

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

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

Збірник наукових праць
№ 1 (7) 2022
Видання засноване у 1961 р.

**Вестник Национального технического университета
«ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и
информационные технологии**

Сборник научных работ
№ 1 (7) 2022
Издание основано в 1961 г.

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

Collection of Scientific papers
No. 1 (7) 2022
The edition was founded in 1961

Харків
НТУ «ХПІ», 2022

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии = 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», 2022. — № 1 (7) 2022. — 86 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.

Издание публикует новые научные результаты в области системного анализа и управления сложными системами, полученные на основе современных прикладных математических методов и прогрессивных информационных технологий. Публикуются работы, связанные с искусственным интеллектом, анализом больших данных, современными методами высокопродуктивных вычислений в системах поддержки принятия решений.

Для научных работников, преподавателей высшей школы, аспирантов, студентов и специалистов в области системного анализа, управления и компьютерных технологий.

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.

Свідоцтво Міністерства юстиції України
КВ № 23778-13618Р від 14 лютого 2019 р.

Мова статей – українська, російська, 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

Бентаб 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

Godlevskyi 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

Galuzha 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., NTUU "KPI", 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 № 5 від 01 липня 2022 р.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY

UDC 519.24

DOI: 10.20998/2079-0023.2022.01.01

A. A. PAVLOV, M. N. HOLOVCHENKO, V. V. DROZD

CONSTRUCTION OF A MULTIVARIATE POLYNOMIAL GIVEN BY A REDUNDANT DESCRIPTION IN STOCHASTIC AND DETERMINISTIC FORMULATIONS USING AN ACTIVE EXPERIMENT

We present the methods for constructing a multivariate polynomial given by a redundant representation based on the results of a limited active experiment. We solve the problem in two formulations. The first is the problem of constructing a multivariate polynomial regression given by a redundant representation based on the results of a limited active experiment. The solution method is based on the previous results of Professor A. A. Pavlov and his students showing the fundamental possibility of reducing this problem to the sequential construction of univariate polynomial regressions and solving the corresponding nondegenerate systems of linear equations. There are two modifications of this method. The second modification is based on proving for an arbitrary limited active experiment the possibility of using only one set of normalized orthogonal polynomials of Forsythe. The second formulation refers to the solution of this problem for a particular but sufficient from the practical point of view case when an unknown implementation of a random variable is not added to the initial measurement results during an active experiment. This method is a modification of the solution method for the multivariate polynomial regression problem. Also, we used the main results of the general theory (which reduces the multivariate polynomial regression problem solving to the sequential construction of univariate polynomial regressions and solution of corresponding nondegenerate systems of linear equations) to consider and strictly substantiate fairly wide from the practical point of view particular cases leading to estimating the coefficients at nonlinear terms of the multivariate polynomial regression as a solution of linear equations with a single variable.

Keywords: least squares method, multivariate polynomial regression, normalized orthogonal polynomials of Forsythe, redundant representation, linguistic variable, limited active experiment

O. A. ПАВЛОВ, М. М. ГОЛОВЧЕНКО, В. В. ДРОЗД

ПОБУДОВА БАГАТОВИМІРНОГО ПОЛІНОМА, ЗАДАНОГО НАДЛИШКОВИМ ОПИСОМ В СТОХАСТИЧНІЙ ТА ДЕТЕРМІНОВАНІЙ ПОСТАНОВКАХ, З ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Наведені методи побудови багатовимірного полінома, заданого надлишковим описом, за результатами обмеженого активного експерименту. Задача розв'язується в двох постановках. Перша – як задача побудови багатовимірної поліноміальної регресії, заданої надлишковим описом, за результатами обмеженого активного експерименту. Наведений метод розв'язання базується на попередніх результатах професора О. А. Павлова та його учнів, в яких показана принципова можливість зведення цієї задачі до послідовної побудови одновимірних поліноміальних регресій та розв'язання відповідних невідроджених систем лінійних рівнянь. Приводяться дві модифікації методу. Друга модифікація базується на доведенні для довільного обмеженого активного експерименту можливості використання лише одного набору нормованих ортогональних поліномів Форсайта. Друга постановка – це розв'язання цієї задачі для часткового, але достатнього з точки зору практики випадку, коли на вихідні результати вимірювання при проведенні активного експерименту не додається невідома реалізація випадкової величини. Викладений метод є модифікацією методу розв'язання задачі багатовимірної поліноміальної регресії. Також, використовуючи основні результати загальної теорії, що зводить розв'язання задачі багатовимірної поліноміальної регресії до послідовної побудови одновимірних поліноміальних регресій та розв'язання відповідних невідроджених систем лінійних рівнянь, розглянуті та строго обґрунтовані достатньо широкі з точки зору практики часткові випадки надлишкового опису, що приводять до знаходження коефіцієнтів при нелінійних членах багатовимірної поліноміальної регресії як розв'язку лінійних рівнянь з однією змінною.

Ключові слова: метод найменших квадратів, багатовимірний поліноміальний регресія, нормовані ортогональні поліноми Форсайта, надлишковий опис, лінгвістична змінна, обмежений активний експеримент

Introduction. Modern applied information systems use formal models of informatization objects. Their reliable design is still a non-trivial scientific and applied problem. In particular, the problem of constructing a multivariate polynomial regression (MPR) is still the subject of research by scientists [1–8]. Papers [9, 10] addressed the following problem. We have an MPR given by the redundant representation

$$\bar{y}(\bar{x}) = \sum_{\substack{j_1, \dots, j_t \\ i_1, \dots, i_t}} b_{i_1, \dots, i_t}^{j_1, \dots, j_t} (x_{i_1})^{j_1} (x_{i_2})^{j_2} \dots (x_{i_t})^{j_t} + E, \quad (1)$$

where $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)^T$ is a deterministic vector of input variables, E is a random variable with arbitrary distribution, its mathematical expectation $ME = 0$, variance $\text{Var}(E) = \sigma^2 < \infty$. The value or the upper bound σ^2 is known. The work [10] describes in the most detail the methodology and its implementation algorithms for finding efficient estimates of the values of coefficients at nonlinear terms of the redundant representation (1). The algorithms allow to exclude redundant nonlinear terms from (1) practically exactly. The main idea is that giving an MPR with a redundant representation allows to find with a

given accuracy (a limitation on the variance value) the estimates of the coefficient values for nonlinear terms of the univariate polynomial regressions (UPRs) of the form

$$Y(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \dots + \theta_r x^r + E \quad (2)$$

where x is a scalar deterministic input, with solving the corresponding surely nondegenerate systems of linear equations. The variables of the systems are the estimates of the coefficients at nonlinear terms of the MPR (1). We will give two modifications of this method. The second modification contains the proof of the fact that it is possible to use, without reducing the accuracy, only one set of normalized orthogonal polynomials of Forsythe (NOPFs). We derive formulas for the variance of coefficient estimates for nonlinear terms of UPRs for this case. Paper [9] presents algorithms for estimating the coefficients of linear terms of the MPR (1) and building a linguistic variable, the value of which is a qualitative characteristic of the solution reliability for the problem as a whole. Finally, we give a modification of the proposed algorithms for the case when $\text{Var}(E) = 0$. This problem arises when the researcher can specify, up to the coefficient values, only the redundant representation (1) while performs the output measurements in a limited active experiment ($\forall x \in [c, d]$, $c < d$ are arbitrary real numbers) accurately.

Finding and studying the efficiency of estimates of coefficient values for nonlinear terms of a UPR. Let the UPR look like (2). Paper [11] gives the following result. Let a univariate polynomial have the form

$$y(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \dots + \theta_r x^r, \quad (3)$$

let $x = az + b$ where a, b are arbitrary constants. Then there is one-to-one correspondence between the coefficients $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_r$ of the polynomial

$$y(z) = \theta_0 + \theta_1(az + b) + \theta_2(az + b)^2 + \dots + \theta_r(az + b)^r = \gamma_0 + \gamma_1 z + \dots + \gamma_r z^r \quad (4)$$

in the form

$$A_r \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \dots \\ \theta_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \dots \\ \gamma_r \end{pmatrix} \quad (5)$$

where the matrix A_r is the upper triangular one:

$$A_r = \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ & a & & a_{ij} & \\ & & a^2 & & \\ & & & \ddots & \\ & 0 & & & a^r \end{pmatrix}. \quad (6)$$

This result allows to obtain estimates of the coefficients at nonlinear terms of the UPR (2) based on the results of a limited active experiment $x_i \rightarrow y_i, i = \overline{1, n} \forall x_i \in [c, d]$, $c < d$ are arbitrary real numbers, $x_1 = c < x_2 < \dots < x_n = d, x_j - x_{j-1} = \text{const}, j = \overline{2, n}$, using only the results of a virtual active experiment for a virtual UPR problem

$$y(z) = \gamma_0 + \gamma_1 z + \dots + \gamma_r z^r + E \quad (7)$$

($z_i \rightarrow y_i, i = \overline{1, n}$) where

$$a = \frac{d - c}{z_n - z_1} > 0, \quad b = x_1 - \frac{d - c}{z_n - z_1} \cdot z_1,$$

setting, for example,

$$z_1 = -|p| < z_2 < \dots < z_n = p > 1, \\ z_j - z_{j-1} = \text{const}, j = \overline{2, n}. \quad (8)$$

The values of the scalar input variable x of the UPR (2) are related to the values of the scalar input variable z of the virtual UPR (7) by the expression

$$x_j = az_j + b, j = \overline{2, n}, x_1 = c. \quad (9)$$

This allows for arbitrary $c < d$ to use at the given n only one set of NOPFs $Q_j(z), j = \overline{0, r}$, built for the values of the scalar variable z (8). Indeed [12], let the NOPF be $Q_j(z) = q_{j0} + q_{j1}z + \dots + q_{jj}z^j, j = \overline{0, r}$, where the numbers $q_{ij}, j = \overline{0, r}$, are obtained by numbers $z_j, j = \overline{1, n}$ (see (8)). Then the estimates $\hat{\gamma}_j, j = \overline{0, r}$, obtained by the least squares method (LSM) according to the results of a virtual experiment $z_i \rightarrow y_i, i = \overline{1, n}$ ($y_i, i = \overline{1, n}$, are the output results of an active experiment for a UPR (2) for $x_i, i = \overline{1, n}$, which are related to the values of $z_i, i = \overline{1, n}$, by the expressions (8), (9)), have the form

$$\hat{\gamma}_j = \hat{w}_r q_{rj} + \dots + \hat{w}_j q_{jj}, j = \overline{0, r}, \quad (10)$$

$$\hat{w}_j = \sum_{i=1}^n y_i Q_j(z_i), D\hat{w}_j = \sigma^2, \quad (11)$$

$$M\hat{\gamma}_j = \gamma_j, D\hat{\gamma}_j = \sigma^2 \sum_{i=r}^j q_{ij}^2. \quad (12)$$

The values of $\hat{\gamma}_j, j = \overline{0, r}$, by virtue of the LSM are

$$\arg \min_{\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_r} (y_i - \sum_{j=0}^r \gamma_j z_i^j)^2. \quad (13)$$

Let $\hat{\theta}_j, j = \overline{0, r}$, be the solution to the system of linear equations

$$A_r \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \dots \\ \theta_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\gamma}_0 \\ \hat{\gamma}_1 \\ \dots \\ \hat{\gamma}_r \end{pmatrix}, \quad (14)$$

where the variables are $\theta_j, j = \overline{0, r}$. Then the following statement is true.

