirements for the software for modeling mass service operations (SMO) were defined; common approaches to organizing architecture were considered and a comparative analysis was conducted; the structure of the future program was developed at the necessary levels of abstraction; for the first time, an architecture of the software product for modeling various mass service systems using parallel computing and the concurrency approach under the implementation in the Go programming language was proposed.

Keywords: software architecture, computer modeling, mass service system, Go programming language, concurrency, parallelism.

Повне ім'я автора / Author's full name

Автор 1 / Author 1: Гольдінер Денис Ігорович / Goldiner Denys Ihorovych

С. Ф. ЧАЛИЙ, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>

І. О. ЛЕЩИНЬСЬКА, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії; м. Харків, Україна; e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>

ЕКСТЕРНАЛІЗАЦІЯ НЕЯВНИХ ЗНАТЬ В МЕНТАЛЬНІЙ МОДЕЛІ КОРИСТУВАЧА СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Предметом дослідження є процеси формування ментальної моделі користувача в системах штучного інтелекту. Побудова такої моделі пов'язана з вирішенням проблеми непрозорості та незрозумілості процесу прийняття рішень в таких системах для кінцевих користувачів. Щоб вирішити цю проблему, користувач системи має отримати пояснення щодо отриманого рішення. Пояснення повинно враховувати сприйняття рішення та процесу його прийняття користувачем, що формалізується в рамках ментальної моделі користувача. Ментальна модель враховує використання користувачем явних та неявних знань, останні з яких зазвичай не мають формального представлення. Екстерналізація таких знань забезпечує їх перетворення у формальну форму. Метою роботи є розробка підходу до екстерналізації неявних знань на основі виділення патернів та каузальних залежностей для процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі при побудові ментальної моделі користувача. Для досягнення мети вирішуються такі завдання: розробка ментальної моделі користувача системи штучного інтелекту, яка враховує як явні, так і неявні знання, та розробка підходу до екстерналізації неявних знань користувача системи штучного інтелекту. Запропоновано ментальну модель користувача системи штучного інтелекту, яка враховує як явні, так і неявні знання користувача. Модель враховує зв'язки між явними та неявними знаннями користувача щодо системи штучного інтелекту, процесу прийняття рішень, способу використання рішень та загальної концепції інтелектуальної системи. Це створює умови для екстерналізації неявних знань користувача та подальшого використання цих знань при формуванні пояснень щодо процесу прийняття рішень у системі штучного інтелекту. Запропоновано підхід до екстерналізації знань зі статистичного та семантичного шарів ментальної моделі користувача. У практичному плані підхід дозволяє перевести в явну форму умови та обмеження щодо формування та використання рішень у системі штучного інтелекту.

Ключові слова: ментальна модель, пояснення, система штучного інтелекту, зрозумілий штучний інтелект, ментальна модель, каузальні залежності, причинно-наслідкові залежності.

Вступ. Ментальна модель з позицій когнітивної психології визначається як набір взаємопов'язаних елементів знань, які відображають внутрішнє представлення людини щодо конкретної фізичної системи, інформаційного чи фізичного процесу [1, 2]. Вказана модель дає можливість користувачеві явно представити поведінку такої системи та зробити прогнози щодо результатів її роботи.

Ментальна модель користувача для систем пояснювального штучного інтелекту (ХАІ) визначає представлення щодо сприйняття користувачем процесу прийняття рішення та результатів роботи системи штучного інтелекту. Така модель визначає порядок взаємодії з інтелектуальною системою, а також можливості ефективного використання отриманого від системи рішення. Ментальна модель є основою для створення пояснень, які допомагають користувачеві зрозуміти поведінку і результат роботи системи штучного інтелекту (ШІ). Відповідно, використання ментальної моделі дає можливість сформулювати умови для обґрунтованого прийняття рішень користувачем [3].

Ментальна модель користувача дає можливість підвищити ефективність використання рішень системи ШІ, на основі підвищення довіри користувача шляхом забезпечення прозорості роботи системи. По-перше, якщо користувач розуміє, як система штучного інтелекту приймає рішення, то він більше довіряє її висновкам. По-друге, така довіра базується на зрозумілому, прозорому для користувача представленні процесів в

системі ШІ, що знижує ризик неправильного трактування отриманих результатів. По-третє, внаслідок прозорого представлення процесу прийняття рішення полегшується взаємодія між користувачем і системою за рахунок спрощення інтерфейсу. В-четвертих, ментальна модель спрощує застосування отриманих рішень користувачем, надаючи необхідну інформацію для аналізу і валідації представленого в системі ШІ рішення.

Таким чином, ментальна модель користувача має бути врахована при побудові пояснень в системі штучного інтелекту для вирішення проблеми непрозорості процесу прийняття рішень у таких системах з позиції користувача.

Пояснення, яке відповідає ментальній моделі користувача, забезпечує довіру користувача до отриманого в інтелектуальній системі рішення. Це, у свою чергу, дає можливість ефективно використати отримане рішення на практиці [3].

Для підвищення довіри користувача до рішення інтелектуальної системи використовуються два основні підходи: використання моделей, що є прозорими або інтерпретованими у відповідності до ментальної моделі користувача; використання пояснень для алгоритмів прийняття рішень, що не можуть бути інтерпретовані безпосередньо.

Інтерпретація процесу прийняття рішення відбувається з використанням як явних, так і неявних знань користувача. Концепція неявних знань вперше була запропонована в роботі Michael Polanyi [4]. На відміну

© С. Ф. Чалий, І. О. Лещинська, 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



від явних, неявні знання зазвичай відображають персональний досвід користувача. Подальший розвиток концепції неявних знань, запропонований в роботі японських дослідників I. Nonaka, H. Takeuchi [5] показав, що їх формалізація пов'язана із суттєвими труднощами. Відповідно, екстерналізація неявних знань в ментальній моделі користувача системи штучного інтелекту, тобто трансформація цих знань в явну форму є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження щодо формування ментальних моделей для користувачів систем штучного інтелекту в останні роки проводились згідно програми пояснювального штучного інтелекту, яка передбачає формування пояснень щодо процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі [6]. Необхідність врахувати сприйняття процесу роботи системи штучного інтелекту на пояснення була обґрунтована в [7]. Психологічні аспекти сприйняття пояснень, які свідчать про актуальність побудови ментальної моделі користувача системи штучного інтелекту, розглянуті в роботах [8, 9]. Можливості відображення неявних знань у формі темпоральних залежностей [10], а також інтеграції темпорального та каузального аспектів для пояснення процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі були розглянуті в [11-13].

Аналіз представлених публікацій показує, що при побудові ментальних моделей користувача системи штучного інтелекту використовується переважно описовий підхід, в рамках якого не приділяється суттєва увага переведенню в явну форму та подальшому використанню неявних знань.

Однак для ефективного використання систем штучного інтелекту, зокрема на основі побудови пояснень щодо процесу їх роботи, необхідно екстерналізувати, тобто перевести в явну форму неявні знання з тим, щоб відобразити розуміння користувачем ключових принципів роботи системи штучного інтелекту та ключових етапів прийняття рішення в такій системі. Зазначене свідчить про важливість вирішення задачі екстерналізації таких знань.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у розробці підходу до екстерналізації неявних знань на основі виділення каузальних залежностей для процесу прийняття та використання рішення в інтелектуальній системі в рамках ментальної моделі користувача.

Для досягнення мети вирішуються такі задачі:

- розробка ментальної моделі користувача системи штучного інтелекту, що враховує як явні, так і неявні знання;
- розробка підходу до екстерналізації неявних знань користувача системи штучного інтелекту.

Представлення явних та неявних знань у ментальній моделі користувача системи штучного інтелекту.

Ментальні моделі створюються людьми при вирішенні практичних задач. При побудові таких моделей виконується концептуалізація задач, що мають бути вирішені людиною, а також віртуалізація систем, які підтримують вирішення задач, та артефактів

навколишнього середовища, які використовуються в цих задачах.

У процесі побудови ментальної моделі людини використовуються як явні, так і неявні знання.

Згідно концепції неявних знань [4, 5], останні важко задокументувати та передати вербально. Значна частина наших ментальних моделей ґрунтується на досвіді та навичках, які не можуть бути повною мірою виражені словесно та в подальшому задокументовані для передачі іншим людям. Тому зазвичай такі знання залишаються в рамках особистого досвіду людини. Їх важко передати іншим людям без попередньої трансформації.

На відміну від неявних знань, явні знання є структурованими, систематизованими та документованими. Явні знання можуть бути передані між людьми за допомогою існуючих каналів комунікації. Прикладами явних знань є документи, інструкції, наукові публікації, стандарти тощо. Такі знання можуть бути використані для побудови схожих ментальних моделей у широкого кола людей.

Однак неявні знання є ключовими у процесі інновацій та навчання, тому використання цих знань та їх трансформація в явну форму відіграє суттєву роль у побудові та розвитку ментальних моделей.

Порівняльну характеристику явних та неявних знань з позиції їх представлення у ментальній моделі наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Представлення явних та неявних знань у ментальній моделі користувача системи штучного інтелекту

| Знання | Особливості |
|-----------|---|
| 1. Неявні | – типові шаблони процесу прийняття рішень у визначеній предметній області; – обмежені знання щодо умов та обмежень для використання рішень системи штучного інтелекту; |
| 2. Явні | – причинно-наслідкові залежності між діями процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі; – знання щодо загальних концепцій, на яких базується процес прийняття рішення в системі штучного інтелекту. |

Можна виділити такі ключові знання людини, які впливають на характеристики ментальної моделі:

- загальний досвід користувача у визначеній предметній галузі;
- попередня інформація або досвід роботи із системами у відповідній предметній галузі;
- ключові алгоритми обробки інформації користувача;
- структура представлення даних про предметну галузь у конкретного користувача.

Ментальні моделі мають еволюційний характер, адаптуються до нової інформації, знань та досвіду користувача, забезпечуючи ефективну взаємодію з системами штучного інтелекту та використання результатів, отриманих у таких системах.

Однак ментальні моделі мають ряд недоліків, пов'язаних із використанням неявних знань.

По-перше, зазвичай ментальна модель є неповною внаслідок неповноти знань людини щодо предметної області. По-друге, ментальна модель може включати надлишкові правила, які не відображають особливості предметної області. Ці правила можуть базуватися на попередньому досвіді користувача. Вони забезпечують довіру до системи, з якою працює користувач, але не мають практичної значущості.

Структурно ментальна модель користувача має враховувати концепцію і принципи роботи системи, функції, які виконує система, особливості процесу прийняття рішення, а також контекст, у якому це рішення приймається.

Таким чином, при побудові ментальної моделі користувача в системі пояснювального штучного інтелекту, необхідно використовувати:

- концептуальні знання щодо процесу прийняття рішень у визначеній предметній області;
- знання щодо особливостей використання отриманого в системі результату;
- патерни, що відображають процес прийняття рішень у системі;
- каузальні залежності, що визначають зв'язок між етапами процесу прийняття рішення та отримання результату.

Концептуальні знання щодо процесу прийняття рішень відображають загальний досвід користувача у предметній області. Знання щодо особливостей використання рішення інтелектуальної системи відображають досвід роботи зі схожими системами в предметній області. Патерни процесу прийняття рішень доповнюють алгоритми обробки інформації користувачем. Вони відображають зв'язки між даними та результатом у відповідності до структури представлення даних про предметну область конкретного користувача.

Таким чином, ментальна модель користувача має бути побудована на концептуальному, семантичному, статистичному та каузальному рівнях з використанням відповідних підходів, як представлено в табл. 2.

Структуру ментальної моделі, що враховує явні та неявні аспекти знань користувача, представлено на рис. 1.