Statement 1. $\hat{\theta}_j, j = \overline{0, r}$, are

$$\arg \min_{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_r} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=0}^r \theta_j x_i^j)^2.$$

Proof will be done by contradiction. Suppose

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=0}^r \hat{\theta}_j x_i^j)^2 > \\ & > \min_{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_r} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=0}^r \theta_j x_i^j)^2 \end{aligned}$$

and θ_j^* , $j = \overline{0, r}$, are $\arg \min_{\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_r} \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=0}^r \theta_j x_i^j)^2$.

Suppose γ_j^* , $j = \overline{0, r}$, are found from the system of linear equations

$$\begin{pmatrix} \gamma_0^* \\ \gamma_1^* \\ \dots \\ \gamma_r^* \end{pmatrix} = \mathbf{A}_r \begin{pmatrix} \theta_0^* \\ \theta_1^* \\ \dots \\ \theta_r^* \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Then, due to the one-to-one correspondence of solutions (15) and equations $\sum_{j=0}^r \theta_j^* x_i^j = \sum_{j=0}^r \gamma_j^* z_i^j$, $i = \overline{1, n}$, the condition (13) is not fulfilled. Statement 1 is proved.

Corollary. When using NOPFs for $r \leq r_{\max}$, at a fixed $n \geq r$ for arbitrary $c < d$ ($[c, d]$ is the range of possible values of the scalar deterministic variable in the UPR (2) problem, for $x_1 = c < x_2 < \dots < x_n = d$, $x_j - x_{j-1} = \text{const}$, $j = \overline{2, n}$; the estimates $\hat{\theta}_j$, $j = \overline{2, r}$, can be found using a single set of NOPFs $Q_j(z)$, $j = \overline{2, r}$, built, for example, for

$$\begin{aligned} z_1 &= -|p| < z_2 < \dots < z_n = p > 1, \\ z_j - z_{j-1} &= \text{const}, \quad j = \overline{2, n}. \end{aligned} \quad (16)$$

Remark. A set of NOPFs (16) is built for $Q_j(z)$, $j = \overline{0, r_{\max}}$.

Values of the coefficients q_{ij} , $i, j = \overline{0, r}$, must be found in advance with a predetermined accuracy.

Corollary 1. We suggest choosing the segment $[-|p|, p]$, $p > 1$, from empirical considerations related to finding $\forall q_{ij}$, $i, j = \overline{0, r}$ (10) with a given accuracy and the fact that for a symmetric segment $[-|p|, p]$, $p > 1$, the number of tests n to obtain efficient estimates of the UPR coefficients is the lowest [10].

Corollary 2. Condition (16) increases the efficiency of using an active experiment consisting of a repeating dataset x_1, \dots, x_n for obtaining variances of the estimates $\hat{\theta}_j$, $j = \overline{2, r}$, with a given accuracy.

Corollary 3. The values of variances $\text{Var}(\hat{\theta}_j)$, $j = \overline{0, 1}$, do not allow to guarantee their accuracy in advance at a small number of tests [11]. In this case we offer:

- to form a data set $x_1^*, \dots, x_{n_1}^*$ for $n_1 \geq n$ such that the matrix $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ [12] is nondegenerate;
- check the reliability degree of the found estimates $\hat{\theta}_j$, $j = \overline{0, r}$, that corresponds to the value of the linguistic variable introduced in [9].

To use only one set of NOPFs (16), we need to find the values of variances $\text{Var}(\hat{\theta}_j)$, $j = \overline{2, r}$, by the values of $\text{Var}(\hat{\gamma}_j)$, $j = \overline{2, r}$, given by the formula (12) [12].

The structure of the coefficient's matrix \mathbf{A}_r of the system of linear equations (5) allows us to get a solution for $\hat{\theta}_j$, $j = \overline{2, r}$, in the following form:

$$\hat{\theta}_r = \frac{1}{a^r} \hat{\gamma}_r; \quad \hat{\theta}_{r-1} = \frac{1}{a^{r-1}} \left(\hat{\gamma}_{r-1} - \frac{a_{r-1,r}}{a^r} \hat{\gamma}_r \right)$$

and in general form

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_{r-j} &= b_{r-j,1} \hat{\gamma}_{r-j} + b_{r-j,2} \hat{\gamma}_{r-j+1} + \dots + \\ &+ b_{r-j,j+1} \hat{\gamma}_r, \quad j = \overline{0, r-2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Remark. Practical recommendation for choosing a value of $p > 1$ is this: the value of p should be such that for almost all values of $c < d$ in any limited active experiment we have $a = \frac{1}{k}$ where $k \geq 1$ is an integer or real number with a limited number of decimal places. Then we have no division operation when finding the coefficients $\forall b_{l,m}$ of the system of equations (17).

By virtue of (10) we have

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_j &= b_{r-j,1} \sum_{l=r}^j \hat{w}_l q_{lj} + b_{r-j,2} \sum_{l=r}^{j+1} \hat{w}_l q_{lj} + \dots + \\ &+ b_{r-j,j+1} \hat{w}_r q_{rj} = \sum_{l=r}^j c_{lj} \hat{w}_l, \quad j = \overline{2, r}. \end{aligned} \quad (18)$$

By virtue of (11) and the following property of \hat{w}_j , $j = \overline{0, r}$ [12]:

$$\forall l \neq m \text{ cov}(\hat{w}_l, \hat{w}_m) = 0,$$

if \hat{w}_l, \hat{w}_m considered to be random variables, we obtain:

$$\text{Var}(\hat{\theta}_j) = \sigma^2 \left(\sum_{l=r}^j c_{lj} \right)^2, \quad j = \overline{2, r}. \quad (19)$$

Thus, we have two possible algorithms for finding estimates $\hat{\theta}_j$, $j = \overline{2, r}$, for the UPR problem (2), $x \in [c, d]$.

The first algorithm. Find such n ; $x_1 = c < x_2 < \dots < x_n = d$, $x_j - x_{j-1} = \text{const}$, $j = \overline{2, n}$; coefficients with a given accuracy of the NOPFs

$$Q_j(x), \quad j = \overline{0, r} \quad (20)$$

by the values of x_1, \dots, x_n ; l as the number of repetitions of the subsequence x_1, \dots, x_n in an active experiment that guarantees compliance with the restrictions on the variances $\text{Var}(\hat{\theta}_j)$, $j = \overline{2, r}$ (see the results of Pavlov A. A., Kalashnik V. V., Kovalenko D. A. presented in [10]).

Remark. In this case, we use the set of NOPFs (20), and the active experiment consisting of l repetitions of the subsequence x_1, \dots, x_n allows to reduce the variances $\text{Var}(\hat{\theta}_j)$, $j = \overline{2, r}$, in l times compared to an active experiment consisting of a sequence x_1, \dots, x_n .

The second algorithm. To find the estimates of $\hat{\theta}_j$, $j = \overline{2, r}$, use for an arbitrary limited active experiment ($x \in [c, d]$) the single set of NOPFs (16), the number l of repetitions of the subsequence x_1, \dots, x_n in a limited active experiment for the UPR problem (2) is set by the analysis of the values of $\text{Var}(\hat{\theta}_j)$, $j = \overline{2, r}$, by the formula (19).

Methodology and algorithms for estimating coefficients at nonlinear terms of an MPR given by a redundant representation. As a whole, the methodology and algorithms for estimating coefficients at nonlinear terms of an MPR given by a redundant representation were given in [10]. In this section, based on a brief description of this methodology, we will present partial cases of the general problem which are of practical importance and significantly facilitate the problem solution and increase the accuracy of estimating the coefficients at nonlinear terms of the MPR.

Remark. We suggest having the content of the article [10] for a detailed analysis of the following results.

1. In [10], the sequence of actions is given that leads to the guaranteed possibility of finding the estimates of the coefficients at nonlinear terms of an MPR by estimates of the coefficients at nonlinear terms of UPRs after sequential building of UPRs and solving the appropriate number of systems of nondegenerate linear equations. This sequence of actions is as follows.

1) At first, we select in random order, one by one, nonlinear terms of the MPR, each of which contains at least one variable to a power not lower than two. Let it be a variable x_j . Then we carry out an active experiment at the following values of input variables: $x_{ji} = x_i$, $i = \overline{1, n}$, $\forall x_i \in [c, d]$, $n \geq r_{\max} = \max_{\forall l} j_l$ (see the formula (1)). For the segment $[c, d]$, we have: any input variable can take in a limited active experiment any value from this segment. $x_{li} = x_{l\text{fix}}^1$, $i = \overline{1, n}$, $\forall l \neq j$, $x_{l\text{fix}}^1 \in [c, d]$ is the fixed value of the variable x_l when constructing the first UPR in order.

Remark. As calculations have shown, for $n = 10$ and $c < d$ having the same sign, an active experiment must use a sequence consisting of l repetitions of the subsequence x_1, \dots, x_n .

First, we find the estimates of the coefficients at nonlinear terms of the MPR by all the equations containing only one variable. Then, we substitute the values of the estimates into the redundant representation of the MPR (1). Next, for each equation containing more than one indeterminate factor at nonlinear terms of the redundant representation of MPR (1), we execute the appropriate number of active experiments to find the estimates for nonlinear terms of UPRs. In each of the experiments, $x_{ji} = x_i$, $i = \overline{1, n}$, $x_{li} = x_{l\text{fix}}^t$, $i = \overline{1, n}$, $\forall l \neq j$, $t = \overline{2, T}$, where T is the number of indeterminate factors for nonlinear terms of the MPR given by the redundant representation which are included in this equation. The values of $\forall x_{l\text{fix}}^t$ are chosen so that the corresponding system of linear equations containing indeterminate factors at nonlinear terms of the MPR given by the redundant representation (1) is nondegenerate. This can always be realized. The estimates found for nonlinear terms of the MPR are substituted into the redundant representation (1). After that, the next equation containing indeterminate factors at nonlinear terms of the MPR is analyzed, etc. Then, we consider the next nonlinear term with an indeterminate factor of the MPR given by the redundant representation (1). The coefficient must contain at least one input variable to a power

not lower than two, and the algorithmic procedure described above is repeated for it. As a result, we obtain estimates of the coefficients for all nonlinear terms of the MPR given by the redundant representation which contain at least one input variable to a power not lower than two.

2) The algorithmic procedure described in item 1) is repeated sequentially for all nonlinear terms of the MPR given by the redundant representation (1) which contain input variables to a power not higher than one.

Remark 1. In this case, each active experiment has the form: at least two, but not more than r_{\max} input variables take the values of x_i , $i = \overline{1, n}$, $\forall x_i \in [c, d]$. Other input variables take fixed values chosen so that the corresponding systems of linear equations are nondegenerate.

Remark 2. The described methodology guarantees finding of all estimates for nonlinear terms of the MPR given by the redundant representation, using the estimates of coefficients at nonlinear terms of the corresponding UPRs. But it should be noted that each specific choice of a sequence of nonlinear terms of the MPR given by the redundant representation (1) differs from each other in its execution complexity.

Remark 3. Paper [10] provides a detailed description of solving a specific example.

Remark 4. If there are additional restrictions on the active experiment, namely, not all input variables can take the same values ($x_{j_1 i} = x_{j_2 i} = x_i$, $i = \overline{1, n}$), then the above method solves the problem if for each nonlinear term of the MPR given by the redundant representation of the form $\sum b_{i_1, \dots, i_t}^{1, \dots, 1} x_{i_1} \cdot x_{i_2} \cdot \dots \cdot x_{i_t}$ there are at least two input variables that can take the same values in the active experiment.

Remark 5. The algorithmic procedure for estimating the coefficients at linear terms of the MPR (1) and the reliability degree of the obtained results in general are given in [12].

2. Partial cases of the redundant representation of an MPR and of the possibilities of limited active experiment.

2.1. Suppose that the following situation is fulfilled when using the algorithmic procedure of item 1).

a) in item 1) the first considered nonlinear term of the redundant representation (1) contains the factor $(x_{i_l})^{j_l}$, $j_l \geq 2$, and the following holds for the input variable x_{i_l} : there can be only one nonlinear term from the redundant representation (1) that contains $(x_{i_l})^{j_p} \forall j_p \geq 2$.

b) each subsequent step of the algorithmic procedure of item 1) is executed for the nonlinear term for which the condition a) is fulfilled.

Remark. Nonlinear terms of (1) containing the chosen input variable to a power not lower than two may not correspond to the condition a) but estimates of the coefficients for them were found in the previous steps of the algorithm.

c) the number of factors in each nonlinear term of the redundant representation (1) that contains input variables to a power not higher than one does not exceed r_{\max} , while m can be greater than r_{\max} , and the steps of the algorithmic procedure of item 2) are executed for non-

linear terms of the redundant representation (1) which contain the maximum number of factors.

Remark. In this case, we estimate at each step only the coefficients given by a linear equality containing a single variable.

The following statement is true.

Statement 2. If the conditions a)–c) are met then the algorithmic procedure of items 1) and 2) surely finds estimates of the coefficients at all nonlinear terms of the redundant representation (1), and an equation with a single variable is solved to estimate each coefficient.

Proof. Statement 2 follows from the construction rule of the linear equations (see [10]).

2.2. Suppose that the following condition is met at each step of the algorithm of item 1) executed for a nonlinear term containing the input variable $(x_{i_l})^{j_l}$, $j_l \geq 2$:

d) there are no members containing input variables $(x_{i_l})^{j_l}$ in the redundant representation (1) whose coefficients were not estimated in the previous steps of the algorithm.

Remark. A partial case of the condition d): in the redundant representation (1) for $\forall j \geq 2$ any input variable to a power j is included in only one nonlinear term.

Then the following statement is obviously true.

Statement 3. If the conditions d), c) are met, then the algorithmic procedure of items 1), 2) surely finds estimates of all coefficients at nonlinear terms, each of which satisfies a linear equality with a single indeterminate.

2.3. Let the following condition be satisfied.

e) the active experiment allows to set the value of any single input variable to zero; among all nonlinear terms containing $(x_{i_l})^{j_p}$, $j_p \geq 2$, whose estimates of the values of their coefficients were not found in the previous steps of the algorithm, we have a single nonlinear term (for which the corresponding step of the algorithm of item 1) is executed) that does not contain an input variable included in all other nonlinear terms with indeterminate factors containing $(x_{i_l})^{j_p}$. This variable is set to zero during the active experiment. Then the following obvious statement is true.

Statement 4. If the conditions e) (for each step of the algorithm of item 1)) and c) are met then the algorithmic procedure of items 1), 2) allows to find estimates of coefficients at nonlinear terms of redundant representation (1) by solving only linear equations with a single variable.

Finding the coefficients of a multivariate polynomial given by a redundant representation in a deterministic formulation. Consider the degenerate MPR problem given by a redundant representation (1) for the case when $E \equiv 0$. Then the algorithmic procedure described in items 1), 2), firstly, finds practically exact values of the coefficients (assuming that the corresponding systems of linear equations are solved with a predetermined accuracy), and secondly, allows the following simplifications.

- the total number of tests in the active experiment to build each univariate polynomial does not exceed r_{\max} ;

- it is quite appropriate to use only one set of NOPFs;
- the coefficient values at the linear terms of a multivariate polynomial given by the redundant representation are found with an algorithmic procedure similar to that of item 2) of the previous section using the NOPFs to the powers zero and one.

Conclusions. 1. We have stated the problem of building a multivariate polynomial given by a redundant representation in stochastic and deterministic formulations, based on the results of an active experiment.

2. A description of the integral algorithmic procedure for solving the problem in both formulations is given. It is based on building univariate polynomial regressions and solving nondegenerate systems of linear equations.

3. We have proved the possibility of using a single set of normalized orthogonal polynomials of Forsythe to estimate the coefficients of a univariate polynomial regression.

4. Quite practical partial cases of redundant representation were considered which simplify the problem solution as much as possible.

5. We have given a modification of the general algorithmic procedure to solve the problem in its deterministic formulation.

References

1. Ивахненко А. Г. *Моделирование сложных систем. Информационный подход*. Киев: Вища школа, 1987. 62 с.
2. Настенко Е., Павлов В., Бойко Г., Носовец О. Многокритериальный алгоритм шаговой регрессии. *Биомедицина инженерия і технологія*. 2020. № 3. С. 48–53. doi: 10.20535/2617-8974.2020.3.195661
3. Draper N. R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. 3rd edition. New York: John Wiley & Sons, 1998. 736 p.
4. Большаков А. А., Каримов Р. Н. *Методы обработки многомерных данных и временных рядов: учебн. пособие для вузов*. Москва: Горячая линия–Телеком, 2007. 522 с.
5. Shahrel M. Z., Mutalib S., Abdul-Rahman S. PriceCop–Price monitor and prediction using linear regression and LSVM-ABC methods for e-commerce platform. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*. 2021. Vol. 13 (1). P. 1–14. doi: 10.5815/ijieeb.2021.01.01
6. Satter A., Ibtehad N. A regression based sensor data prediction technique to analyze data trustworthiness in cyber-physical system. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*. 2018. Vol. 10 (3). P. 15–22. doi: 10.5815/ijieeb.2018.03.03
7. Isabona J., Ojuh D. O. Machine learning based on kernel function controlled gaussian process regression method for in-depth extrapolative analysis of Covid-19 daily cases drift rates. *International Journal of Mathematical Sciences and Computing (IJMSC)*. 2021. Vol. 7 (2). P. 14–23. doi: 10.5815/ijmsc.2021.02.02
8. Babatunde G., Emmanuel A. A., Oluwaseun O. R., Bunmi O. B., Precious A. E. impact of climatic change on agricultural product yield using k-means and multiple linear regressions. *International Journal of Education and Management Engineering (IJEME)*. 2019. Vol. 9 (3). P. 16–26. doi: 10.5815/ijeme.2019.03.02
9. Павлов О. А., Головченко М. М., Ревич М. М. Метод оцінки коефіцієнтів при лінійних членах багатовимірної поліноміальної регресії, заданої надлишковим описом. *Адаптивні системи автоматичного управління: міжвідомчий наук.-техн. збірник*. Київ: НТУУ «КПІ», 2022. Том 1, № 40. (у друці)
10. Pavlov A., Holovchenko M., Mukha I., Lishchuk K. Mathematics and software for building nonlinear polynomial regressions using estimates for univariate polynomial regressions coefficients with a given (small) variance. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications*

- Technologies*. 2022. Vol. 134. P. 288–303. doi: 10.1007/978-3-031-04812-8_25
11. Pavlov A. A. Estimating with a given accuracy of the coefficients at nonlinear terms of univariate polynomial regression using a small number of tests in an arbitrary limited active experiment. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 2 (6). С. 3–7. doi: 10.20998/2079-0023.2021.02.01
 12. Худсон Д. *Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике*. 2-е изд. Москва: Мир, 1970. 296 с.
- References (transliterated)**
1. Ivahnenko A.G. *Modelirovanie slozhnykh sistem. Informatsionnyj podhod* [Complex Systems Modeling. Informational Approach]. Kiev, Vyshha shkola Publ., 1987. 62 p.
 2. Nastenka E., Pavlov V., Boyko G., Nosovets O. *Mnogokriterial'nyj algoritm shagovoj regressii. Biomedychna inzheneriya i tekhnologiya* [Biomedical engineering and technology]. 2020, no. 3, pp. 48–53. doi: 10.20535/2617-8974.2020.3.195661
 3. Draper N. R., Smith H. *Applied Regression Analysis*. 3rd edition. New York, John Wiley & Sons, 1998. 736 p.
 4. Bol'shakov A. A., Karimov R. N. *Metody obrabotki mnogomernykh dannykh i vremennykh ryadov: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Methods for processing multivariate data and time series: textbook for universities]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2007. 522 p.
 5. Shahrel M. Z., Mutalib S., Abdul-Rahman S. PriceCop–Price monitor and prediction using linear regression and LSVM-ABC methods for e-commerce platform. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*. 2021, vol. 13 (1), pp. 1–14. doi: 10.5815/ijieeb.2021.01.01
 6. Satter A., Ibtihaz N. A regression based sensor data prediction technique to analyze data trustworthiness in cyber-physical system. *International Journal of Information Engineering and Electronic Business (IJIEEB)*. 2018, vol. 10 (3), pp. 15–22. doi: 10.5815/ijieeb.2018.03.03
 7. Isabona J., Ojuh D. O. Machine learning based on kernel function controlled gaussian process regression method for in-depth extrapolative analysis of Covid-19 daily cases drift rates. *International Journal of Mathematical Sciences and Computing (IJMSC)*. 2021, vol. 7 (2), pp. 14–23. doi: 10.5815/ijmsc.2021.02.02
 8. Babatunde G., Emmanuel A. A., Oluwaseun O. R., Bunmi O. B. Precious A. E. impact of climatic change on agricultural product yield using k-means and multiple linear regressions. *International Journal of Education and Management Engineering (IJEME)*. 2019, vol. 9 (3), pp. 16–26. doi: 10.5815/ijeme.2019.03.02
 9. Pavlov O. A., Holovchenko M. M., Revych M. M. Metod otsinky koefitsiyentiv pry liniynykh chlenakh bahatovymirnoyi polinomial'noyi rehresiyi, zadanoyi nadlyshkovym opysom. [Method for estimating coefficients for linear terms of multidimensional polynomial regression given by redundant description] *Adaptivni systemy avtomatichnoho upravlinnya: mizhvidomchyy nauk.-tekh. zbirnyk* [Adaptive systems of automatic control: interdepartmental scientific and technical. collection]. Kyiv, KPI Publ., 2022, vol. 1, no. 40. (in print)
 10. Pavlov A., Holovchenko M., Mukha I., Lishchuk K. Mathematics and software for building nonlinear polynomial regressions using estimates for univariate polynomial regressions coefficients with a given (small) variance. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2022, vol. 134, pp. 288–303. doi: 10.1007/978-3-031-04812-8_25
 11. Pavlov A. A. Estimating with a given accuracy of the coefficients at nonlinear terms of univariate polynomial regression using a small number of tests in an arbitrary limited active experiment *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 2 (6), pp. 3–7. doi: 10.20998/2079-0023.2021.02.01
 12. 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 dlya fizikov: Lekcii po teorii verojatnostej i jelementarnej statistike*. Moscow, Mir Publ., 1970. 296 p.) doi: 10.5170/CERN-1964-018