Формально модель містить шари з неявними знанням: статистичний B та семантичний S , а також шари з явними знанням: каузальний C та концептуальний P .

$$M = \langle B, S, C, P \rangle. \quad (1)$$

Елементи явних та неявних знань у моделі пов'язані наступним чином. Кожний елемент неявних знань у статистичному шарі має відповідний елемент явних знань у каузальному шарі. Тобто кожний патерн b_i із шару B складається із підмножини каузальних залежностей C_i із шару C .

$$B = \{b_i\}, C = \{c_j\}: \forall b_i \in B \exists C_i \subseteq C. \quad (2)$$

Іншими словами, кон'юнкція каузальних залежностей відображає в явному вигляді патерн b_i :

$$C_i = \{c_{j,1}, c_{j,2}, \dots, c_{j,l} : c_{j,1} \wedge \dots \wedge c_{j,l} \leftrightarrow b_i\}. \quad (3)$$

Аналогічно, кожен елемент семантичного шару s_k має концептуальне обмеження у відповідному шарі p_l :

$$S = \{s_k\}, P = \{p_l\}: (\forall k) \exists l : s_k | p_l. \quad (4)$$

Таблиця 2 – Рівні ментальної моделі користувача системи штучного інтелекту

| Рівень моделі | Особливості |
|--|--|
| 1. Каузальний | <ul style="list-style-type: none"> – каузальні залежності між відомими станами системи або діями процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі; – залежності між вхідними даними та результатом системи штучного інтелекту, що визначають вплив вхідних даних на отриманий результат; – на даному рівні забезпечується пояснення з урахуванням явних знань користувача щодо призначення вхідних і проміжних даних інтелектуальної системи; |
| 2. Статистичний (пов'язаний із неявними знаннями щодо процесу прийняття рішення) | <ul style="list-style-type: none"> – типові патерни процесу прийняття рішення; – патерни відображають відомі дані про проміжні стани процесу формування результату в системі штучного інтелекту; – на даному рівні забезпечуються умови для пояснення рішення системи штучного інтелекту на основі досвіду (зазвичай неявних алгоритмів) обробки інформації користувачем. |
| 3. Семантичний (пов'язаний із рішенням системи) | <ul style="list-style-type: none"> – контекст вирішення задачі, представлений вхідними даними; – умови використання отриманого рішення з урахуванням відмінностей вхідних даних; – на даному рівні забезпечуються умови для пояснення практичної важливості отриманого рішення з урахуванням, у тому числі неявних знань користувача щодо вирішення схожих до цільової задач у визначеній предметній області; |
| 4. Концептуальний (загальні закономірності функціонування системи, що є незалежними від контексту) | <ul style="list-style-type: none"> – загальна схема процесу прийняття рішень у форматі «вхідні дані – ключові кроки – результат»; – загальні обмеження щодо процесу прийняття рішень, що є типовими для різних варіантів контексту вирішення цільової задачі; – ключові умови отримання результату, що не є залежними від поточного контексту; – на даному рівні забезпечуються умови для пояснення щодо принципової можливості отримати релевантне рішення при вирішенні цільової задачі у вибраній предметній області. |

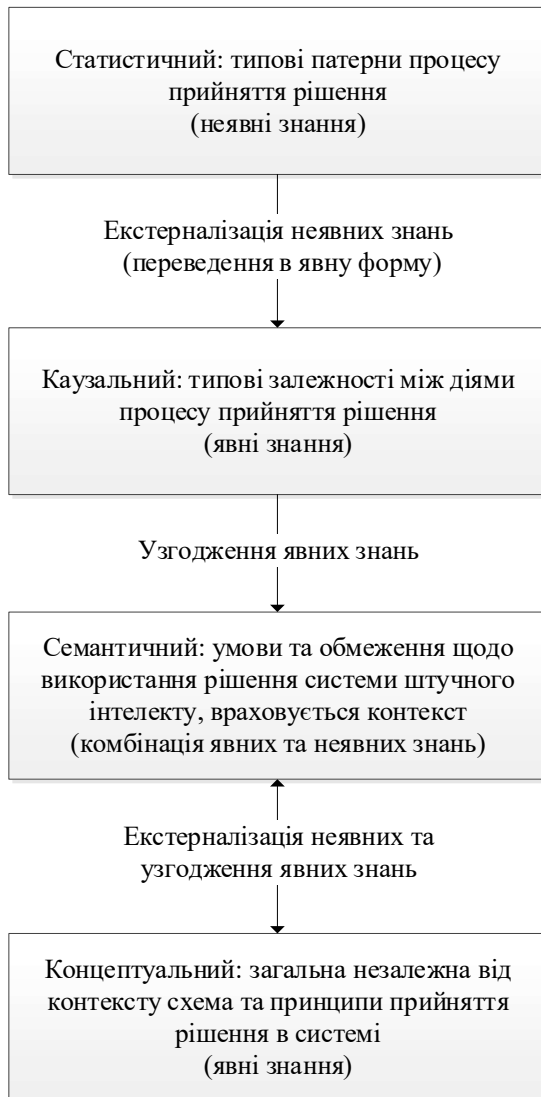


Рис. 1. Структура ментальної моделі користувача у аспекті явних та неявних знань

Згідно з розглянутим представленням ментальної моделі користувача в аспекті явних та неявних знань, екстерналізація неявних знань відбувається при переході від статистичного до каузального шару ментальної моделі, а також при переході від семантичного до концептуального шару.

Тобто формально екстерналізація представлена функціями $F_{BC} : B \rightarrow C$ та $F_{SP} : S \rightarrow P$. Перша з них визначає спосіб відображення патернів b_i , що відображають неявні знання про процес прийняття рішення у семантичному шарі, на підмножину явних каузальних залежностей C_i . Слід зазначити, що типові патерни відображають темпоральні залежності між діями процесу прийняття рішення або між вхідними даними та результатом. Тобто неявні знання мають темпоральні характеристики, що обумовлює можливість формування явних каузальних залежностей на відповідному шарі. Тому екстерналізація знань відбувається шляхом виявлення темпоральних залежностей, які мають причинно-наслідковий характер. Друга функція

визначає спосіб s_k використання отриманого в інтелектуальній системі результату при обмеженнях p_l у концептуальному шарі. Тобто екстерналізація знань у даному випадку здійснюється на основі встановлення обмежень застосування за принципом «що не заборонено, те може бути використано». Такий підхід враховує неповноту інформації щодо можливих варіантів використання рішення системи штучного інтелекту.

Підхід до екстерналізації знань для статистичного та семантичного шарів ментальної моделі. Підхід базується на таких запропонованих принципах: можливісний; обмежуючий. Перший принцип полягає у визначенні та оцінці можливості перетворення неявної каузальної залежності у складі патерну на явну причинно-наслідкову залежність. Використання можливісного принципу направлено на абстрагування від контексту застосування патернів, оскільки можливість розраховується у порівнянні з альтернативними варіантами каузальних залежностей на тих же наборах вхідних або проміжних даних. Зокрема, для рекомендаційної системи причинно-наслідковий зв'язок може бути визначений на основі значення можливості впливу певних характеристик товару на отриману рекомендацію (наприклад для рекомендованого кондиціонера – вплив потужності, торгової марки, управління по wi-fi тощо на вибір запропонованої моделі). Для системи розпізнавання відео – через значення можливості впливу певних елементів зображення на кінцевий результат розпізнавання.

Обмежуючий принцип полягає у екстерналізації неявних способів використання рішення системи штучного інтелекту через сукупність обмежень на можливості такого застосування. Ці обмеження мають відповідати концепції використання системи штучного інтелекту у вибраній предметній області. Зокрема, для мовних моделей, що генерують відповіді користувачам систем хостингу, такі обмеження можуть бути пов'язані із можливістю використання певних специфічних термінів, сленгових слів, а також повнотою інформації щодо технічних характеристик системи хостингу.

У відповідності до представлених принципів, розроблений підхід містить фази екстерналізації знань у статистичному та семантичному шарах моделі.

Фаза 1. Екстерналізація статистичних знань.

Вхідними даними є вхідні та проміжні дані системи штучного інтелекту.

Етап 1. Структуризація вхідних даних.

На даному етапі формується набір атрибутів вхідних даних. Для кожного атрибуту формується кінцева множина значень даних.

Етап 2. Розрахунок можливостей впливу кожного значення атрибутів на кінцевих результат (або наступну дію процесу прийняття рішення). Розрахунок виконується згідно теорії можливостей.

Етап 3. Відбір підмножини можливих значень причин.

На даному етапі відбирається підмножина значень атрибутів із значеннями можливості, що перевищують

порогове. Додатково може бути враховано показник необхідності.

Фаза 2. Екстерналізація семантичних знань.

Вхідними на даній фазі є інформація про призначення інтелектуальної системи. Така інформація може бути сформована на основі аналізу відповідної документації з використанням мовних моделей. Також в якості вхідних даних виступають загальні характеристики отриманого в інтелектуальній системі рішення. Наприклад, у рекомендаційній системі такі характеристики надаються в описі рекомендованого товару, а також у неявній формі, у відгуках користувачів на куплений товар.

Етап 1. Формування множини концептуальних обмежень з використанням мовної моделі, адаптованої під відповідну предметну область.

Етап 2. Формування переліку застосувань на основі аналізу описів використання рішення у різних контекстах.

Етап 3. Оцінка відповідності обмеженням на основі обчислення необхідності використання рішення.

Оцінка необхідності виконується шляхом порівняння рішення з альтернативами, що не задовольняють обмеженням.

Розглянемо приклад практичного застосування даного підходу для рекомендаційної системи.

Рекомендується певний товар, наприклад кондиціонер. Ключові характеристики товару: потужність охолодження; торгова марка; строк гарантії; преміальні властивості (можливість підігріву повітря, доступ через інтернет і т. п.). Проміжні етапи роботи рекомендаційної системи не є доступними для користувача. Відповідно, патерн вибору є невідомим. У такому випадку встановлюється причинно-наслідковий зв'язок між значенням властивостей товару та рекомендацією. Тобто необхідно знайти відповідь на запитання «З-за яких властивостей товару система рекомендувала його кінцевому користувачеві?». Для відповіді на це питання розраховуються значення можливостей для характеристик кондиціонера. Тобто окремо розраховуються відсотки кондиціонерів даної потужності, даної торгової марки, з преміальними функціями, які були продані в поточному сезоні. Можливості впливу цих значень визначаються згідно теорії можливостей. Відбираються властивості з максимальною можливістю. Наприклад, відповідь на наведене питання може мати вигляд: «кондиціонер було рекомендовано тому, що він має преміальну функцію підігріву повітря». Тобто отримано явні знання, які складають каузальний шар ментальної моделі.

На фазі 2 визначаються обмеження практичного застосування рекомендованого кондиціонера. Зокрема, аналіз відгуків з використанням мовної моделі може показати, що кондиціонер погано підігріває повітря при температурах нижче -15 градусів. Згідно концептуального шару, кондиціонер, на відміну від теплового насоса, орієнтований в першу чергу на охолодження. Не передбачено ефективний нагрів при дуже низькій температурі (наприклад, нижче -7 градусів) навколишнього середовища. Тобто встановлюється значення необхідності для даного товару з урахуванням

можливостей використання альтернативних моделей кондиціонерів для підігріву при низьких температурах зовнішнього середовища. Необхідність визначається згідно теорії можливостей. За результатом встановлюється обмеження на ефективний (з високим ККД) підігрів повітря.

Висновки. Запропоновано ментальну модель користувача системи штучного інтелекту, що враховує як явні, так і неявні знання користувача.

Модель складається з статистичного, семантичного, каузального та концептуального шарів. Концептуальний шар містить знання щодо схеми, принципів та концепції використання системи штучного інтелекту. Семантичний шар включає знання щодо умов та обмежень використання результатів, отриманих у системі штучного інтелекту. Статистичний шар відображає патерни формування рішень інтелектуальної системи. Каузальний шар містить ключові залежності між вхідними даними та рішеннями, а також між етапами процесу формування рішень у системі штучного інтелекту. Запропонована модель враховує зв'язки між явними та неявними знаннями користувача щодо системи штучного інтелекту, процесу прийняття рішень, способу використання рішень та загальної концепції інтелектуальної системи. Це дозволяє екстерналізувати неявні знання користувача та використати екстерналізовані знання при формуванні пояснень щодо процесу прийняття рішень.

Запропоновано підхід до екстерналізації знань у рамках ментальної моделі користувача системи штучного інтелекту. Підхід містить фази екстерналізації знань із статистичного шару моделі, що відображають типові патерни процесів прийняття рішень у системі, а також екстерналізації знань семантичного шару, що відображають способи використання цього рішення. У практичному плані підхід дає можливість перевести в явну форму умови та обмеження щодо формування та використання рішень у системі штучного інтелекту.

Список використаної літератури

1. Devedzic V., Radovic D., Jerinic L. A Framework for Building Intelligent Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews)*, 1999. Vol. 29. P. 422–439. DOI: 10.1109/5326.777077.
2. Norman D. A. Some observations on mental models. *Human-Computer Interaction: A Multidisciplinary Approach*, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987. P. 241–244.
3. Чалий С. Ф., Лещинська І. О. Концептуальна ментальна модель пояснення в системі штучного інтелекту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 1 (9). С. 70–75.
4. Polanyi M. *The Tacit Dimension*. New York, NY: Doubleday, 1966. 108 p.
5. Nonaka I., Takeuchi H. *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press, 1995. 304 p.
6. Gunning D., Vorm E., Wang J., Turek M. DARPA'S Explainable artificial intelligence (XAI) Program: a Retrospective. *Applied AI Letters* 2021. Vol. 2, no. 4. P. 1–11. <https://doi.org/10.1002/ail2.61>
7. Miller T. Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences. *Artificial Intelligence*. 2019. Vol. 267. P. 1–38.
8. Keith J. H., Robert G. M. *The Oxford Handbook of Thinking and Reasoning* Get access Arrow. Oxford University Press, 2012. 864 p.
9. Carey S. *The origin of concepts*. New York, NY: Oxford University Press, 2009. 608 p.

10. Chala O. Development of information technology for the automated construction and expansion of the temporal knowledge base in the tasks of supporting management decisions. *Technology audit and production reserves*. 2019. № 1/2(45). P. 9–14. DOI: 10.15587/2312–8372.2019.160205.
11. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process. *Advanced Information Systems*, 2022. № 6 (3). P. 60–65. <https://doi.org/10.20998/2522–9052.2022.3.09>
12. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020. № 4 (3), P. 113–117.
13. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural–model approach. Part II: Explanations. *CoRR*. cs.AI/0208034. 10.1093/bjps/axi148.
4. Polanyi M. *The Tacit Dimension*. New York, NY: Doubleday, 1966. 108 p.
5. Nonaka I., Takeuchi H. *The Knowledge–Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. Oxford University Press, 1995. 304 p.
6. Gunning D., Vorm E., Wang J., Turek M. DARPA'S Explainable artificial intelligence (XAI) Program: a Retrospective, *Applied AI Letters*, 2021, vol. 2, no. 4, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1002/ail2.61>
7. Miller T. Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences, *Artificial. Intelligence*. 2019, vol. 267, pp. 1–38.
8. Keith J. H., Robert G. M. *The Oxford Handbook of Thinking and Reasoning Get access Arrow*. Oxford University Press, 2012. 864 p.
9. Carey S. *The origin of concepts*. New York, NY: Oxford University Press, 2009. 608 p.
10. Chala O. Development of information technology for the automated construction and expansion of the temporal knowledge base in the tasks of supporting management decisions. *Technology audit and production reserves*. 2019, no. 1/2(45), pp. 9–14. DOI: 10.15587/2312–8372.2019.160205.
11. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process. *Advanced Information Systems*. 2022, no. 6(3), pp. 60–65. <https://doi.org/10.20998/2522–9052.2022.3.09>
12. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 4 (3), pp. 113–117.
13. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural–model approach. Part II: Explanations. *CoRR*. cs.AI/0208034. 10.1093/bjps/axi148.

References (transliterated)

1. Devedzic V., Radovic D., Jerinic L. A Framework for Building Intelligent Manufacturing Systems. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Part C (Applications and Reviews)*, 1999, vol. 29, pp. 422–439. DOI: 10.1109/5326.777077.
2. Norman, D. A. Some observations on mental models. *Human-Computer Interaction: A Multidisciplinary Approach*, San Francisco, CA, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1987, pp. 241–244.
3. Chalyi S. F., Leshchynska I. O. Kontseptualna mentalna model poiasnennia v systemi shtuchnoho intelektu. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Seriya: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Series: System analysis, management and information technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1 (9), pp. 70–75.
11. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process. *Advanced Information Systems*. 2022, no. 6(3), pp. 60–65. <https://doi.org/10.20998/2522–9052.2022.3.09>
12. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 4 (3), pp. 113–117.
13. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural–model approach. Part II: Explanations. *CoRR*. cs.AI/0208034. 10.1093/bjps/axi148.

Надійшла (received) 10.05.2024

UDC 004.891.3

S. F. CHALYI, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control System, Kharkiv; e mail: serhii.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>

I. O. LESHCHYNSKA, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering доцент кафедри програмної інженерії, Kharkiv; e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>

EXTERNALIZATION OF TACIT KNOWLEDGE IN THE MENTAL MODEL OF A USER OF AN ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM

The subject of the study is the processes of forming the user's mental model in artificial intelligence systems. The construction of such a model is associated with solving the problem of opacity and incomprehensibility of the decision-making process in such systems for end users. To solve this problem, the system user needs to receive an explanation of the obtained decision. The explanation should take into account the user's perception of the decision and the decision-making process, which is formalized within the user's mental model. The mental model considers the user's use of explicit and implicit knowledge, the latter of which usually lacks formal representation. The externalization of such knowledge ensures its transformation into a formal form. The aim of the work is to develop an approach to the externalization of implicit knowledge based on identifying patterns and causal dependencies for the decision-making process in an intelligent system when constructing the user's mental model. To achieve this goal, the following tasks are solved: developing a user's mental model of an artificial intelligence system that takes into account both explicit and implicit knowledge and developing an approach to the externalization of implicit knowledge of the user of the artificial intelligence system. A user's mental model of an artificial intelligence system that accounts for both explicit and implicit knowledge of the user is proposed. The model considers the connections between the user's explicit and implicit knowledge regarding the artificial intelligence system, the decision-making process, the method of using the decisions, and the general concept of the intelligent system. This creates conditions for the externalization of the user's implicit knowledge and the subsequent use of this knowledge in forming explanations regarding the decision-making process in the artificial intelligence system. An approach to the externalization of knowledge from the statistical and semantic layers of the user's mental model is proposed. In practical terms, the approach makes it possible to translate into explicit form the conditions and constraints regarding the formation and use of decisions in the artificial intelligence system.

Keywords: mental model, explanation, artificial intelligence system, explainable artificial intelligence, mental model, causal dependencies, cause-and-effect relationships.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Чалий Сергій Федорович, Chalyi Serhii Fedorovych

Автор 2 / Author 2: Лещинська Ірина Олександрівна, Leshchynska Irina Oleksandrivna

С. Ф. ЧАЛИЙ, доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; e mail: serhii.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>

В. О. ЛЕЩИНСЬКИЙ, кандидат технічних наук (PhD), доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії; м. Харків, Україна; ; volodymyr.leshchynskiy@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>

ПОБУДОВА МОЖЛИВИСНИХ ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ КЛАСАМИ ЕКВІВАЛЕНТНОСТІ ДАНИХ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

Предметом дослідження є процеси формування пояснень щодо прийняття рішень в системі штучного інтелекту. Пояснення в таких системах дають можливість зробити прозорим та зрозумілим процес формування рішень для користувача і, як наслідок, підвищити довіру користувача до отриманих результатів. Мета роботи полягає у розробці підходу до побудови ймовірнісної каузальної моделі пояснення з урахуванням класів еквівалентності вхідних, проміжних і результуючих даних. Вирішення цієї задачі створює умови для побудови пояснень у формі причинно-наслідкових залежностей на основі доступної інформації про властивості вхідних даних, а також про властивості отриманих у системі штучного інтелекту результатів. Для досягнення мети вирішуються такі задачі: розробка моделі каузальної залежності між класами еквівалентності вхідних та вихідних даних; розробка методів побудови класів еквівалентності даних процесу прийняття рішень та методу побудови причинно-наслідкового представлення пояснення. Запропоновано ймовірнісну модель каузальної залежності, що містить причинно-наслідковий зв'язок між класами еквівалентності вхідних або проміжних та результуючих даних, отриманих у процесі прийняття рішень в системі штучного інтелекту. Цей зв'язок враховує оцінки можливості і необхідності такої залежності. Модель створює умови для пояснення можливих причин отриманого рішення. Запропоновано комплекс методів побудови класів еквівалентності даних процесу прийняття рішень та побудови причинно-наслідкового представлення пояснення, що встановлює каузальний зв'язок між класами еквівалентності. При побудові класів еквівалентності встановлюються відношення обов'язкового і необов'язкового уточнення даних, вимоги або виключення даних, а також кон'юнкції даних. При побудові причинно-наслідкового представлення пояснення розраховується можливість та обмеження необхідності такої залежності, що дає можливість побудувати пояснення на основі доступної інформації про отримані рішення та вхідні і проміжні дані, які були використані для формування цих рішень.

Ключові слова: каузальна залежність, причинно-наслідкова залежність, темпоральна залежність, можливість, необхідність, пояснення, система штучного інтелекту, інтелектуальна система, зрозумілий штучний інтелект, інформаційна система.

Вступ. Ефективне використання сучасних інтелектуальних інформаційних систем базується на застосуванні методів машинного навчання. Останні імплементують алгоритми прийняття рішень, що використовують виявлені в наборах даних залежності [1]. Однак складні навчені моделі, як правило, є непрозорими і, як наслідок, незрозумілими для користувачів систем штучного інтелекту, що приводить до зниження довіри до отриманих рішень. Така невідповідність може привести до відмови користувачів від використання рішень, наданих системою штучного інтелекту, або ж до менш ефективного застосування цих рішень [2, 3]. Для вирішення даної проблеми користувачам надаються пояснення, що представляють причини прийнятих рішень, а також окремих дій, здійснених у процесі прийняття цих рішень. Тобто пояснення відображають причинно-наслідкові між діями процесу прийняття рішень в системі штучного інтелекту. Тому використання пояснень забезпечує можливість успішного застосування отриманих у інтелектуальній інформаційній системі результатів при вирішенні практичних задач користувачів [4, 5]. Для побудови пояснень формується спрощена модель процесу прийняття рішення, яка відображає ключові, узагальнені залежності між даними, діями процесу і отриманим результатом. При побудові такої моделі залежності узагальнюються на заданому рівні деталізації, що потребує визначення схожих вхідних і проміжних даних та подальшого їх об'єднання в рамках

класів еквівалентності. Клас еквівалентності даних містить схожі елементи, що мають однакові властивості. Ці дані можуть бути взаємозамінними у визначеному контексті. Тому використання класів еквівалентності дає можливість компактно описати групу даних зі схожими властивостями та узагальнити пов'язані із ними причинно-наслідкові залежності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Сучасні дослідження з розробки пояснень в системах штучного інтелекту були представлені в програмі зрозумілого штучного інтелекту (XAI) від агентства DARPA [6, 7]. Існуючі підходи до побудови пояснень пов'язані із визначенням важливості особливостей вхідних даних [8], розподілом внеску властивостей системи штучного інтелекту у кінцеве рішення [9], побудовою спрощеної локальної моделі прийняття рішення на основі виявлення впливу відхилень у вхідних даних на кінцевий результат [10]. Однак існуючі підходи мають ряд недоліків, пов'язаних із локалізацією пояснення, акцентуванням на пояснення в першу чергу результату відносно вхідних даних [8], а не процесу його формування, а також обчислювальною складністю побудови пояснення [9]. Для подолання цих недоліків доцільно розробити підхід, який би єдиним способом, на основі каузальних зв'язків [11, 12] описував би залежності між вхідними даними і результатом, а також між діями процесу прийняття рішення. Таким чином, актуальною є задача побудови причинно-наслідкових залежностей між класами

© С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом *НТУ «ХПІ»* у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Конфлікт інтересів: Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



еквівалентності даних інтелектуальної системи, оскільки її вирішення дає можливість побудувати пояснення щодо причин дій процесу прийняття рішення.

Мета та задачі дослідження. Мета роботи полягає у розробці підходу до побудови можливої каузальної моделі пояснення з урахуванням класів еквівалентності вхідних, проміжних і результуючих даних. Вирішення даної задачі створює умови для побудови пояснень у формі причинно-наслідкових залежностей на основі доступної інформації про властивості вхідних даних, а також про властивості отриманих в системі штучного інтелекту результатів.

Для досягнення мети вирішуються такі задачі: розробка моделі каузальної залежності між класами еквівалентності вхідних та вихідних даних; розробка методів побудови класів еквівалентності даних процесу прийняття рішення та побудови причинно-наслідкового представлення пояснення.

Модель каузальної залежності між класами еквівалентності даних

Клас еквівалентності представляє собою підмножину елементів, які є взаємозамінними (або однаковими) згідно відношенню еквівалентності. Використання класів еквівалентності дає можливість ефективно об'єднати схожі дані, що представляють певний об'єкт, представляючи кожен елемент даних як представника відповідного класу, що відображає цей об'єкт. Це дає можливість групувати та структурувати інформацію. В результаті при побудові каузальних залежностей для формування пояснень можна розглядати лише представників кожного класу еквівалентності замість перебору всіх можливих комбінацій значень вхідних даних.

При побудові класів еквівалентності для формування пояснень доцільно враховувати структуру вхідних даних та отриманих в системі штучного інтелекту рішень. Узагальнена структура вхідних даних представлена на рис. 1.

Дана вимога обумовлюється такими рівнями знань користувача щодо процесу прийняття рішень та безпосередньо рішення системи штучного інтелекту: знання про особливості використання рішення системи; знання про загальні принципи роботи інтелектуальної системи.

Перша група охоплює знання щодо умов та обмежень використання рішення системи. Обмеження задають допустиму сферу використання рішення, а умови визначають найбільш ефективні способи використання.

Друга група охоплює базові знання про процес прийняття рішення:

- основні закономірності, які лежать в основі процесу прийняття рішення; ці закономірності задають обмеження на допустимі пояснення;
- основні кроки процесу прийняття рішення; ці кроки визначають ключові причинно-наслідкові залежності, які обумовлюють властивості рішення.