Received 04.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Павлов Олександр Анатолійович – доктор технічних наук, професор кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>; e-mail: pavlov.fiot@gmail.com

Головченко Максим Миколайович – старший викладач кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-8046>; e-mail: ma4ete25@ukr.net

Дрозд Валерія Валеріївна – бакалавр кафедри інформатики та програмної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/https://orcid.org/0000-0003-0418-1139>; e-mail: drozdllera@gmail.com

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

Holovchenko Maxim Nikolaevich – Senior Lecturer of Informatics and Software Engineering Department of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9575-8046>; e-mail: ma4ete25@gmail.com

Drozd Valeria Valerievna – Bachelor of Informatics and Software Engineering Department of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0418-1139>; e-mail: drozdllera@gmail.com

Л. Г. РАСКІН, Л. В. СУХОМЛИН

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСУ В УМОВАХ НЕЧІТКИХ ВИХІДНИХ ДАНИХ

Розглянуто задачу розподілу ресурсу за декількома напрямками його витрачання для випадку, коли параметри критерію ефективності розподілу є нечіткими числами із заданими функціями належності. Мета дослідження – розробка математичних моделей та методів розв’язання задачі розподілу ресурсу для практично найважливіших критеріїв з урахуванням нечіткості числових значень їх параметрів. Проведено аналіз відомого підходу до розв’язання задачі та виявлено основні його недоліки, що мотивують продовження досліджень. Запропоновано метод розв’язання поставленої задачі, обчислювальна реалізація якого містить три етапи. На першому етапі з використанням функцій належності нечітких параметрів задачі формується функція належності критерію. Отримувана при цьому функція на другому етапі апроксимується з використанням чотирьохпараметричного розподілу. Важлива перевага цього розподілу полягає у можливості шляхом варіації числових значень його параметрів у широкому діапазоні змінювати математичне очікування, дисперсію і асиметрію величин, що задаються цим розподілом, забезпечуючи високу якість апроксимації. Отже визначається критерій ефективності задачі. На третьому етапі формується математична модель оптимізаційної задачі розподілу обмеженого ресурсу. Розглянуто такі три варіанти побудови критерію оптимальності: максимізація критерію за максимально можливого значення його функції належності; максимізація критерію за умови, що значення його функції належності не нижче заданого; максимізація критерію за умови, що значення функції належності кожного його доданка буде не нижче заданого. Кожна з задач, що при цьому є стандартною задачею математичного програмування і розв’язується відомими методами. Обговорюється можливий напрямок подальших досліджень з метою підвищення адекватності використовуваних аналітичних описів функцій належності нечітких параметрів задачі.

Ключові слова: задача раціонального розподілу обмеженого ресурсу, нечіткий опис критерію, математична модель та метод розв’язання.

L. G. RASKIN, L. V. SUHOMLIN

OPTIMIZATION OF RESOURCE DISTRIBUTION UNDER THE CONDITIONS OF FUZZY INITIAL DATA

The problem of resource distribution in several directions of its spending is considered for the case when the parameters of the distribution efficiency criterion are fuzzy numbers with given membership functions. The purpose of the study is the development of mathematical models and methods for solving the problem of resource allocation for practically the most important criteria, taking into account the fuzziness of the numerical values – of their parameters. An analysis of the well-known approach to solving the problem is carried out and its main shortcomings are identified, which motivate the continuation of research. A method for solving the stated problem is proposed, the computational implementation of which contains three stages. At the first stage, using the membership functions of the fuzzy parameters of the problem, the membership function of the criterion is formed. The function obtained in this case is approximated at the second stage using a four-parameter distribution. An important advantage of this distribution is the possibility, by varying the numerical values – of its parameters over a wide range, to change the mathematical expectation, variance, and asymmetry of the values – specified by this distribution, providing a high quality of approximation. Thus, the criterion for the effectiveness of the task is determined. At the third stage, a mathematical model of the optimization problem of the distribution of a limited resource is formulated. The following three options for constructing an optimality criterion are considered: maximizing the criterion with the maximum possible value of its membership function; maximization of the criterion, provided that the value of its membership function is not lower than the specified one; maximization of the criterion, provided that the value of the membership function of each of its terms is not lower than the specified one. Each of the resulting problems is a standard problem of mathematical programming and is solved by known methods. A possible direction for further research is discussed in order to improve the adequacy of the used analytical descriptions of the membership functions of the fuzzy parameters of the problem.

Keywords: problem of rational distribution of a limited resource, fuzzy description of the criterion, mathematical model and solution method

Вступ. Розглянемо змістовний опис економічної системи, для управління якої актуальною є задача оптимального розподілу обмеженого ресурсу. Нехай система складається з головного підприємства (центру) та підпорядкованих йому підрозділів, розташованих, як правило, територіально далеко від центру (в інших країнах, містах, віддалених районах великого міста). Такі підрозділи називатимемо елементами системи. Структура управління всієї системи зосереджена у центрі, проте елементам делеговані певні повноваження, які у самостійному визначенні структури витрат, системі стимулювання персоналу та інше. Вважатимемо, що елементи в такій системі є рівноправними підрозділами – філіями головного підприємства без утворення юридичної особи, або складами – магазинами. Обмеженим ресурсом у системі є певна сума вільних коштів, призначених для розподілу між елементами системи з метою отримання максимального сумарного прибутку. Якщо число елементів у такій системі велике, то перед центром виникає нетривіальна проблема обґрунтованого розподілу наявного

обмеженого ресурсу. Рівень складності оптимізаційної задачі, що отримується, визначається характером взаємозв’язку між величиною вкладених коштів і очікуваним прибутком.

Надалі приймемо, що система організаційно складається з одного керуючого елемента (центру) та кількох підлеглих йому елементів.

Співвідношення, що пов’язує витрати та випуск продукції, прийнято називати виробничою функцією.

Нехай

x – обсяг витрат, виражений у вартісних одиницях,

z – обсяг випуску, виражений у вартісних одиницях.

Тоді співвідношення $y = f(x)$ визначає виробничу функцію. В економічній теорії застосовуються різні види виробничих функцій. Проте всі вони мають характерну особливість, що відображає відомий економічний принцип «зменшуваної ефективності» [1, 2].

Постановка задачі. Розглянемо математичну постановку задачі розподілу ресурсу у дворівневій

системі «центр – елементи». Задамо як $J = \{1, 2, \dots, n\}$ множину елементів виробничої системи, що випускає продукцію, споживаючи при цьому один вид ресурсу, що у розпорядженні управляючого органу системи (центру) у кількості C . Через \tilde{x}_j, \tilde{z}_j позначимо відповідно обсяг використовуваного ресурсу та розмір доходу для j -го елемента.

Виробнича функція для кожного елемента є опуклою вгору, безперервною і неубутною в області свого визначення. Типова виробнича функція елемента системи має такий вигляд:

$$z_j = f_j(x_j, \Theta_j) = a_{0j} x_j^{a_{1j}}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Тут елементи вектора $\Theta_j = (a_{0j}, a_{1j})$ однозначно визначають належності виробничої функції для j -го елемента системи, причому завжди виконується умова $a_{1j} < 1$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Стратегія центру полягає у пошуку набору $\{x_j\}$, що максимізує

$$Z = \sum_{j=1}^n f_j(x_j, \Theta_j) \quad (2)$$

та задовольняє обмеження

$$\sum_{j=1}^n x_j = C, \quad x_j \geq 0. \quad (3)$$

Отримана задача легко розв'язується методом невизначених множників Лагранжа. Однак рівень корисності одержуваного розв'язку незадовільний з огляду на неадекватність фактично використаного при побудові моделі жорсткого припущення про детермінованість її параметрів. Реальна неповна поінформованість центру щодо виробничих функцій елементів призводить до необхідності відмовитися від цієї гіпотези.

Математичні моделі та методи розв'язання задачі. Можливі наступні реалістичні моделі опису виробничих функцій елементів системи:

- центру точно відомі коефіцієнти a_{0j}, a_{1j} ;
- параметри виробничої функції елемента a_{0j}, a_{1j} – випадкові величини та центру відомі закони розподілу цих випадкових величин;
- параметри виробничої функції елемента задані лише з точністю до певного діапазону.

Розглянемо тепер ситуацію, коли рівень невизначеності такий, що закони розподілу параметрів виробничих функцій (і, отже, закон розподілу виграшу) невідомі, і через будь-які об'єктивні причини, статистичне оцінювання параметрів цих законів неможливе.

Для розв'язання задачі в цій ситуації природно використовувати апарат нечітких множин [3–6]. У межах цього підходу задача оптимального розподілу обмеженого ресурсу можливо сформулювати наступним чином.

Нехай $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, $X \in R_n$ – задана універсальна множина альтернатив розподілу ресурсу.

Підмножина допустимих альтернатив описується рівністю

$$\sum_{j=1}^n x_j = C \quad (4)$$

і нерівностями $x_j \geq 0$, $j = 1, 2, \dots, n$.

Чисельне значення критерію ефективності конкретної альтернативи X оцінюється значенням функції

$$F(X, A) = \sum_{j=1}^n f_j(x_j, a_{0j}, a_{1j}) = \sum_{j=1}^n a_{0j} x_j^{a_{1j}}, \quad (5)$$

де $f_j(x_j, a_{0j}, a_{1j})$ – виробнича функція j -го елемента системи $A = (a_{01}, a_{11}, a_{02}, a_{12}, \dots, a_{0n}, a_{1n})$.

Вважатимемо, що параметри задачі (компоненти вектора A) задані у вигляді нечітких чисел з функціями належності

$$M_j^{(0)}(a_{0j}), M_j^{(1)}(a_{1j}), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

З практичних міркувань задамо a_0 нормальним нечітким числом з трикутною функцією належності $M^{(0)}(a_0)$ та носієм $[a_{0\min}, a_{0\max}]$, $M^{(0)}(a_{0\text{нв}}) = 1$, де $a_{0\text{нв}}$ – найбільш ймовірне значення параметра a_0 . Позначимо $a_{0\text{нв}} = c_0$. Тут і нижче, там, де це не викликає непорозуміння, індекс j для простоти опущений. Графік функції належності $M^{(0)}(a_0)$ наведено на рис. 1.