На рис.1 показано, що класи еквівалентності для вхідних та вихідних об'єктів визначаються як з урахуванням значень змінних, так і з урахуванням

відношень між властивостями об'єкта, представленого відповідними змінними, та безпосередньо об'єктом.

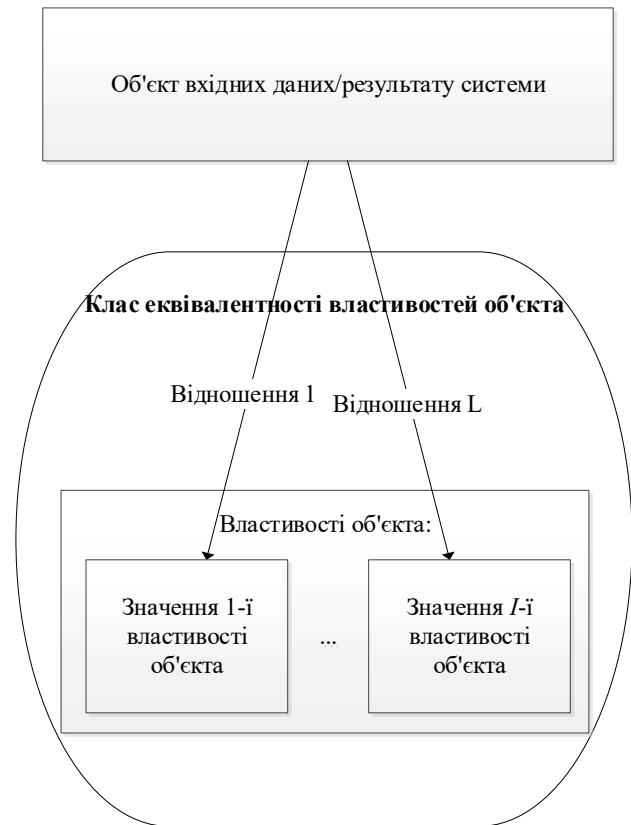


Рис. 1. Узагальнена структура вхідних та вихідних даних процесу прийняття рішення в системі штучного інтелекту

Тобто при визначенні еквівалентних властивостей об'єкта їх можна об'єднати з урахуванням їх відношення до об'єкта в цілому. Наприклад, для об'єкта «процесор», властивості якого використовуються в якості вхідних даних в рекомендаційній системі, можна визначити два відношення уточнення (рис. 2).

В цілому даний підхід дає можливість побудувати структуру класів еквівалентності, що відображає особливості як вхідних об'єктів, так і рішення системи штучного інтелекту, що дає можливість визначити причинно-наслідкові залежності на потрібному рівні деталізації та зробити прозорими для користувача цільові аспекти процесу прийняття рішення.

Тобто згідно запропонованого підходу класи еквівалентності враховують структуру об'єкта. Властивості об'єкта будуть еквівалентними у тому випадку, якщо вони мають однакове або мають схоже значення та однакове відношення до об'єкта в цілому. Відповідно, структура вхідного об'єкта може бути представлена в організаційному аспекті (зазвичай як ієрархія) і у процесному аспекті (зазвичай як виділена послідовність ознак).

Запропонований перелік відношень для структуризації вхідних даних та результату роботи інтелектуальної системи наведено в табл. 1 та 2.

Відношення першої групи дають можливість описати ієрархічну структуру вхідних, проміжних та

результуючих даних при побудові пояснення в системі штучного інтелекту. Такий підхід дає можливість узагальнити дані на рівні відповідного класу еквівалентності при формуванні пояснення і, тим самим, надати пояснення без непотрібної деталізації, у відповідності до рівня сприйняття користувача.

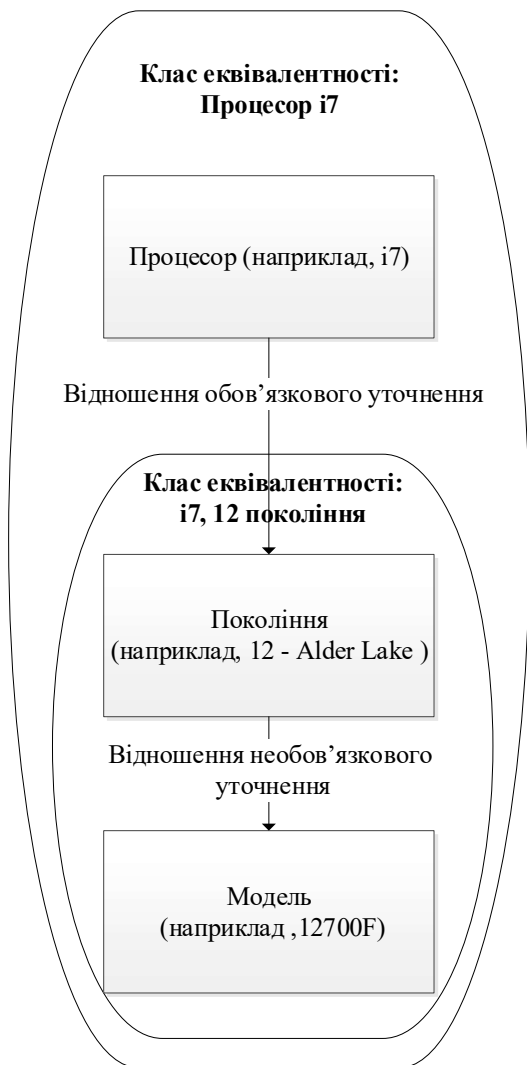


Рис. 2. Приклад відношень уточнення для класів еквівалентності

Відношення другої групи дають можливість відібрати (або виключити) конкретні значення властивостей при побудові каузальних правил для пояснення в системі штучного інтелекту. На відміну від першої групи, де виконується узагальнення причин рішення відповідно до вибраного ієрархічного рівня опису об'єктів, щодо яких приймається рішення в інтелектуальній системі, друга група відношень дає можливість визначити ключові ознаки – причини рішення, або ж виключити ознаки рішення, які не є суттєвими для його практичного використання.

Позначимо через l значення k – властивості об'єкта, що використовується у процесі прийняття рішення, а через r_j^i зв'язок між i – причиною та j – рішенням (проміжним або кінцевим).

Таблиця 1 – Ієрархічні відношення в класах еквівалентності для опису вхідних, проміжних і вихідних даних при побудові пояснень в системі штучного інтелекту

| Відношення | Опис |
|---|---|
| 1. Відношення необов'язкового уточнення | 1) Властивість є необов'язковою ознакою об'єкта. 2) Якщо значення властивості є причиною рішення, то і об'єкт в цілому є причиною рішення в інтелектуальній системі. 3) Якщо об'єкт у поточному стані є причиною рішення, то значення властивості може не бути такою причиною. 4) Приклад для рекомендаційної системи: якщо поточна модель процесора i7-12700F обумовлює рекомендацію моделі ноутбука користувачеві, то наявність процесора i7 є причиною рекомендації ноутбука. Проте зворотна залежність не є обов'язковою: якщо ноутбук вибрано тому, що він має процесор i7, то це не означає, що причиною є конкретна модель 12700F. |
| 2. Відношення обов'язкового уточнення | 1) Властивість є обов'язковою ознакою об'єкта. 2) Якщо поточне значення властивості є причиною рішення, то це однозначно свідчить, що об'єкт в цілому є причиною рішення в інтелектуальній системі. 3) Якщо об'єкт у поточному стані є причиною рішення, то значення властивості також є такою причиною. 4) Приклад для рекомендаційної системи: якщо розмір екрану в 14" є однією з причин рекомендації ноутбука, то і ноутбук з екраном в 14 дюймів є умовою рекомендації. Аналогічно, зворотне також буде вірним. |

Тоді клас еквівалентності $[f_i]$ на основі відношення необов'язкового уточнення формується таким чином:

$$[f_i] = \{f_i^{k,l} : \exists r_j^i\}. \tag{1}$$

Клас еквівалентності на основі відношення обов'язкового уточнення формується таким чином:

$$[f_i] = \{f_i^{k,l} : (\forall k \forall l) \exists r_j^i\}. \tag{2}$$

Тобто в першому випадку не всі елементи $f_i^{k,l}$ класу еквівалентності можуть бути використані в якості причини для проміжного або фінального рішення системи штучного інтелекту. В другому випадку всі значення властивостей можуть розглядатись як суттєві причини.

Слід зазначити, що в рамках можливого підходу відношення обов'язкового і необов'язкового уточнення можуть бути визначені за результатами обчислення можливості та необхідності значень властивостей для визначення причин отриманого рішення.

Тобто запропонований підхід дозволяє в офлайн-режимі сформувавши набір каузальних правил, що є елементами пояснення, та в подальшому використати ці правила в онлайн-режимі вже безпосередньо для побудови пояснень.

Таблиця 2 – Логічні відношення в класах еквівалентності для опису вхідних, проміжних і вихідних даних при побудові пояснень в системі штучного інтелекту

| Відношення | Опис |
|--------------------------|---|
| 1. Відношення вимоги | 1) Властивість є обов'язковою ознакою для побудови каузальної залежності у складі пояснення. 2) Зазвичай дане відношення вимагає деталізації опису об'єкта у вигляді конкретного значення властивості. 3) Приклад для рекомендаційної системи: вимога визначити конкретне значення розміру SSD - пам'яті. |
| 3. Відношення виключення | 1) Властивість не є необхідною при побудові пояснень. 2) Відношення дає можливість виключити несуттєві властивості з каузального правила, що визначає пояснення. 3) Приклад для рекомендаційної системи: наявність тач-скріну не є необхідною ознакою при рекомендації ноутбука. |
| 3. Відношення кон'юнкції | 1) Набір конкретних значень властивостей, які визначають причини рішення інтелектуальної системи. 2) Відношення дає можливість визначити набір причин рішення на різних рівнях деталізації даних.. |

Логічні відношення при побудові класу еквівалентності використовуються наступним чином. Клас еквівалентності на основі відношення вимоги має вигляд:

$$[f_i] = \{f_i^{k,l} : (\forall i) \exists r_j^i\}. \quad (3)$$

Клас еквівалентності на основі відношення виключення має вигляд:

$$[f_i] = \{f_i^{k,l} : (\forall i) \neg \exists r_j^i\}. \quad (4)$$

Тобто згідно (3) кожне із значень властивостей використовується при побудові пояснень.

В класі еквівалентності (4) значення властивостей не враховуються ні в одному з правил r_j^i .

Відношення кон'юнкції використовується для класу еквівалентності, елементи якого об'єднують декілька значень властивості як єдину умову для каузального правила у складі пояснення:

$$[f_i] = \left\{ \left\{ f_i^{k,l} \wedge \dots \wedge f_i^{K,L} \mid k = \overline{1, K}, l = \overline{1, L} (\forall i) \exists r_j^i \right\} \right\}. \quad (5)$$

Слід зазначити, що $f_i^{k,l}$ у виразі (5) можуть належати іншим класам еквівалентності, що створює умову для структурованого представлення вхідних, проміжних та результуючих даних на необхідному для побудови пояснення рівні деталізації/узагальнення.

Вирази (1) – (5) визначають класи еквівалентності при формуванні вхідних класів еквівалентності. Вихідні класи еквівалентності $[f_j]$, в тому числі фінальне рішення інтелектуальної системи можуть бути представлені на основі переважно відношення (5).

Тоді каузальні залежності, що входять до складу пояснення, можуть бути представлені через причинно-наслідкових зв'язок між класами еквівалентності у такому узагальненому вигляді:

$$[f_i] r_j^i [f_j]. \quad (6)$$

З урахуванням кон'юнкції елементів та класів еквівалентності (5), представлення (6) відображає причинно-наслідковий зв'язок між структурованим за рівнями ієрархії та за важливістю набором причин $[f_i]$ та аналогічно структурованим результатом $[f_j]$.

Можливісний причинно-наслідковий зв'язок визначається, згідно теорії можливостей, з урахуванням можливості Π_j^i та за умови необхідності N_j^i даного правила. Тому можливісний зв'язок між класами еквівалентності має вигляд:

$$[f_i] \Pi_j^i [f_j] | N_j^i. \quad (7)$$

Згідно (7), каузальна залежність між класами еквівалентності є можливою з оцінкою можливості Π_j^i за умови заданого рівня необхідності N_j^i .

Методи побудови можливісно-каузальних залежностей для пояснення на основі класів еквівалентності даних.

Запропонований підхід до побудови можливісної каузальної моделі пояснення з урахуванням класів еквівалентності вхідних, проміжних і результуючих даних імплементовано у вигляді методу побудови класів еквівалентності даних процесу прийняття рішення та методу формування причинно-наслідкового представлення пояснення.

Перший метод формує класи еквівалентності згідно умов, представлених виразами (1) – (5). Метод складається з наступних етапів,

Етап 1. Визначення відношень між даними згідно табл. 1.