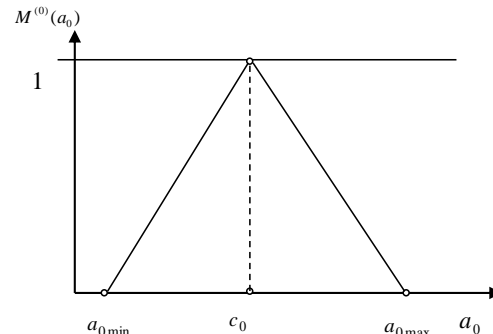


Рис. 1. Функція належності $M^{(0)}(a_0)$

Тоді функція належності параметра a_0 має вигляд:

$$M^{(0)}(a_0) = \begin{cases} 0, & a_0 < a_{0\min}, \\ \frac{a_0 - a_{0\min}}{c_0 - a_{0\min}}, & a_0 \in [a_{0\min}, c_0], \\ \frac{a_{0\max} - a_0}{a_{0\max} - c_0}, & a_0 \in [c_0, a_{0\max}], \\ 0, & a_0 > a_{0\max}. \end{cases} \quad (7)$$

Аналогічно, задамо a_1 нормальним нечітким числом з трикутною функцією належності $M^{(1)}(a_1)$ та носієм $[a_{1\min}, a_{1\max}]$, $M^{(1)}(a_{1\text{нв}}) = 1$, де $a_{1\text{нв}}$ найбільш

ймовірне значення параметра a_1 . Позначимо $a_{1\text{нв}} = c_1$. Графік функції належності $M^{(1)}(a_1)$ має вигляд, аналогічний графіку функції $M^{(0)}(a_0)$.

Функція належності параметра a_1 має вигляд:

$$M^{(1)}(a_1) = \begin{cases} 0, a_1 < a_{1\text{min}}, \\ \frac{a_1 - a_{1\text{min}}}{c_1 - a_{1\text{min}}}, a_1 \in [a_{1\text{min}}, c_1], \\ \frac{a_{1\text{max}} - a_1}{a_{1\text{max}} - c_1}, a_1 \in [c_1, a_{1\text{max}}], \\ 0, a_1 > a_{1\text{max}}. \end{cases} \quad (8)$$

Зрозуміло, що з нечіткості опису параметрів задачі оцінка ефективності будь-якої альтернативи є нечітке число.

Традиційний підхід до розв'язання задачі максимізації нечітко заданої функції (5) при обмеженнях (4) зводиться до наступного [7, 4, 8].

Нехай $A^{(0)} = (a_{0j}^{(0)}, a_{1j}^{(0)})$, $j = 1, 2, \dots, n$, – певний конкретний набір значень a_{0j}, a_{1j} , $j = 1, 2, \dots, n$. Ступені належності цих значень заданим нечітким множинам рівні відповідно $M_j^{(0)}(a_{0j}^{(0)})$, $M_j^{(1)}(a_{1j}^{(0)})$, $j = 1, 2, \dots, n$. Введемо

$$\eta_0 = \min_j \{ \min(M_j^{(0)}(a_{0j}^{(0)}), M_j^{(1)}(a_{1j}^{(0)})) \}. \quad (9)$$

Нехай тепер $\hat{X} = (\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_n)$ – певний конкретний набір змінних (x_1, x_2, \dots, x_n) , а число $\hat{\eta}_0 = F(\hat{x}, A^{(0)})$ є значенням функції (5), що відповідає альтернативі \hat{X} .

Природно прийняти, що це значення належить нечіткою оцінці альтернативи \hat{X} зі ступенем, не меншим η_0 . З огляду на це може бути сформована нечітка цільова функція

$$\phi(X, r) = \max_{A \in Q(X, r)} (\eta(A)), \quad (10)$$

де

$$\eta(A) = \min_j \{ \min(M_j^{(0)}(a_{0j}), M_j^{(1)}(a_{1j})) \}, \quad (11)$$

$$Q(X, r) = \{ A : F(X, A) = r \}. \quad (12)$$

Якщо зафіксувати допустимі значення функцій належності $M_j^{(0)}(a_{0j})$, $M_j^{(1)}(a_{1j})$ нечітко заданих параметрів a_{0j} , a_{1j} , $j = 1, 2, \dots, n$, на рівні α , то отримаємо таку задачу математичного програмування.

Знайти X^* , A такі, що

$$X^* = \arg \max_x \max_{A \in Q(X, r)} F(x^*, A), \quad (13)$$

при обмеженнях

$$\min(M_j^{(0)}(a_{0j}), M_j^{(1)}(a_{1j})) \geq \alpha, \quad j = 1, 2, \dots, n; \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n x_j = C, \quad x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (15)$$

Таким чином, сформульована задача відшукування набору $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$, що забезпечує максимальне можливе значення $r^* = F(x^*, A)$ за умови, що нечітко задані параметри задачі a_{0j} , a_{1j} , $j = 1, 2, \dots, n$, належать відповідним нечітким множинам зі ступенем, не нижче α .

Ця задача, при конкретних, заданих аналітично цільовій функції $F(x, A)$ та функціях належності $M_j^{(0)}$, $M_j^{(1)}$, $j = 1, 2, \dots, n$, розв'язується із застосуванням чисельних методів, наприклад, методом Нелдера – Міда. Разом з тим, незважаючи на традиційну використаність описаного підходу, його не можна вважати цілком задовільним. Недоліки описаного підходу зумовлені таким.

Чітка функція чіткого аргументу з нечітко заданим параметром деяким, іноді складним чином відображає його в нечітке число. Припустимо, що нечітко заданий параметр набуває конкретного значення в межах області, що відповідає значенню своєї функції належності не нижче заданого. При цьому, оскільки нечіткий опис функції відсутній, нічого не можна сказати щодо того, яке значення функції належності, що відповідає обраному значенню аргументу. При цьому неможливо відповісти на питання про те, чи воно належить інтервалу значень цієї функції належності не нижче заданого. Зазначена обставина проявляється особливо демонстративно, якщо аргумент функції векторний.

Додаткові проблеми тут виникають у зв'язку з тим, що різні параметри цільової функції можуть по-різному впливати на результат. У зв'язку з цим допустимий рівень належності нечітких параметрів задачі може бути різним.

Перелічені проблеми можуть бути подолані, якщо за заданими функціями належності параметрів отримати функцію належності критерію. У цьому, зокрема, у нечіткій задачі оптимального розподілу ресурсу потрібно спочатку знайти функції належності для виробничих функцій елементів системи $f_j(x_j, a_{0j}, a_{1j})$, $j = 1, 2, \dots, n$ та далі для критеріальної функції (5). Припустимо, що ця задача розв'язана і $M_j(f_j(x_j))$ – функції належності для нечітких чисел $f_j(x_j)$, $j = 1, 2, \dots, n$, а $M_\Sigma(F(X))$ – функція належності нечіткого числа $F(X, A)$. Тоді можна сформулювати такі нечіткі задачі раціонального розподілу ресурсу.

Постановка першої задачі виглядає так.

Нехай довільному набору $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$

відповідає $F(X) = \sum_{j=1}^n f_j(x_j)$ з функцією належності

$M_\Sigma(F(X))$. Визначимо

$$F^*(X) = \arg \max_{F(X)} M_{\Sigma}(F(X)). \quad (16)$$

Формулюємо задачу пошуку розподілу ресурсу так:

Знайти

$$X^* = \arg \max_X F^*(X) = \arg \max_X \max_{F(X)} M_{\Sigma}(F(X)). \quad (17)$$

При цьому знаходиться набір максимізуючий критерій ефективності розподілу при максимально можливому рівні функції належності.

Постановку другої задачі можна сформулювати в такий спосіб.

Для функції належності $M_{\Sigma}(F(X))$ введемо інтервал

$$L_{\Sigma}(X) = \{F(X) : M_{\Sigma}(F(X)) \geq \alpha M_{\Sigma}(F^*(X))\}. \quad (18)$$

Визначимо тепер

$$\underline{F}(X) = \arg \min_{F(X) \in L_{\Sigma}(X)} M_{\Sigma}(F(X)). \quad (19)$$

Значення $\underline{F}(X)$ задає песимістичну оцінку критеріальної функції, для якої значення функції належності не нижче заданого. Тепер задачу оптимізації формулюємо так:

знайти

$$X^* = \arg \max_X \underline{F}(X). \quad (20)$$

Набір X^* визначає максимальну стратегію розподілу ресурсу.

І, нарешті, постановка третьої задачі виглядає так.

Нехай кожному x_j відповідає $f_j(x_j)$ з функцією належності, $M_j(f_j(x_j))$, $j = 1, 2, \dots, n$. Введемо

$$u_j^0 = \arg \max_{f_j(x_j)} M_j(f_j(x_j)), \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (21)$$

а також інтервали

$$L_j(x_j) = \{f_j(x_j) : M_j(f_j(x_j)) \geq \alpha M_j(u_j^0)\}, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (22)$$

Визначимо тепер

$$\underline{u}_j = \arg \min_{f_j(x_j) \in L_j(x_j)} M_j(f_j(x_j)), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (23)$$

Значення \underline{u}_j визначають граничні, песимістичні значення $f_j(x_j)$, котрим значення функцій належності не нижче заданого.

Тепер задачу розподілу можна сформулювати так:

Знайти

$$X^* = \arg \max_X \sum_{j=1}^n (\underline{u}_j(x_j)). \quad (24)$$

При цьому знаходиться набір, що максимізує критерій за умови, що функція належності для кожного з доданків набуває значення не нижче заданого.

Усі три сформульовані задачі є стандартними задачами математичного програмування та розв'язуються чисельними методами.

Для розв'язання першої з поставлених задач, необхідно знайти функції належності для виробничих функцій елементів системи $f_j(x_j, a_{0j}, a_{1j})$, $j = 1, 2, \dots, n$, а потім для критеріальної функції (5).

З цією метою отримаємо безперервну апроксимацію функції належності прибутку елемента $M(u)$ для заданих $a_{0\min}, a_{0\max}, a_{1\min}, a_{1\max}$.

Для апроксимації $j = 1, 2, \dots, n$ вибрано наступне враження:

$$\tilde{M}(u) = \Theta_0 \exp \left\{ -\frac{(u - \Theta_1)}{2(\Theta_2)^2} (1 + \Theta_3 \operatorname{sign}(u - \Theta_1)) \right\}, \quad (25)$$

де Θ_0 – параметр, що задає максимальне значення функції $\tilde{M}(u)$;

Θ_1 – параметр, що визначає значення u , що максимізує функцію $\tilde{M}(u)$;

Θ_2 – Параметр, що визначає розкид значень u щодо Θ_1 ;

Θ_3 – Параметр, що визначає можливості функції $\tilde{M}(u)$ щодо асиметрії.

На множенні значень x_1, x_2, \dots, x_n будується набір функціоналів:

$$J(x_j) = \int_{u_{\min}(x_j)}^{u_{\max}(x_j)} (M(u, x_j) - \tilde{M}(u, x_j))^2 du = \int_{u_{\min}(x_j)}^{u_{\max}(x_j)} \phi(u, x_j) du \Rightarrow \min, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (26)$$

Мінімізація (26) по $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2, \Theta_3$ для x_1, x_2, \dots, x_n дає сукупність наборів параметрів:

$$\begin{aligned} x_{1-} & \Theta_{10}, \Theta_{11}, \Theta_{12}, \Theta_{13}; \\ x_{2-} & \Theta_{20}, \Theta_{21}, \Theta_{21}, \Theta_{23}; \\ & \dots \\ x_{n-} & \Theta_{n0}, \Theta_{n1}, \Theta_{n2}, \Theta_{nn}. \end{aligned}$$

Для опису залежності параметрів $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2$ та Θ_3 використовується апроксимація поліномами другого степеня:

$$\begin{aligned} \tilde{\Theta}_0 &= b_{00} + b_{01}x + b_{02}x^2; \\ \tilde{\Theta}_1 &= b_{10} + b_{11}x + b_{12}x^2; \\ \tilde{\Theta}_2 &= b_{20} + b_{21}x + b_{22}x^2; \\ \tilde{\Theta}_3 &= b_{30} + b_{31}x + b_{32}x^2. \end{aligned} \quad (27)$$

Отже, розв'язана задача аналітичного опису функції належності доходу залежно від ресурсу, що вкладається, для кожного елемента системи, що відповідає конкретним значенням $a_{0\min}$, c_0 , $a_{0\max}$, $a_{1\min}$, c_1 , $a_{1\max}$, що задає нечіткі функції належності вихідних параметрів задачі. При цьому параметри квадратичних моделей залежать від $a_{0\min}$, c_0 , $a_{0\max}$, $a_{1\min}$, c_1 , $a_{1\max}$.

Введемо фактори $F_1 = a_{0\min}$, $F_2 = c_0$, $F_3 = a_{0\max}$, $F_4 = a_{1\min}$, $F_5 = c_1$, $F_6 = a_{1\max}$.

Залежності властивостей b_{ik} , $i = 0, 1, 2, 3$, $k = 0, 1, 2$, від $a_{0\min}$, c_0 , $a_{0\max}$, $a_{1\min}$, c_1 , $a_{1\max}$ знаходяться для різних варіантів поліномів:

B1:

$$b_{ik} = C_{0ik} + C_{1ik}F_1 + C_{2ik}F_2 + C_{3ik}F_3 + C_{4ik}F_4 + C_{5ik}F_5 + C_{6ik}F_6;$$

B2:

$$b_{ik} = C_{0ik} + C_{1ik}F_1 + C_{2ik}F_2 + C_{3ik}F_3 + C_{4ik}F_4 + C_{5ik}F_5 + C_{6ik}F_6 + C_{7ik}F_1^2 + C_{8ik}F_2^2 + C_{9ik}F_3^2 + C_{10ik}F_4^2 + C_{11ik}F_5^2 + C_{12ik}F_6^2;$$

B3:

$$b_{ik} = C_{0ik} + C_{1ik}F_1 + C_{2ik}F_2 + C_{3ik}F_3 + C_{4ik}F_4 + C_{5ik}F_5 + C_{6ik}F_6 + C_{7ik}F_1F_2 + C_{8ik}F_1F_3 + C_{9ik}F_2F_3 + C_{10ik}F_4F_5 + C_{11ik}F_4F_6 + C_{12ik}F_5F_6;$$

B4:

$$b_{ik} = C_{0ik} + C_{1ik}F_1 + C_{2ik}F_2 + C_{3ik}F_3 + C_{4ik}F_4 + C_{5ik}F_5 + C_{6ik}F_6 + C_{7ik}F_1F_2 + C_{8ik}F_1F_3 + C_{9ik}F_1F_4 + C_{10ik}F_1F_5 + C_{11ik}F_1F_6 + C_{12ik}F_2F_3 + C_{13ik}F_2F_4 + C_{14ik}F_2F_5 + C_{15ik}F_2F_6 + C_{16ik}F_3F_4 + C_{17ik}F_3F_5 + C_{18ik}F_3F_6 + C_{19ik}F_4F_5 + C_{20ik}F_4F_6 + C_{21ik}F_5F_6. \quad (28)$$

Коректність використання кожної з моделей визначається під час перевірки адекватності.

Методика забезпечує розрахунок функції належності елемента для будь-якого набору параметрів $a_{0\min}$, c_0 , $a_{0\max}$, $a_{1\min}$, c_1 , $a_{1\max}$, що характеризують цей елемент системи.

Введемо процедуру отримання функції належності доходу елемента:

Отримання Θ_0 , Θ_1 , Θ_2 , Θ_3 при фіксованих $a_{0\min}$, c_0 , $a_{0\max}$, $a_{1\min}$, c_1 , $a_{1\max}$ і x .

Отримання $\Theta_0(x)$, $\Theta_1(x)$, $\Theta_2(x)$, $\Theta_3(x)$ при фіксованих $a_{0\min}$, c_0 , $a_{0\max}$, $a_{1\min}$, c_1 , $a_{1\max}$.

Апроксимація b_{ik} функціями, що залежать $a_{0\min}$, c_0 , $a_{0\max}$, $a_{1\min}$, c_1 , $a_{1\max}$ отримує функцію належності виграшу елемента.

Наведемо методику розрахунку функції належності нечіткого виграшу системи.

Функція належності доходу першого елемента має вигляд:

$$M_1(u) = \Theta_{10} \exp \left\{ -\frac{(u - \Theta_{11})^2}{2\Theta_{12}^2} (1 + \Theta_{13} \text{sign}(u - \Theta_{11})) \right\} = \begin{cases} \Theta_{10} \exp \left\{ -\frac{(u - \Theta_{11})^2}{2\Theta_{12}^2} (1 - \Theta_{13}) \right\}, & u \leq \Theta_{11}; \\ \Theta_{10} \exp \left\{ -\frac{(u - \Theta_{11})^2}{2\Theta_{12}^2} (1 + \Theta_{13}) \right\}, & u > \Theta_{11}. \end{cases} \quad (29)$$

$$\text{Вводиться } \Theta_{121} = \frac{\Theta_{12}}{(1 - \Theta_{13})^{\frac{1}{2}}}, \quad \Theta_{122} = \frac{\Theta_{12}}{(1 + \Theta_{13})^{\frac{1}{2}}}.$$

Тоді для першого елемента:

$$M_1(u) = \begin{cases} \Theta_{10} \exp \left\{ -\frac{(u - \Theta_{11})^2}{2\Theta_{121}^2} \right\}, & u \leq \Theta_{11}; \\ \Theta_{10} \exp \left\{ -\frac{(u - \Theta_{11})^2}{2\Theta_{122}^2} \right\}, & u > \Theta_{11}. \end{cases} \quad (30)$$

Аналогічно для другого елемента:

$$M_2(u) = \begin{cases} \Theta_{20} \exp \left\{ -\frac{(u - \Theta_{21})^2}{2\Theta_{221}^2} \right\}, & u \leq \Theta_{21}; \\ \Theta_{20} \exp \left\{ -\frac{(u - \Theta_{21})^2}{2\Theta_{222}^2} \right\}, & u > \Theta_{21}. \end{cases} \quad (31)$$

У виразах (30, 31) індекси при параметрах позначають таке: перший вказує номер елемента, другий – номер коефіцієнта, третій – номер діапазону.

Функція належності доходу системи із двох елементів $z = u_1 + u_2$ має вигляд:

$$M(z) = \int_{-\infty}^{\infty} M_1(u_1) M_2(z - u_1) du_1 = \Theta_{10} \Theta_{20} \left[\int_{-\infty}^{\Theta_{11}} \exp \left\{ -\left[\frac{(u - \Theta_{11})^2}{2\Theta_{121}^2} + \frac{(z - u - \Theta_{21})^2}{2\Theta_{221}^2} \right] \right\} du + \int_{\Theta_{11}}^{\Theta_{21}} \exp \left\{ -\left[\frac{(u - \Theta_{11})^2}{2\Theta_{122}^2} + \frac{(z - u - \Theta_{21})^2}{2\Theta_{221}^2} \right] \right\} du + \int_{\Theta_{21}}^{\infty} \exp \left\{ -\left[\frac{(u - \Theta_{11})^2}{2\Theta_{122}^2} + \frac{(z - u - \Theta_{21})^2}{2\Theta_{222}^2} \right] \right\} du \right]. \quad (32)$$

В результаті інтегрування маємо

Для інтервалу $(-\infty, \Theta_{11}]$:

$$M_{-\infty}^{\Theta_{11}}(z) = \Theta_{10}\Theta_{20} \exp\left\{-\frac{[z-(\Theta_{11}+\Theta_{21})]^2}{2(\Theta_{121}^2+\Theta_{221}^2)}\right\} \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\frac{1}{\Theta_{121}^2}+\frac{1}{\Theta_{221}^2}}}.$$

Для інтервалу $[\Theta_{11}, \Theta_{21}]$:

$$M_{\Theta_{11}}^{\Theta_{21}}(z) = \frac{\sqrt{2\pi}\Theta_{10}\Theta_{20}}{\sqrt{\frac{1}{\Theta_{122}^2}+\frac{1}{\Theta_{221}^2}}} \exp\left\{-\frac{[z-(\Theta_{11}+\Theta_{21})]^2}{2(\Theta_{122}^2+\Theta_{221}^2)}\right\}.$$

Для інтервалу (Θ_{21}, ∞) :

$$M_{\Theta_{21}}^{\infty}(z) = \frac{\sqrt{2\pi}\Theta_{10}\Theta_{20}}{\sqrt{\frac{1}{\Theta_{122}^2}+\frac{1}{\Theta_{222}^2}}} \exp\left\{-\frac{[z-(\Theta_{11}+\Theta_{21})]^2}{2(\Theta_{122}^2+\Theta_{222}^2)}\right\}.$$

Тоді

$$M(z) = \begin{cases} M_{-\infty}^{\Theta_{11}}(z), & z \in (-\infty, \Theta_{11}), \\ M_{\Theta_{11}}^{\Theta_{21}}(z), & z \in [\Theta_{11}, \Theta_{21}], \\ M_{\Theta_{21}}^{\infty}(z), & z \in (\Theta_{21}, \infty). \end{cases} \quad (33)$$

Апроксимація $M(z)$:

$$M(z) = \tilde{\Theta}_0 \exp\left\{-\frac{(z-\tilde{\Theta}_1)^2}{2\tilde{\Theta}_2^2} (1 + \tilde{\Theta}_3 \text{sign}(z-\tilde{\Theta}_1))\right\}$$