Етап 2. Визначення класів еквівалентності для вхідних даних.

Етап 3. Визначення класів еквівалентності для вихідних даних.

Етап 4. Побудова множини темпоральних правил F- та X-типу для визначених класів еквівалентності.

Правила F-типу використовуються для відображення зв'язку між вхідними даними та результатом інтелектуальної системи, а правила X – лише для зв'язку у часі між проміжними даними процесу прийняття рішення.

Результатом методу є пари класів еквівалентності, упорядковані у часі у відповідності до процесу прийняття рішень у системі штучного інтелекту.

Метод формування можливісно-каузальних правил містить такі етапи.

Етап 1. Формування каузальних правил на базі темпоральних правил F-типу та X-типу.

Етап 2. Розрахунок можливості причинно-наслідкового зв'язку для правил.

Етап 3. Розрахунок необхідності каузальних правил.

Етап 4. Відбір правил за пороговим значенням необхідності.

Етап 5. Упорядкування правил за значенням можливості.

Результатом методу є можливісні каузальні правила, що відображають можливість зв'язків між класами еквівалентності вхідних, проміжних та результуючих даних.

Розглянемо приклад реалізації першого методу для побудови пояснень щодо рекомендації ноутбуків в системі електронної комерції.

Вхідні дані: ноутбуки на процесорах $i3-i9$ з кінцевими множинами значень об'єму оперативної пам'яті, жорсткого диску, розміру та роздільної здатності екрану, тощо. Кожна з моделей, крім наведених значень змінних, містить інформацію про конкретну модель процесора.

На етапі 1 формуються відношення між значеннями змінних. Зокрема, відношення обов'язкового уточнення виду $Процесор = \{i3, i5, i7, i9\}$, $i7 = \{i711, i712, i713\}$, відношення необов'язкового уточнення виду

$i711 = \{i7-1185, i7-1165, i7-1155, \dots\}$, відношення вимоги виду $Екран = \{13", 14", \dots\}$, тощо. Ці відношення

формується з урахуванням результату роботи системи: рекомендованої моделі комп'ютера. Така модель містить відповідні параметри процесора, розміру екрану, пам'яті, тощо. Обов'язкові вхідні дані (відношення включення) вибираються з урахуванням дій користувача при пошуку ноутбука, тобто з урахуванням фільтру, який поставив користувач. Наприклад, фільтру по розміру екрану. Отримані відношення визначають класи еквівалентності вхідних даних. Для вихідних даних класи еквівалентності формуються аналогічно, з урахуванням всіх параметрів рекомендованого ноутбука. На етапі 4 формуються темпоральні залежності виду:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Клас процесора} \\ i7 \end{array} \right)_F \left(\begin{array}{c} \text{Клас результату} \\ \text{модель ноутбука} \end{array} \right). \quad (8)$$

Ця залежність відображає послідовність дій в часі: спочатку вибір класу об'єктів, що відображають властивості ноутбука, а потім клас рекомендованого результату. В даному випадку маємо залежність F-типу, оскільки проміжні дані не розглядаються.

На другій фазі для кожного темпорального правила розраховується значення можливості і необхідності згідно теорії можливості.

Можливість, наприклад, розраховується через найбільшу ймовірність продажу ноутбука з процесором відповідного класу ($i7, i9$ тощо). Необхідність розраховується на основі ймовірності продажу моде-

лей з альтернативними процесорами. Вказані ймовірності розраховуються на основі даних про продажі системи електронної комерції.

Результатом другого методу є множина залежностей виду (клас еквівалентності для властивості процесора – рекомендована модель).

В подальшому наведені залежності можуть бути об'єднані згідно (5). Відповідно зміняться значення ймовірностей і другий метод необхідно буде виконати повторно.

Висновки. Запропоновано можливісну модель каузальної залежності, що містить причинно-наслідковий зв'язок між класами еквівалентності вхідних або проміжних та результуючих даних, отриманих у процесі прийняття рішення в системі штучного інтелекту. Даний причинно-наслідковий зв'язок базується на темпоральній залежності між даними та враховує оцінки можливості і необхідності такої залежності. Модель створює умови для пояснення можливих причин отриманого рішення на основі узагальнення як вхідних, так і проміжних даних процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі.

Запропоновано комплекс методів для побудови класів еквівалентності даних процесу прийняття рішення та побудови причинно-наслідкового представлення пояснення, що встановлює каузальний зв'язок між класами еквівалентності. У процесі побудови класів еквівалентності встановлюються відношення уточнення даних, вимоги або виключення даних, а також кон'юнкції даних. У процесі побудови причинно-наслідкового представлення пояснення розраховується можливість та необхідність такої залежності. В практичному плані розроблений комплекс методів дає можливість побудувати пояснення на основі доступної інформації про отримані рішення та вхідні й проміжні дані, які були використані для формування цих рішень.

Список використаної літератури

- Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
- Alonso J.M., Castiello C., Mencar C. A Bibliometric Analysis of the Explainable Artificial Intelligence Research Field. In: Medina, J., et al. *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Theory and Foundations. IPMU. Communications in Computer and Information Science*. 2018. Vol. 853. P. 3–15.
- Чалий С. Ф., Лещинська І. О. Концептуальна ментальна модель пояснення в системі штучного інтелекту. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2023. № 1 (9). С. 70–75.
- Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSUI'07). 2007. P. 801-810.
- Camburu O.M., Giunchiglia E., Foerster J., Lukaszewicz T., Blunsom P. Can I trust the explainer? Verifying post-hoc explanatory methods. 2019. *arXiv:1910.02065*.
- Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. Vol. 40(2). P. 44-58.
- D. Gunning, E. Vorm, J. Wang, M. Turek, "Darpa's Explainableai(XAI) Program: a Retrospective", *Applied AI Letters*. Vol. 2, no. 4, 2021. <https://doi.org/10.1002/ail2.61>
- Friedman J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *Annals of Statistics*. 2001. Vol. 29(5), P.1189-1232.

9. Lundberg S.M., Lee, S.I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. 2017. P. 4765-4774.
10. Ribeiro M.T., Singh S. Guestrin, C. Why Should I Trust You?: Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*. 2016. P. 1135-1144.
11. Chalyi, S., & Leshchynskiy, V. Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process. *Advanced Information Systems*. 2022 №6(3), P. 60–65.
12. Chalyi S, Leshchynskiy V. Probabilistic counterfactual causal model for a single input variable in explainability task. *Advanced Information Systems*. 2022. №7(3), P.54–59. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.08>
4. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIUT'07). 2007, pp. 801-810.
5. Camburu O.M, Giunchiglia E., Foerster J., Lukaszewicz T., Blunsom P. Can I trust the explainer? Verifying post-hoc explanatory methods. 2019. *arXiv:1910.02065*.
6. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019, vol. 40(2). pp. 44-58.
7. D. Gunning, E. Vorm, J. Wang, M. Turek, "Darpa's Explainableai(XAI) Program: a Retrospective", *Applied AI Letters*. 2021, vol. 2, no. 4, <https://doi.org/10.1002/ail2.61>
8. Friedman J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *Annals of Statistics*. 2001, vol. 29(5), pp.1189-1232.
9. Lundberg S.M., Lee, S.I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. 2017, pp. 4765-4774.
10. Ribeiro M.T., Singh S. Guestrin, C. Why Should I Trust You?: Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, 2016, pp. 1135-1144.
11. Chalyi, S., & Leshchynskiy, V. Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process. *Advanced Information Systems*. 2022 №6(3), P. 60–65.
12. Chalyi S, Leshchynskiy V. Probabilistic counterfactual causal model for a single input variable in explainability task. *Advanced Information Systems*. 2022, no. 7(3), pp.54–59. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.08>

References (transliterated)

1. Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
2. Alonso J.M., Castiello C., Mencar C. A Bibliometric Analysis of the Explainable Artificial Intelligence Research Field. In: Medina, J., et al. Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. Theory and Foundations. *IPMU. Communications in Computer and Information Science*. 2018, vol. 853. pp. 3–15.
3. Chalyi S. F., Leshchynska I. O. Kontseptualna mentalna model poiasnennia v systemi shtuchnoho intelektu. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KPI". Series: System Analysis, Control and Information Technology]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1 (9), pp. 70–75.
4. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIUT'07). 2007, pp. 801-810.
5. Camburu O.M, Giunchiglia E., Foerster J., Lukaszewicz T., Blunsom P. Can I trust the explainer? Verifying post-hoc explanatory methods. 2019. *arXiv:1910.02065*.
6. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019, vol. 40(2). pp. 44-58.
7. D. Gunning, E. Vorm, J. Wang, M. Turek, "Darpa's Explainableai(XAI) Program: a Retrospective", *Applied AI Letters*. 2021, vol. 2, no. 4, <https://doi.org/10.1002/ail2.61>
8. Friedman J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. *Annals of Statistics*. 2001, vol. 29(5), pp.1189-1232.
9. Lundberg S.M., Lee, S.I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017)*. 2017, pp. 4765-4774.
10. Ribeiro M.T., Singh S. Guestrin, C. Why Should I Trust You?: Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD)*, 2016, pp. 1135-1144.
11. Chalyi, S., & Leshchynskiy, V. Temporal-oriented model of causal relationship for constructing explanations for decision-making process. *Advanced Information Systems*. 2022 №6(3), P. 60–65.
12. Chalyi S, Leshchynskiy V. Probabilistic counterfactual causal model for a single input variable in explainability task. *Advanced Information Systems*. 2022, no. 7(3), pp.54–59. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.08>

Надійшла (received) 10.05.2024

UDC 004.8:004.9

S. F. CHALYI, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control System, Kharkiv; e mail: serhii.chalyi@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>

V. O. LESHCHYNSKYI, Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering, Kharkiv; e-mail: volodymyr.leshchynskiy@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>

CONSTRUCTION OF PROBABILISTIC CAUSAL RELATIONSHIPS BETWEEN EQUIVALENCE CLASSES OF DATA IN AN INTELLIGENT INFORMATION SYSTEM

The subject of this research is the processes involved in generating explanations for decision-making in artificial intelligence systems. Explanations in such systems enable the decision-making process to be transparent and comprehensible for the user, thereby increasing user trust in the obtained results. The aim of this work is to develop an approach for constructing a probabilistic causal explanation model that takes into account the equivalence classes of input, intermediate, and resulting data. Solving this problem creates conditions for building explanations in the form of causal relationships based on the available information about the properties of input data as well as the properties of the results obtained in the artificial intelligence system. To achieve this aim, the following tasks are addressed: developing a causal dependency model between the equivalence classes of input and output data; developing methods for constructing equivalence classes of data in the decision-making process and a method for constructing causal explanations. A probabilistic model of causal dependency is proposed, which includes a causal relationship between the equivalence classes of input or intermediate and resulting data obtained during the decision-making process in the artificial intelligence system. This relationship considers the estimates of the possibility and necessity of such a dependency. The model creates conditions for explaining the possible causes of the obtained decision. A set of methods for constructing equivalence classes of data in the decision-making process and for constructing causal explanations is proposed, establishing a causal relationship between the equivalence classes. When constructing equivalence classes, relations of mandatory and optional data refinement, requirements or exclusions of data, as well as data conjunctions, are established. When constructing causal explanations, the possibility and limitations of the necessity of such a dependency are calculated, allowing explanations to be built based on the available information about the obtained decisions and the input and intermediate data used to form these decisions.

Keywords: Causal dependency, cause-and-effect relationship, temporal dependency, possibility, necessity, explanation, artificial intelligence system, intelligent system, explainable artificial intelligence, information system.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Чалий Сергій Федорович, Chalyi Serhii Fedorovich

Автор 2 / Author 2: Лещинський Володимир Олександрович, Leshchynskiy Volodymyr Oleksandrovich

Г. Ю. ТЕРЕЩЕНКО, старший викладач кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки; м. Харків, Україна; e-mail: hlib.tereshchenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8731-2135>
Є. М. ПИСАРЕНКО, Харківський національний університет радіоелектроніки, бакалавр кафедри програмної інженерії; м. Харків, Україна, e-mail: yelyzaveta.pysarenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-6534-2558>

АНАЛІЗ ТИПІВ БЛОКЧЕЙНІВ ТА ЇХ ПРИДАТНОСТІ ДЛЯ СХОВИЩ ЗОБРАЖЕНЬ

Досліджено різні типи блокчейнів та їх можливе використання для створення сховища зображень. Метою дослідження було оцінити переваги та обмеження різних типів блокчейнів з точки зору зберігання зображень. Застосовано методи обробки даних для аналізу технічних характеристик різних типів блокчейнів та порівняльного аналізу параметрів ефективності та надійності. Отримано результати, які дозволили сформулювати принципи вибору типу блокчейну для створення сховища зображень та ідентифікувати переваги та обмеження кожного типу з точки зору зберігання зображень у залежності від пріоритетів програмного продукту. Висновок полягає в тому, що використання блокчейну забезпечує високий рівень безпеки та цілісності зображень, деякі типи блокчейнів проявляють високу швидкість та масштабованість. Проте, важливо розуміти, що процес збереження може залишатися централізованим, тому потрібно проводити додаткові дослідження для оптимального використання та розвитку цих технологій. Майбутні дослідження можуть включати аналіз можливостей забезпечення конфіденційності учасників та розвитку стандартів для обміну мультимедійним контентом через блокчейн. Важливо враховувати, що використання блокчейну може сприяти підвищенню прозорості та довіри у процесі зберігання та обміну мультимедійним контентом, що є важливим для розвитку цифрової економіки. Однак для досягнення повного потенціалу блокчейну у сфері мультимедіа, необхідно розробляти ефективні стратегії для вирішення проблем конфіденційності, масштабованості та централізації, що виникають при впровадженні цих технологій. Такий комплексний підхід дозволить забезпечити стабільну та ефективну інфраструктуру для управління мультимедійним контентом у цифровому середовищі.