або

$$\tilde{M}(z) = \begin{cases} \tilde{\Theta}_0 \exp\left\{-\frac{(z-\tilde{\Theta}_1)^2}{2\tilde{\Theta}_2^2}\right\}, & z \leq \tilde{\Theta}_1; \\ \tilde{\Theta}_0 \exp\left\{-\frac{(z-\tilde{\Theta}_1)^2}{2\tilde{\Theta}_2^2}\right\}, & z > \tilde{\Theta}_1. \end{cases} \quad (34)$$

$$\tilde{\Theta}_0 = \frac{\sqrt{2\pi}\Theta_{10}\Theta_{20}\Theta_{12}\Theta_{22}}{\sqrt{\Theta_{12}^2+\Theta_{22}^2} \left[1 + \frac{\Theta_{22}^2\Theta_{13}-\Theta_{12}^2\Theta_{23}}{6(\Theta_{12}^2+\Theta_{22}^2)}\right]};$$

$$\tilde{\Theta}_1 = \Theta_{11} + \Theta_{21};$$

$$\tilde{\Theta}_2^2 = \frac{[(\Theta_{12}^2+\Theta_{22}^2)^2 - (\Theta_{12}^2\Theta_{23} + \Theta_{22}^2\Theta_{13})^2]}{(\Theta_{12}^2+\Theta_{22}^2) - (\Theta_{12}^2\Theta_{23}^2 + \Theta_{22}^2\Theta_{13}^2)};$$

$$\tilde{\Theta}_3 = \frac{\Theta_{12}^2\Theta_{13}(1-\Theta_{23}^2) + \Theta_{22}^2\Theta_{23}(1-\Theta_{13}^2)}{\Theta_{12}^2(1-\Theta_{23}^2) + \Theta_{22}^2(1-\Theta_{13}^2)}.$$

Для системи, що складається з трьох елементів $z' = z + u_3$, де $z = u_1 + u_2$.

Для третього елемента системи функція належності має вигляд:

$$M_3(u) = \begin{cases} \Theta_{30} \exp\left\{-\frac{(u-\Theta_{31})^2}{2\Theta_{321}^2}\right\}, & u \leq \Theta_{31}; \\ \Theta_{30} \exp\left\{-\frac{(u-\Theta_{31})^2}{2\Theta_{322}^2}\right\}, & u > \Theta_{31}. \end{cases} \quad (35)$$

Функція належності системи, що складається з трьох елементів, визначається інтегралом згортки:

$$M(z') = \int_{-\infty}^{\infty} M_3(u_3) \tilde{M}(z'-u_3) du_3 = \Theta_{30} \tilde{\Theta}_0 \left[\int_{-\infty}^{\Theta_{31}} \exp\left\{-\frac{(u-\Theta_{31})^2}{2\Theta_{321}^2}\right\} \exp\left\{-\frac{(z'-u-\tilde{\Theta}_1)^2}{2\tilde{\Theta}_2^2}\right\} du + \int_{\Theta_{31}}^{\tilde{\Theta}_1} \exp\left\{-\frac{(u-\Theta_{31})^2}{2\Theta_{322}^2}\right\} \exp\left\{-\frac{(z'-u-\tilde{\Theta}_1)^2}{2\tilde{\Theta}_2^2}\right\} du + \int_{\tilde{\Theta}_1}^{\infty} \exp\left\{-\frac{(u-\Theta_{31})^2}{2\Theta_{322}^2}\right\} \exp\left\{-\frac{(z'-u-\tilde{\Theta}_1)^2}{2\tilde{\Theta}_2^2}\right\} du \right] \quad (36)$$

Апроксимація $M'(z')$:

$$\tilde{M}'(z') = \tilde{\Theta}'_0 \exp\left\{-\frac{(z'-\tilde{\Theta}'_1)^2}{2(\tilde{\Theta}'_2)^2} (1 + \tilde{\Theta}'_3 \text{sign}(z'-\tilde{\Theta}'_1))\right\} \quad (37)$$

У співвідношенні (37):

$$\tilde{\Theta}'_1 = \Theta_{11} + \Theta_{21} + \Theta_{31};$$

$$(\tilde{\Theta}'_2)^2 = \frac{(\Theta_{32}^2 + \tilde{\Theta}_2^2)^2 - (\Theta_{32}^2\tilde{\Theta}_3 + \tilde{\Theta}_2^2\Theta_{33})^2}{(\Theta_{32}^2 + \tilde{\Theta}_2^2) - (\Theta_{32}^2\tilde{\Theta}_3^2 + \tilde{\Theta}_2^2\Theta_{33}^2)};$$

$$\tilde{\Theta}'_3 = \frac{\Theta_{32}^2\Theta_{33}(1-\tilde{\Theta}_3^2) + \tilde{\Theta}_2^2\tilde{\Theta}_3(1-\Theta_{33}^2)}{\Theta_{32}^2(1-\tilde{\Theta}_3^2) + \tilde{\Theta}_2^2(1-\Theta_{33}^2)};$$

$$\tilde{\Theta}'_0 = \frac{\sqrt{2\pi}\Theta_{30}\tilde{\Theta}_0\Theta_{32}\tilde{\Theta}_2}{\sqrt{\Theta_{32}^2 + \tilde{\Theta}_2^2} \left[1 + \frac{\tilde{\Theta}_2^2\Theta_{33} - \Theta_{32}^2\tilde{\Theta}_3}{6(\Theta_{32}^2 + \tilde{\Theta}_2^2)}\right]}.$$

Для випадку, коли система складається з n елементів:

$$\Theta_0^{(n)} = \sqrt{2\pi}\Theta_{n0}\Theta_0^{(n-1)}\Theta_{n2}\Theta_2^{(n-1)} /$$

$$\left[\sqrt{\Theta_{n2}^2 + (\Theta_2^{(n-1)})^2} \left[1 + \frac{(\Theta_2^{(n-1)})^2\Theta_{n3} - \Theta_{n2}^2\Theta_3^{(n-1)}}{6(\Theta_{n2}^2 + (\Theta_2^{(n-1)})^2)} \right] \right];$$

$$\Theta_1^{(n)} = \Theta_{11} + \Theta_{21} + \dots + \Theta_{n1};$$

$$\Theta_2^{(n)} = \frac{\left(\Theta_{n2}^2 + \left(\Theta_2^{(n-1)}\right)^2\right)^2 - \left(\Theta_{n2}^2 \Theta_3^{(n-1)} + \left(\Theta_2^{(n-1)}\right)^2 \Theta_{n3}\right)^2}{\left(\Theta_{n2}^2 + \left(\Theta_2^{(n-1)}\right)^2\right) - \left(\Theta_{n2}^2 \left(\Theta_3^{(n-1)}\right)^2 + \left(\Theta_2^{(n-1)}\right)^2 \Theta_{n3}^2\right)},$$

$$\Theta_3^{(n)} = \frac{\Theta_{n2}^2 \Theta_{n3} \left(1 - \left(\Theta_3^{(n-1)}\right)^2\right) + \left(\Theta_2^{(n-1)}\right)^2 \Theta_3^{(n-1)} \left(1 - \Theta_{n3}^2\right)}{\Theta_{n2}^2 \left(1 - \left(\Theta_3^{(n-1)}\right)^2\right) + \left(\Theta_2^{(n-1)}\right)^2 \left(1 - \Theta_{n3}^2\right)}.$$

Таким чином, отримані співвідношення задають необхідні аналітичні співвідношення для аналітичного опису цільових функцій всіх трьох задач оптимізації розподілу ресурсу. Ці задачі розв'язуються стандартними методами математичного програмування.

Подальші дослідження передбачається провести за такими напрямками: удосконалення технології використання нечіткої математики для опису невизначеності вихідних даних [9, 10]; посилення методів розв'язання багатоміноменклатурних задач розподілу ресурсів [11, 12].

Список літератури

1. Замков О. О., Толстопятенко А. В., Черемных Ю. Н. *Математические методы в экономике*. Москва: Дело и Сервис, 2001. 368 с.
2. Макконел К. Р., Брю С. Л. *Экономикс*. Москва: Республика, 2011. 1010 с.
3. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and control*. 1965. Vol. 8. P. 338–353.
4. Орловский С. А. *Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации*. Москва: Наука, 1981. 204 с.
5. Кофман А. *Введение в теорию нечетких множеств*. Москва: Радио и связь, 1982. 432 с.
6. Заде Л. А. *Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений*. Москва: Мир, 1976. 165 с.
7. Negoita C. V., Sularia M. On fuzzy mathematical programming and tolerances in planning. *ECEESR*. 1976. Vol. 1. P. 3–15.
8. Раскин Л. Г., Серая О. В. *Нечеткая математика*. Харьков: Парус, 2008. 352 с.
9. Раскин Л. Г., Кириченко И. О. *Континуальное линейное программирование*. Харьков: ВИБВ, 2005. 176 с.
10. Раскин Л. Г., Пустовойтов П. Е. Решение многоименклатурной задачи управления запасами по вероятностному критерию.

Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. № 13. С. 49–53.

11. Raskin L., Sira O. Fuzzy models of rough mathematics. *Eastern European journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol 5, no. 6. P. 53–60.
12. Raskin L., Sira O. Methods of solving fuzzy problem of mathematical programming. *Eastern European journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, no. 4. P. 23–28.

References (transliterated)

1. Zamkov O. O., Tolstopiyatenko A. V., Cheremnykh Yu. N. *Matematicheskie metody v ekonomike* [Mathematical Methods in Economics]. Moscow, Delo i Servis Publ., 2001. 368 p.
2. McConnell C R., Brue S. L. *Economics*. McGraw-Hill Education, 2006. 808 p. (Russ. ed.: Makkonel K. R., Bryu S. L. *Экономикс*. Moscow, Respublika Publ., 2011. 1010 p.).
3. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and control*. 1965, vol. 8, pp. 338–353
4. Orlovsky S. A. *Problemy prinyatiya resheniy pri nechetkoy ishodnoy informatsii* [Decision-making problems with fuzzy initial information]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 204 p.
5. Kofman A. *Vvedenie v teoriyu nechetkih mnozhestv* [Introduction to the theory of fuzzy sets]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1982. 432 p.
6. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. *Information Sciences*. 1975, vol. 8, issue 3, pp. 199–249. (Russ. ed.: Zadeh L. A. *Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy*. Moscow, Respublika Publ., 2011. 1010 p. Mir Publ., 1976. 165 p.).
7. Negoita C. V., Sularia M. On fuzzy mathematical programming and tolerances in planning. *ECEESR*. 1976, vol. 1, pp. 3–14.
8. Raskin L. G., Seraya O. V. *Nechetkaya matematika* [Fuzzy Mathematics]. Kharkov, Parus Publ., 2008. 352 p.
9. Raskin L. G., Kirichenko I. O. *Kontinualnoye lineynoye programmirovaniye* [Continuum linear programming]. Kharkov, VIVV Publ., 2005. 176 p.
10. Raskin L. G., Pustovoiitov P. E. Reshenie mnogonomenklaturnoy zadachi upravleniya zapasami po veroyatnostnomu kriteriyu [Solution of a multi-product inventory management problem by a probabilistic criterion]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI"* [Bulletin of the National tech. University "KhPI"]. Kharkov, 2002, no. 13, pp. 49–53.
11. Raskin L., Sira O. Fuzzy models of rough mathematics. *Eastern European journal of Enterprise Technologies*. 2016, vol. 5, no. 6, pp. 53–60.
12. Raskin L., Sira O. Methods of solving fuzzy problem of mathematical programming. *Eastern European journal of Enterprise Technologies*. 2016, vol. 5, no. 4, pp. 23–28.