Ключові слова: блокчейн, сховище, зображення, транзакції, водяні знаки, DRM, конфіденційність.

Вступ. У сучасному цифровому світі, де обсяги даних стрімко зростають, а конфіденційність та безпека є критичними аспектами, дослідження та розробка ефективних методів захисту цифрових активів набувають особливого значення. Одним з ключових аспектів цього процесу є збереження зображень, які мають велике значення в таких галузях, як медицина, наука, промисловість та мистецтво.

З огляду на постійний розвиток цифрової технології та зростаючі вимоги до захисту конфіденційності та цілісності даних, вивчення можливостей блокчейну для збереження зображень є актуальною і перспективною областю досліджень. Надійне збереження цифрових зображень, зокрема, вимагає не лише ефективного забезпечення конфіденційності та безпеки, але й гарантії невідхильності та незмінності відображення оригінальної інформації [12].

Актуальність проблеми полягає в тому, що зображення зазнають ризику порушення конфіденційності та несанкціонованого доступу через підключення до відкритих мереж та вразливості наявних систем зберігання. Тому розробка надійних інструментів для збереження та захисту зображень має велике практичне значення.

У останні роки блокчейн-технології набули широкого застосування в різних галузях, включаючи фінанси, логістику, медицину та мистецтво. Однак до цього часу дослідження, спрямовані на аналіз придатності різних типів блокчейнів для сховищ зображень, є обмеженими.

Існуючі методи розв'язання задачі: Сьогодні розповсюдження контенту стає все більш актуальною та складною задачею. Традиційні методи доставки мультимедійного контенту, які базувалися на фізичних

носіях, застарівають, а нові технології Інтернету вимагають нових підходів до розповсюдження контенту [9]. Однією з поточних проблем є забезпечення безпеки та цілісності мультимедійного контенту під час його розповсюдження через мережу Інтернет.

Для захисту авторських прав і цілісності збережених даних важливо мати систему, яка може ефективно відстежувати та підтверджувати походження контенту. Деякі існуючі методи захисту авторських прав, такі як шифрування, управління цифровими правами (DRM) та водяні знаки, вже застосовуються для цієї мети. Однак, існують проблеми, пов'язані з цими методами, такі як складність у реалізації, неодноразовість атак та залежність від централізованих структур [9].

Технологія блокчейн, відома своєю децентралізованістю та надійністю, може вирішити деякі з цих проблем. Блокчейн є розподіленим цифровим реєстром, який забезпечує незмінність та перевірку транзакцій. Він може бути використаний для створення системи, яка забезпечує надійність та невідкладність відстеження авторства мультимедійного контенту.

Ця стаття має на меті доповнити цілісний огляд застосування технології блокчейн для захисту авторських прав у сфері мультимедіа.

Аналіз. Останнім часом як промисловість, так і наукові кола, почали розглядати можливість збереження прав інтелектуальної власності з використанням технологій блокчейну. У статті представлений стислий огляд наявних систем захисту контенту на основі блокчейну із зазначенням їх основних атрибутів і деталей реалізації.

У дослідженні [1] запропоновано створення структури на основі блокчейна, що забезпечує

© Терещенко Г.Ю., Писаренко Є.М., 2024



Дослідницька стаття: Цю статтю опубліковано видавництвом **НТУ «ХПІ»** у збірнику «Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології». Ця стаття поширюється за міжнародною ліцензією [Creative Commons Attribution \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). **Конфлікт інтересів:** Автор/и заявив/или про відсутність конфлікту.



виконання авторських прав на мультимедійні об'єкти через смарт-контракти. Система використовує автономне централізоване рішення для зберігання даних, озеро даних, для реєстрації транзакцій всіх даних, що додані до блокчейну. Інформація у озері даних зашифрована та підписана цифровим підписом, що забезпечує конфіденційність та достовірність. Доступ до збережених даних можуть отримати лише авторизовані користувачі після перевірки їх цифрових підписів та прав доступу з погодженням більшості вузлів.

У роботі Пена та ін. [2] пропонується система управління цифровими авторськими правами на базі Ethereum, що дозволяє власникам контенту та клієнтам працювати безпосередньо, без централізованого посередника. У системі використовуються цифрові водяні знаки, криптосистема Ель-Гамалія, перцептивна хеш-функція, смарт-контракт та IPFS. Однак ця схема потребує великих витрат пам'яті та часу ЦП через використання шифрування Ель-Гамалія для шифрування всього мультимедійного контенту.

У дослідженні [3] пропонується схема DRM на основі блокчейна для захисту авторських прав на проєктні роботи. Система включає два методи: захист авторських прав і торгівлю. Метод захисту авторських прав реєструє права, запитує інформацію та перевіряє кореляцію, тоді як процес торгівлі включає захист дизайнерського контенту та підтвердження доставки для забезпечення справедливої торгівлі. Зареєстрований покупець може придбати зареєстровані роботи у постачальників контенту (продавців) за допомогою смарт-контрактів. Під час доставки контент шифрується відкритим ключем покупця, а потім доставляється через додаток. Перед отриманням контенту покупець повинен ввести свій секретний ключ у додаток, який розшифровує дані та надає доступ. Однак запропонована схема не гарантує безпеку секретного ключа користувача, який передається до додатка для підпису та розшифрування контенту.

У статті [4] пропонується мультимедійна блокчейн-платформа на основі водяних знаків, захищена від втручання, яка забезпечує безпеку та цілісність розповсюдженого зображення. Запропонована модель блокчейну базується на алгоритмі самовбудовування водяних знаків на основі стисненого зондування (CS), у якому унікальна інформація водяного знака складається з криптографічного хешу та хешу зображення. Криптографічний хеш складається з історії транзакцій для отримання метаданих мультимедійного вмісту з мультимедійного блокчейну, тоді як хеш зображення використовується для збереження оригінального мультимедійного вмісту, який можна отримати.

Криптографічний хеш можна використовувати для отримання інформації мультимедійного вмісту (наприклад, права власності або історії модифікацій), яка зберігається в мультимедійному блокчейні, а хеш зображення можна використовувати для ідентифікації підроблених областей. Зразки CS можуть бути використані для реконструкції оригінального зображення та визначення місцезнаходження пошкоджених областей. У блокчейні транзакція складається з інформації про транзакцію зображення, що містить ідентифікатор

транзакції та інформації зразків CS. Після схвалення транзакції вузлами перевірки зображення розповсюджується, а потім зберігається на сервері медіабази даних. Хоча зберігання інформації про перевірку зображення в блокчейні є вигідною стратегією, зображення все одно зберігається централізовано або зберігається власником, що впливає на доступність керування зображеннями.

У [5] технологія блокчейну використовується для безпечного зберігання водяних знаків та забезпечення автентифікації за часовою міткою для кількох водяних знаків. Запропонована система використовує перцептивну хеш-функцію для обчислення хеш-значення зображення, технологію блокчейну для запису метаданих, пов'язаних із інформацією про авторські права, QR-код для створення водяного знака, алгоритм цифрових водяних знаків для вбудовування інформації про авторські права, криптографічну хеш-функцію для обчислення хеш-значень як вихідних зображень, так і зображень з водяними знаками, а також мережу IPFS для зберігання, керування та поширення зображень з водяними знаками та пов'язаною інформацією про авторські права. Однак запропонована схема забезпечує перевірку концепції керування авторськими правами лише на цифрові зображення.

Бу та ін. [6] запропонував систему торгівлі даними на основі блокчейну та смарт-контрактів із функціями відстеження даних і виявлення незаконної поведінки. Він забезпечує два торгові сценарії із захистом конфіденційності від будь-якої неавторизованої сторони, включаючи торгівлю платформою. Ефективний метод відбитків пальців призначений для виявлення зміненого зображення, таким чином захищаючи авторські права на дані. Генератор відбитків даних призначений для створення відбитків пальців шляхом об'єднання кількох векторів ознак, отриманих із даних. Виявивши незаконно розповсюджену копію, генератор відбитків даних витягує ідентифікований вектор, який потім порівнюється з відбитками, записаними в усіх чинних контрактах. Згенерований відбиток пальця стійкий до незначних змін даних, таких як кадрування, додавання шуму та зміна яскравості. Однак система не задовольняє параметри конфіденційності та безпеки анонімного протоколу зняття відбитків пальців у децентралізованому середовищі.

У посиланні [7] автори пропонують систему розподілу контенту P2P, що базується на технології блокчейн. Запропонована система використовує стійку до змови дактилоскопію (для забезпечення стійкості до змови), гомоморфні та симетричні схеми шифрування (для захисту контенту та конфіденційності даних), перцептивну хеш-функцію (для автентифікації контенту), смарт-контракт на основі Ethereum (для виконання атомарних платежів та підтвердження доставки) та мережу IPFS (для зберігання мультимедійного контенту). Хоча запропонована система враховує властивості конфіденційності та безпеки анонімного протоколу зняття відбитків пальців у розподіленому середовищі, це лише доказ концепції, яка не була реалізована та оцінена у реальному світі.

У посиланні [8] Лі пропонує нову схему хаотичного шифрування зображень, засновану на блокчейні, пов'язану з відбитками пальців, яка забезпечує автентифікацію, відстежування та стійкість до атак безпеки (наприклад, атаки з використанням вибраного відкритого тексту або підробки). У цій схемі відбитки пальців розповсюджувачів контенту, вбудовані в зашифровані зображення, кодується стійкими до змови кодами Тардоса для запису декількох відбитків пальців з фіксованою довжиною даних та забезпечення можливості відстежування. Перед розповсюдженням контенту в вихідне зображення вбудовується підпис відправника та відбитки пальців всіх розповсюджувачів системи з використанням оборотної схеми водяних знаків та хаотичної карти. Потім це зображення з відбитками пальців шифрується з використанням структури Фрідріха, яка складається з заміни, перестановки та дифузії. Відбиток пальця, ключ приховування даних та ключ шифрування записуються в блокчейн. На стороні отримувача при розшифруванні отримується зображення відбитка пальця, що містить підпис відправника та всі відбитки пальців вищих розповсюджувачів (об'єднаний відбиток пальця), які можна видобути індивідуально, а потім порівняти з записаною інформацією в блокчейні для перевірки. Хоча система забезпечує стійкість до змови, цілісність даних та захист авторських прав, вона не задовольняє всім властивостям конфіденційності та безпеки анонімного протоколу зняття відбитків пальців у децентралізованому середовищі.

У табл. 1 представлено порівняння схем щодо типів блокчейну, типів транзакцій, автоматизації даних, криптовалюти, протоколів консенсусу та методів захисту вмісту. Таблиця 1 пронумерована відповідно до списку використаної літератури.

Одна з вибраних схем використовує приватний блокчейн, що передбачає контрольний рівень поверх блокчейну, яким керує довірений орган, який відповідає за дозвіл на виконання дій дозволеними системними об'єктами. Кілька інших схем використовують блокчейн консорціуму, як розподілену книгу для збереження контролю та конфіденційності, одночасно скорочуючи витрати та збільшуючи швидкість транзакцій.

Більшість схем використовують гібридні транзакції, які передбачають запис даних у ланцюжку в приватній або загальнодоступній службі блокчейну, наприклад як метадані вмісту, інформація про власників авторських прав або користувачів, водяний знак або відбиток пальця користувача (у зашифрованому вигляді), ліцензія DRM і зобов'язання щодо вмісту, серед іншого, а також механізми поза мережею, такі як створення та зберігання захищеного авторським правом вмісту, вилучення інформації про авторські права з вмісту або протоколу відстеження. Транзакції в ланцюжку виконуються для досягнення прозорості, безпеки, незмінності та можливості перевірки, і вважаються найкращими для переказів криптовалюти в повністю децентралізований спосіб. Механізми поза мережею дозволяють владі заощадити витрати на мережу, оскільки вони не мають комісії за транзакцію. Крім того, ці механізми досить швидкі, оскільки вони не пов'язані обмеженнями швидкості транзакцій, пов'язаними з транзакціями в ланцюжку.

Більшість схем гарантують захист вмісту за допомогою використання цифрових водяних знаків як окремого механізму або в поєднанні з DRM або шифруванням [9].

Можна помітити, що більшість систем забезпечують цілісність даних і захист від комунікаційних атак. З погляду захисту від несанкціонованого доступу ми можемо спостерігати, що багато систем гарантують захист від несанкціонованого доступу. Це цілком очікувано, оскільки ця властивість забезпечується технологією блокчейн. Можна помітити, що менше схем стосуються конфіденційності даних, відстеження, автентичності та умовного доступу. З точки зору захисту від атак, лише кілька схем стійкі до загальної обробки сигналів і атак змови/коаліції. З огляду на толерантність якості, ми помітили, що прозорість захищеного авторським правом вмісту (з водяними знаками/відбитками пальців) оцінюється значно меншою кількістю схем.

Дискусія. Зашифрований контент безпечний настільки, наскільки безпечним є ключ, використаний для його шифрування. Таким чином, криптографічними ключами необхідно ретельно керувати (наприклад,

Таблиця 1 – Порівняння схем захисту авторських прав на основі блокчейну з посиланням на таксономію [9]

| Номер | Типи контенту | Типи блокчейну | Типи транзакцій | Автоматизація даних | Криптовалюта | Методи захисту контенту |
|-------|--------------------------|----------------|-----------------|---------------------|--------------|-------------------------------|
| 1 | Зображення | Публічний | Гібридний | dApp | Ефіріум | Шифрування |
| 2 | Зображення | Публічний | Гібридний | dApp | Ефіріум | Шифрування і водяний знак |
| 3 | Зображення | Консорціум | Ончейн | dApp | Ефіріум | DRM |
| 4 | Зображення | Консорціум | Ончейн | Смарт-контракт | Ефіріум | Водяний знак |
| 5 | Зображення | Приватний | Гібридний | dApp | Не вказана | Водяний знак |
| 6 | Зображення | Гібридний | Гібридний | dApp | Не вказана | Відбитки пальців |
| 7 | Зображення, аудіо, відео | Публічний | Гібридний | Смарт-контракт | Ефіріум | Відбитки пальців |
| 8 | Зображення | Консорціум | Ончейн | Смарт-контракт | Не вказана | Шифрування і відбитки пальців |

передавати, зберігати або оновлювати), щоб гарантувати, що дані залишаються захищеними, але при необхідності доступними для декількох користувачів системи.

Методи шифрування не можуть запобігти несанкціонованому використанню та незаконному розповсюдженню контенту користувачем після розшифрування отриманого контенту.

Споживачі можуть шукати альтернативні варіанти отримання контенту, такі як програми для обміну файлами P2P. Проте, щоб забезпечити сумісність систем DRM, постачальникам контенту або виробникам мультимедійних програвачів, необхідно знати конфіденційну інформацію, пов'язану зі схемою захисту DRM, що збільшує ризик витоку. У такому разі один витік (або «злом») може поставити під загрозу не лише один із кількох каналів розповсюдження, а й розповсюдження всього сумісного контенту з DRM.

Системи DRM можуть викликати низку юридичних проблем, якщо їх неправильно використовувати, наприклад, використання інструментів моніторингу, навмисне і ненавмисне, для звітності та збору даних щодо звичок та переваг їх споживачів (наприклад, типу контенту, який вони використовують). Це може призвести до серйозних наслідків конфіденційності, наприклад, використання цих даних з метою їх продажу третім особам.

З боку фахівця з впровадження у схемі цифрових водяних знаків підтримання відповідного балансу між властивостями надійності, ємності та непомітності є складним завданням, оскільки ці властивості суперечать одна одній, тобто, якщо одне збільшується, інше зменшується.

Чим складніша схема нанесення водяних знаків, тим вищі витрати, пов'язані з процесами впровадження та виявлення. Витрати, пов'язані з використанням та виявленням водяних знаків, повинні бути мінімальними, щоб відповідати вимогам реального часу.

У схемах цифрового зняття відбитків пальців, заснованих на кодах, стійких до змови, існує компроміс [10] між розміром бази користувача N і стійкістю до змови, c_0 і довжиною кодового слова t . Зі збільшенням N або c_0 , довжина t збільшується і навпаки. Цей компроміс може зробити код, що відстежується, непрактичним, оскільки багатьом додаткам потрібна велика база користувачів і стійкість до змови. Однак ці вимоги призведуть до створення довгих кодів, що відстежуються.

Більшість досліджень, пов'язаних з протоколами анонімного зняття відбитків пальців, припускають наявність довіреної третьої сторони, яка відповідає за створення відбитків пальців та відстеження порушників авторських прав. Ця довіра передбачає впевненість користувача в тому, що довірений об'єкт поводитиметься очікуваним чином, щоб забезпечити безпеку та анонімність. У деяких інших схемах, у яких уникає використання такої сторони, обчислювальні та комунікаційні витрати досить високі через використання принаймні однієї з таких вимогливих технологій: гомоморфне шифрування, фіксація бітів або безпечні багатосторонні обчислення.

Блокчейн страждає від проблеми масштабованості через обмежений розмір блоку, наприклад, Біткойн може досягати 7 транзакцій в секунду через те, що протокол Біткойн обмежує розмір блоку до 1 МБ. Можливим вирішенням цієї проблеми є збільшення розміру блоку, але це створює навантаження на безпеку через те, що збільшення ймовірності появи втрачених блоків явно вплине на пропускну здатність та витрати на перевірку. Чим вище межа розміру блоку, тим більше транзакційне навантаження, перевантаження блокчейна та затримки транзакцій. Отже, зниження комісії за транзакцію призведе до зниження безпеки. Таким чином, компроміс між безпекою, масштабованістю та децентралізацією є проблемою при розробці блокчейну.

Блокчейни без дозволів встановлюють, що записані дані доступні, і таким чином забезпечують публічний доступ до них усім учасникам. Однак це може поставити під загрозу конфіденційність даних. Більше того, якщо конфіденційні дані були помилково завантажені в публічний блокчейн, виправити шкоду неможливо.

Коди смарт-контрактів схильні до помилок через людську помилку або неповну інформацію. Більш того, самовиконуваний характер смарт-контрактів має на увазі меншу гнучкість для реалізації фактичних намірів сторін.

Мова програмування для реалізації смарт-контрактів – це постійна сфера досліджень. У даний час найбільш використовуваною об'єктно-орієнтованою мовою високого рівня для реалізації складних смарт-контрактів у Ethereum є Solidity, яка все ще розвивається та має ряд обмежень, таких як відсутність бібліотек загального призначення, перевірка типів та підтримка багатопотоковості, між іншим. Інші популярні мови програмування (Python, C++, Java) також використовують для написання смарт-контрактів. Однак зробити програми читабельними у кожній формі залишається непростим завданням. У випадку з Біткойном мова сценаріїв для написання простого коду не є повною за Тьюрингом і не підтримує всі можливі структури програмування, зокрема цикли.

Блокчейн може постраждати від атак, коли деякі вузли можуть отримати більшість у мережі та зловживати ним, наприклад, вони можуть скасувати транзакції, щоб виконати подвійне витрачання та перешкоджати іншим майнерам підтвердити блоки.

Конфіденційність користувача може бути порушена всередині блокчейна, наприклад, можна відстежити реальну IP-адресу користувача, історію транзакцій можна пов'язати, щоб розкрити його справжню особистість або можливість зв'язку через його підключений набір вузлів.

Блокчейну не вистачає сумісності через відсутність універсальних стандартів. Існуючі мережі блокчейнів мають власні параметри, такі як моделі консенсусу, схеми транзакцій, криптовалюта і функціональність смарт-контрактів. Більше того, невизначеність та спекулятивний характер криптовалюти, як і раніше, перешкоджають її широкому поширенню.

Усі типи атак – внутрішні та зовнішні – мають бути прийняті до уваги, щоб оцінити безпеку та надійність нових чи наявних схем нанесення водяних знаків та зняття відбитків пальців.

Багато програм захисту авторських прав на основі блокчейна фокусуються виключно на перевагах технології, залишаючи осторонь деталі їх реалізації. Тому важливо розробити практичну структуру на основі блокчейну, яка повинна враховувати як технічні деталі, так і деталі впровадження, такі як оцінка переваг і недоліків систем із дозволами та без дозволів перед вибором одного з цих рішень, вибір відповідного механізму консенсусу залежить від вимог (наприклад, пропускна спроможність транзакцій, затримка, мінімальна комісія за транзакції, централізація/децентралізація та безпека) та оцінка ефективності за допомогою впровадження структури для розрахунку обчислювальної вартості та загального часу відповіді.

Визнані технологічні стандарти встановлюють специфікації та процедури, які є вигідними з точки зору забезпечення ефективності, надійності та підвищеної безпеки. Завдяки цій статті можна зробити висновок, що існує потреба в універсальному стандарті, якому могли б дотримуватися постачальники мультимедійного контенту, виробники та компанії, що беруть участь, щоб ділитися новими рішеннями щодо захисту авторських прав на основі блокчейну, а також інтегрувати їх з існуючими системами. Аналогічним чином, цей стандарт повинен дозволяти автоматичну конвертацію між різними криптовалютами для поліпшення досвіду користувача.

Майбутні дослідження повинні вивчити можливі рішення з урахуванням конфіденційності, які могли б захистити конфіденційність суб'єктів (власника контенту, покупця тощо), які беруть участь у транзакціях додатків для захисту контенту на основі блокчейну. Вимоги конфіденційності та безпеки повинні бути визначені на початковому етапі цих схем, оскільки дані (наприклад, інформація, що стосується власника контенту, відкриті ключі учасників, псевдоніми та інформація про авторські права, серед іншого) видно всі в мережі [11].

Усі можливі атаки на безпеку та конфіденційність (наприклад, підслухування, DDoS-атака або видача себе за іншу особу) на смарт-контракт мають аналізувати за допомогою формального аналізу безпеки. До того, транзакції смарт-контрактів мають бути технічно оборотними, щоб довести їхню довгострокову ефективність. Крім того, щоб змінити або скасувати смарт-контракт, у коді має бути передбачена подія, що ініціює модифікацію та її припинення/розширення. Таким чином, проблема боротьби з атаками на безпеку та конфіденційність смарт-контракту потребує подальшого вивчення [12].

Висновки. Після аналізу типів блокчейнів та їх придатності для сховищ зображень на основі наданої інформації, можна зробити наступні висновки та зазначити перспективи дослідження.

Розглянута широка гама технологій блокчейну, що використовуються для захисту мультимедійного контенту, свідчить про їхню різноманітність у

перевагах та обмеженнях. Вибір конкретного типу блокчейну може залежати від потреб та вимог конкретної системи. Використання блокчейну, особливо з водяними знаками та криптографічними хешами, забезпечує високий рівень безпеки та цілісності зображень. Механізми ідентифікації та відновлення контенту покращують відстежування та виявлення фальсифікацій. Деякі типи блокчейнів проявляють високу швидкість транзакцій та масштабованість, що робить їх привабливими для розгляду як рішення для сховищ зображень. Важливо розуміти, що, незважаючи на безпеку та недоступність для модифікації даних, процес збереження зображень може залишатися централізованим, що впливає на доступність та контроль над контентом.

Перспективи дослідження: Можливості дослідження включають оцінку ефективності та пропускної здатності різних схем блокчейну, розробку нових методів виявлення фальсифікацій та вдосконалення процесів збереження та обміну мультимедійним контентом через блокчейн.

Загалом, дослідження підтверджує потенціал блокчейну як ефективного інструменту для захисту та управління мультимедійним контентом. Однак потрібно проводити додаткові дослідження для розуміння оптимальних стратегій використання та розвитку цих технологій для сховищ зображень.

Список використаної літератури

1. Vishwa A., Hussain F. K. *A Blockchain based approach for multimedia privacy protection and provenance*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1109/ssci.2018.8628636> (access date: 16.02.2024).
2. Peng W. et al. *Secure and Traceable Copyright Management System Based on Blockchain*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1109/iccc47050.2019.9064101> (access date: 16.02.2024).
3. Lu Z. et al. *Blockchain for Digital Rights Management of Design Works*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1109/icsess47205.2019.9040744> (access date: 16.02.2024).
4. Bhowmik D., Feng T. *The multimedia blockchain: A distributed and tamper-proof media transaction framework*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1109/icdsp.2017.8096051> (access date: 16.02.2024).
5. Meng Z. et al. *Design Scheme of Copyright Management System Based on Digital Watermarking and Blockchain*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1109/compsac.2018.10258> (access date: 16.02.2024).
6. Wu Z. et al. *Privacy-Friendly Blockchain Based Data Trading and Tracking*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1109/bigcom.2019.00040> (access date: 16.02.2024).
7. Qureshi A., Megias D. *Blockchain-based P2P multimedia content distribution using collusion-resistant fingerprinting*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1109/apsipaasc47483.2019.9023054> (access date: 16.02.2024).
8. Li R. *Fingerprint-related chaotic image encryption scheme based on blockchain framework*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1007/s11042-020-08802-z> (access date: 16.02.2024).
9. Qureshi A., Megias Jiménez D. *Blockchain-Based Multimedia Content Protection: Review and Open Challenges*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.3390/app11010001> (access date: 16.02.2024).
10. Qureshi A., Megias D., Rifà-Pous H. *Framework for preserving security and privacy in peer-to-peer content distribution systems*. URL: <http://doi.org/doi.org/10.1016/j.eswa.2014.08.053> (access date: 07.03.2024).
11. Kyrychenko I., Tereshchenko G. *Using blockchain technology in international business relationships*. URL: <https://nure.ua/wp->

- content/uploads/workshop/konferentsiia-aktualni-problemy-ekonomichnoi-kibernetyky-ta-ekonomichnoi-bezpeky-.pdf (access date: 07.03.2024).
12. Tereshchenko G. Y., Kyrychenko I. V., Bilous N. V. *Copyright protection using Blockchain*. URL: [http://doi.org/10.30837/bi.2019.1\(92\).09](http://doi.org/10.30837/bi.2019.1(92).09) (access date: 16.02.2024).
- References (transliterated)**
1. Vishwa A., Hussain F. K. *A Blockchain based approach for multimedia privacy protection and provenance*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1109/ssci.2018.8628636> (accessed 16.02.2024).
 2. Peng W. et al. *Secure and Traceable Copyright Management System Based on Blockchain*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1109/iccc47050.2019.9064101> (accessed 16.02.2024).
 3. Lu Z. et al. *Blockchain for Digital Rights Management of Design Works*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1109/icsess47205.2019.9040744> (accessed 16.02.2024).
 4. Bhowmik D., Feng T. *The multimedia blockchain: A distributed and tamper-proof media transaction framework*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1109/icdsp.2017.8096051> (accessed 16.02.2024).
 5. Meng Z. et al. *Design Scheme of Copyright Management System Based on Digital Watermarking and Blockchain*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1109/compsac.2018.10258> (accessed 16.02.2024).
 6. Wu Z. et al. *Privacy-Friendly Blockchain Based Data Trading and Tracking*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1109/bigcom.2019.00040> (accessed 16.02.2024).
 7. Qureshi A., Megias D. *Blockchain-based P2P multimedia content distribution using collusion-resistant fingerprinting*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1109/apsipaasc47483.2019.9023054> (accessed 16.02.2024).
 8. Li R. *Fingerprint-related chaotic image encryption scheme based on blockchain framework*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1007/s11042-020-08802-z> (accessed 16.02.2024).
 9. Qureshi A., Megias Jiménez D. *Blockchain-Based Multimedia Content Protection: Review and Open Challenges*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.3390/app11010001> (accessed 16.02.2024).
 10. Qureshi A., Megias D., Rifà-Pous H. *Framework for preserving security and privacy in peer-to-peer content distribution systems*. Available at: <http://doi.org/doi.org/10.1016/j.eswa.2014.08.053> (accessed 07.03.2024).
 11. Kyrychenko I., Tereshchenko G. *Using blockchain technology in international business relationships*. Available at: <https://nure.ua/wp-content/uploads/workshop/konferentsiia-aktualni-problemy-ekonomichnoi-kibernetyky-ta-ekonomichnoi-bezpeky-.pdf> (accessed 07.03.2024).
 12. Tereshchenko G. Y., Kyrychenko I. V., Bilous N. V. *Copyright protection using Blockchain*. Available at: [http://doi.org/10.30837/bi.2019.1\(92\).09](http://doi.org/10.30837/bi.2019.1(92).09) (accessed 16.02.2024).

Надійшла (received) 17.05.2024

UDC 004.82

H. Y. TERESHCHENKO, Senior Lecturer of the Department of Software Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics; Kharkiv, Ukraine; e-mail: hlib.tereshchenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8731-2135>

E. M. PYSARENKO, Kharkiv National University of Radio Electronics, Bachelor of Software Engineering Department; Kharkiv, Ukraine; e-mail: yelyzaveta.pysarenko@nure.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-6534-2558>

ANALYSIS OF BLOCKCHAIN TYPES AND THEIR SUITABILITY FOR IMAGE STORAGE

There different types of blockchains and their possible use for creating an image repository are investigated. The purpose of the study was to evaluate the advantages and limitations of different types of blockchains in terms of image storage. Data processing methods were applied to analyze the technical characteristics of various types of blockchains and comparative analysis of efficiency and reliability parameters. The results were obtained, which made it possible to formulate the principles of choosing the type of blockchain for creating image storage and to identify the advantages and limitations of each type from the point of view of image storage, depending on the priorities of the software product. The conclusion is that the use of blockchain provides a high level of security and integrity of images, some types of blockchains exhibit high speed and scalability. However, it is important to understand that the preservation process may remain centralized, so more research is needed to optimally use and develop these technologies. Future research may include an analysis of the possibilities of ensuring the privacy of participants and the development of standards for the sharing of multimedia content via blockchain. It is important to consider that the use of blockchain can contribute to increasing transparency and trust in the process of storing and sharing multimedia content, which is important for the development of the digital economy. However, in order to achieve the full potential of blockchain in the field of multimedia, it is necessary to develop effective strategies to solve the problems of privacy, scalability and centralization that arise when implementing these technologies. Such a comprehensive approach will provide a stable and effective infrastructure for managing multimedia content in the digital environment.

Keywords: blockchain, storage, images, transactions, watermarks, DRM, privacy.

Повні імена авторів / Author's full names

Автор 1 / Author 1: Терещенко Гліб Юрійович / Tereshchenko Glib

Автор 2 / Author 2: Писаренко Єлизавета Михайлівна / Pysarenko Yelyzaveta

ЗМІСТ

| | |
|---|----|
| СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ | 3 |
| <i>Pavlov A. A., Holovchenko M. N., Drozd V. V.</i> An adaptive method for building a multivariate regression | 3 |
| <i>Сокол В. Є., Годлевський М. Д., Малець Д. К.</i> Оцінка якості процесу розробки програмного забезпечення ІТ-компанії на основі використання функції корисності | 9 |
| <i>Кузніченко С. Д., Іванов Д. А., Кузніченко Д. О.</i> Використання моделі і методів геопросторового багатокритеріального аналізу рішень для картування ризику деградації ґрунтів..... | 18 |

| | |
|--|-----|
| УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ..... | 26 |
| <i>Куценко О. С., Безменов М. І., Коваленко С. В.</i> Два підходи до формування кількісної міри стійкості на основі множинних оцінок параметрів ансамблю перехідних процесів | 26 |
| МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ..... | 34 |
| <i>Корп А. М., Орловський Д. Л., Кізілов О. С., Халатова О. С.</i> Research on error probability assessment in user personal data processing in GDPR-compliant business process models | 34 |
| <i>Корп А. М., Орловський Д. Л., Литвінова У. С.</i> Development and research of software solution for business process model correctness analysis using machine learning..... | 39 |
| <i>Іващенко Д., С., Куценко О. С.</i> Мультиагентна імітаційна модель поширення інфекційних захворювань..... | 47 |
| <i>Нікуліна О. М., Северин В. П., Кондратов О. М., Ольховий О. М.</i> Моделі дистанційної ідентифікації параметрів динамічних об'єктів з використанням трансформерів виявлення та оптичного потоку | 52 |
| ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ | 58 |
| <i>Ворошек О. Г., Соловей І. В.</i> Дослідження засобів штучного інтелекту для автоматизації процесу тестування програмного забезпечення..... | 58 |
| <i>Мельников О. Ю., Денисенко В. О.</i> Прогнозування зміни рівня лісистості за допомогою сервісу Global Forest Watch і мови програмування та аналізу даних R | 65 |
| <i>Шаров В. О., Нікуліна О. М.</i> Дворівнева концепція для моделювання єдиної заводостійкої передачі цифрових даних..... | 70 |
| <i>Ягуп К. В., Ягуп В. Г.</i> Застосування нейромережі для визначення типу елементів симетрично-компенсуючого пристрою несиметричної системи з нульовим проводом | 76 |
| <i>Veres M. D., Golian N. V.</i> Optimization of the development process of monolithic multi-module projects in Java..... | 80 |
| <i>Гольдінер Д. І.</i> Розробка архітектури програмного забезпечення для моделювання систем масового обслуговування під імплементацію мовою програмування Go | 85 |
| <i>Чалий С. Ф., Лециньська І. О.</i> Екстерналізація неявних знань в ментальній моделі користувача системи штучного інтелекту | 91 |
| <i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О.</i> Побудова можливісних причинно-наслідкових залежностей між класами еквівалентності даних в інтелектуальній інформаційній системі | 97 |
| <i>Терещенко Г. Ю., Писаренко Є. М.</i> Аналіз типів блокчейнів та їх придатності для сховищ зображень..... | 103 |

CONTENT

| | |
|---|-----|
| SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY..... | 3 |
| <i>Pavlov A. A., Holovchenko M. N., Drozd V. V.</i> An adaptive method for building a multivariate regression | 3 |
| <i>Sokol V. Ye., Godlevskiy M. D., Malets D. K.</i> Quality assessment of the software development process of an IT company based on the use of the utility function | 9 |
| <i>Kuznichenko S. D., Ivanov D. A., Kuznichenko D. O.</i> Using the geospatial multi-criteria decision analysis model and methods for soil degradation risk mapping | 18 |
| CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS | 26 |
| <i>Kutsenko O. S., Bezmenov M. I., Kovalenko S. V.</i> Two approaches to the formation of a quantitative measure of stability based on multiple estimates of the parameters of an ensemble of transient processes | 26 |
| MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING | 34 |
| <i>Korpp A. M., Orlovskiy D. L., Kizilov O. S., Halatova O. S.</i> Research on error probability assessment in user personal data processing in GDPR-compliant business process models | 34 |
| <i>Korpp A. M., Orlovskiy D. L., Litvinova U. S.</i> Development and research of software solution for business process model correctness analysis using machine learning..... | 39 |
| <i>Ivashchenko D. S., Kutsenko O. S.</i> Multi-agent simulation model of infectious disease spread | 47 |
| <i>Nikulina O. M., Severyn V. P., Kondratov O. M., Olhovoy O. M.</i> Models of remote identification of parameters of dynamic objects using detection transformers and optical flow..... | 52 |
| INFORMATION TECHNOLOGY | 58 |
| <i>Vorocheck O. H., Solovei I. V.</i> Research on artificial intelligence tools for automating the software testing process..... | 58 |
| <i>Melnykov O. Yu., Denysenko V. O.</i> Forecasting change in the level of forest coverage using the Global Forest Watch service and the programming and data analysis language R..... | 65 |
| <i>Sharov V. O., Nikulina O. M.</i> Two-level concept for simulating uniform interference-resistant digital data transmission..... | 70 |
| <i>Yagup K. V., Yagup V. G.</i> Application of a neuronetwork for determining the type of elements of a symmetrical compensation device of an unsymmetrical system with a zero wire | 76 |
| <i>Veres M. D., Golian N. V.</i> Optimization of the development process of monolithic multi-module projects in Java | 80 |
| <i>Goldiner D. I.</i> Software architecture system design for the mass service systems modeling to be implemented in Go programming language..... | 85 |
| <i>Chalyi S. F., Leshchynska I. O.</i> Externalization of tacit knowledge in the mental model of a user of an artificial intelligence system | 91 |
| <i>Chalyi S. F., Leshchynskiy V. O.</i> Construction of probabilistic causal relationships between equivalence classes of data in an intelligent information system..... | 97 |
| <i>Tereshchenko H. Y., Pysarenko E. M.</i> Analysis of blockchain types and their suitability for image storage..... | 103 |

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

Збірник наукових праць

№ 1 (11) 2024

Наукові редактори: М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
О. С. Куценко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна
Технічний редактор: М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».
Кафедра системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: Mykola.Bezmenov@khpі.edu.ua

Підп. до друку 08.07.2024 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Times New Roman. Умов. друк. арк. 12,8. Облік.-вид. арк. 10,0.
Тираж 100 пр. Зам. №5-1/07/24. Ціна договірна.

Виготовлювач: ФОП Панов А. М. Свідоцтво серії ДК № 4847 від 06.02.2015 р.
м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф. 6, тел. +38(057)714-06-74, +38(050)976-32-87
copy@vlavke.com