Надійшла (received) 30.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Раскин Лев Григорович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Національний технічний університет «ХПИ», Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>; e-mail: topology@ukr.net;

Сухомлин Лариса Вадимівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9511-5932>; e-mail: lar.sukhomlyn@gmail.com.

Lev Raskin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: topology@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

Larysa Sukhomlyn – Candidate of Technical Sciences (PhD), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Management, Kremenchuk Mikhail Ostrogradskiy National University, Kremenchuk, Ukraine; e-mail: lar.sukhomlyn@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9511-5932>.

УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 62-52

DOI: 10.20998/2079-0023.2022.01.03

*О. С. КУЦЕНКО, М. І. БЕЗМЕНОВ***ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ У СЕРЕДОВИЩІ ПОЛІНОМІАЛЬНИХ СИГНАЛІВ**

Запропоновано метод структурної та параметричної ідентифікації одновимірних лінійних стаціонарних динамічних систем, поданих диференціальними рівняннями зв'язку «вхід–вихід». Метод орієнтований як на активний, так і на пасивний експерименти. В основу методу покладено поліноміальне подання вхідного та вихідного сигналів динамічної системи, що ідентифікується. Запропоновано компактне векторно-матричне подання для поліномів, що дозволило знаходити вимушену складову розв'язку лінійних диференціальних рівнянь як результат виконання простих лінійних алгебраїчних операцій. Векторно-матричне подання поліномів дозволило досить просто розв'язати задачу обернення лінійних динамічних систем та задачу компенсації виміряного збурення. Питання подання часових сигналів у поліноміальній формі у цій роботі не розглядаються. Виходячи з отриманого лінійного подання одновимірної динамічної системи, що зв'язує між собою параметри вхідного та вихідного сигналів з параметрами диференціального рівняння математичної моделі динамічної системи, що ідентифікується, отримана лінійна система алгебраїчних рівнянь щодо невідомих коефіцієнтів диференціального рівняння процесу. У загальному випадку отримана система відноситься до класу перевизначених систем, у зв'язку з чим її розв'язок може бути отриманий методом найменших квадратів і зводиться до знаходження псевдооборотної матриці. Запропоновано структурну схему програмного забезпечення для розв'язання задачі структурної та параметричної ідентифікації в середовищі поліноміальних сигналів. Алгоритм включає процедуру порівняння результатів чисельного моделювання ідентифікованої моделі з вихідним експериментальним сигналом та корекцію структури моделі за результатами порівняння.

Ключові слова: параметрична ідентифікація, лінійна динамічна система, поліноміальний сигнал, векторно-матричне подання полінома, лінійна система рівнянь.

*О. С. KUTSENKO, M. I. BEZMENOV***IDENTIFICATION OF LINEAR DYNAMIC SYSTEMS IN THE ENVIRONMENT OF POLYNOMIAL SIGNALS**

A method for the structural and parametric identification of one-dimensional linear stationary dynamic systems, represented by differential "input-output" constraint equations, is proposed. The method is focused on both active and passive experiments. The method is based on a polynomial representation of the input and output signals of the identified dynamic system. A compact vector-matrix representation of polynomials is proposed, which makes it possible to find the forced component of the solution of linear differential equations as a result of performing simple linear algebraic operations. The vector-matrix representation of polynomials made it possible to quite simply solve the problem of inversion of linear dynamical systems and the problem of compensating the measured perturbation. The issues of representing time signals in polynomial form are not considered in this paper. Based on the obtained linear representation of a one-dimensional dynamic system, which links the parameters of the input and output signals with the parameters of the differential equation of the identified dynamic system mathematical model, a linear system of algebraic equations for unknown coefficients of the differential process equation is obtained. In the general case, the resulting system belongs to the class of overdetermined systems, and therefore its solution can be obtained by the least-square technique and is reduced to finding a pseudoinverse matrix. A block diagram of software for solving the problem of structural and parametric identification in the environment of polynomial signals is proposed. The algorithm includes the procedure of comparing the results of numerical simulation of the identified model with the output experimental signal and correcting the structure of the model based on the results of the comparison.

Keywords: parametric identification, linear dynamical system, polynomial signal, vector-matrix representation of a polynomial, linear system of equations.

Вступ. Сучасний етап розвитку теорії і практики систем автоматичного керування найтісніше зв'язаний з наявністю адекватної математичної моделі об'єкта керування, отриманої на основі реальних даних. Як правило, апріорна інформація про структуру і параметри математичної моделі або обмежена, або відсутня повністю. Значимість ідентифікації в теорії керування привела до інтенсивного розвитку і зростанню кількості досліджень і публікацій у цій галузі. У зв'язку із цим проблема ідентифікації оформилася

як самостійний науковий напрямок у рамках загальної теорії управління динамічними системами.

Ефективному розвитку теорії і практики ідентифікації у значній ступені сприяв інтенсивний розвиток обчислювальної техніки, що дозволило залучити широкий клас методів прикладної математики і насамперед методів обчислень. Різноманітність відомих методів ідентифікації призводить до неоднозначності результатів, одержуваних різними методами, а будь-яке ускладнення методів та алгоритмів зумовлює

© О. С. Куценко, М. І. Безменов, 2022

зниження надійності одержуваних результатів через природне збільшення кількості можливих помилок, що виникають у реалізації складних алгоритмів.

У даній статті пропонується простий метод розв'язання задачі структурної і параметричної ідентифікації одновимірних лінійних динамічних систем у середовищі поліноміальних сигналів на вході і на виході.

Огляд і аналіз джерел інформації. Ідентифікація є обов'язковим компонентом у процесі розробки і створення систем керування технічними системами. Її фундаментальні методи і алгоритми викладені у працях П. Ейкхоффа [1], Е. Сейджа і Дж. Мелса [2], А. Дейча [3] і Л. Льюнга [4], які на цей час вже стали класичними. У них викладено з різним ступенем деталізації і глибини наукових досліджень переважно більшість існуючих на момент їх написання та перспективних підходів до вирішення проблеми ідентифікації динамічних систем. Сучасний підхід до проблеми ідентифікації [5–7] характеризується створенням наукомістких методологій розв'язання складних практичних задач, що містять моделі процесів, які важко формалізуються. Ключову роль при цьому грає інформаційна підтримка. Особливо це відноситься до структурної ідентифікації [8]. Вважається, що універсальна методологія структурної ідентифікації відсутня, а основні дослідження у цьому напрямі сфокусовані на розробці алгоритмів генерування і перебору різних допустимих структур, параметричної ідентифікації кожної структури і прийнятті рішень стосовно вибору і оцінювання найкращої структури з можливих. Такий підхід вимагає використання високоефективних обчислювальних методів параметричної ідентифікації кожної структури з допустимою їх множини. Вдалий приклад універсального програмного комплексу для ефективного розв'язання задач параметричної ідентифікації у рамках розв'язання задачі структурної ідентифікації наведено в роботі [9].

Ідентифікація об'єкта керування шляхом постановки активного експерименту вимагає втручання в роботу системи автоматичного керування. Існують об'єкти, для яких з тих чи інших причин неможливо згенерувати потрібні випробувальні дії. У роботі [10] наведено результати досліджень з ідентифікації керованого об'єкта на основі апроксимації його поведінки нейромережевою моделлю. Навчена нейромережева модель емулює поведінку системи і дозволяє отримати її відгук, у тому числі на гармонічні випробувальні впливи. По отриманій частотній характеристиці отримуються значення параметрів математичної моделі.

Аналіз джерел інформації дозволяє зробити такий висновок: більшість методів параметричної ідентифікації базується на активному принципі при тестуючому гармонійному або ступінчастому впливах. На підставі отриманих частотних або перехідних характеристик для деякої фіксованої структури знаходяться конкретні параметри моделі системи, що ідентифікується, відповідно до максимальної близькості характеристик моделі і реального процесу. У випадку пасивних експериментів розв'язання задачі парамет-

ричної ідентифікації так чи інакше зв'язано з процедурою диференціювання вхідних і вихідних сигналів [3], заданих на скінченній множині точок відліку.

Метою цієї статті є обґрунтування відносно простого методу розв'язання задачі параметричної ідентифікації одновимірних лінійних динамічних систем у класі поліноміальних апроксимацій вхідних і вихідних сигналів.

Векторно-матричне подання поліномів. Для спрощення процесів дослідження проходження поліноміальних сигналів через динамічні системи розглянемо компактне подання поліномів методами матричної алгебри [11].

Нехай векторний поліном $p(t)$ ступіня l має такий вигляд:

$$p^T(t) = p_0^T + p_1^T t + p_2^T \frac{t^2}{2} + \dots + p_l^T \frac{t^l}{l!}, \quad (1)$$

де p_0, p_1, \dots, p_l – N -вимірні вектори, T – операція транспонування.

Тоді подання (1) можна формально представити як

$$p^T(t) = TP, \quad (2)$$

де $T = (1, t, \frac{t^2}{2}, \dots, \frac{t^l}{l!})$ – $(l+1)$ -вимірний вектор-рядок,

а P – матриця порядку $(l+1) \times N$, що має такий вигляд:

$$P = (p_0, p_1, p_2, \dots, p_l)^T. \quad (3)$$

У випадку скалярного полінома матриці (3) відповідає вектор-стовпець P , складений з його коефіцієнтів.

Розглянемо деякі елементарні операції з поліномами і їх аналогами у векторно-матричній формі:

- додавання: $p_1(t) + p_2(t) = T(P_1 + P_2)$;
- множення на число: $\alpha p(t) = T(\alpha P)$;
- диференціювання:

$$\frac{dp^T(t)}{dt} = T\Lambda P, \quad (4)$$

де елементи λ_{ij} квадратної матриці Λ порядку $(l+1)$ мають вигляд $\lambda_{ij} = \delta_{i+1,j}$, де δ_{sk} – символ Кронекера.

Згідно з (4) k -та похідна полінома представима в такому вигляді:

$$\frac{d^k p^T(t)}{dt^k} = T\Lambda^k P, \quad (5)$$

де Λ^k можна обчислити за формулою

$$(\Lambda^k)_{ij} = \delta_{i+k,j}, \quad i, j = \overline{1, l+1}.$$

Подання одновимірних лінійних динамічних систем у середовищі поліноміальних сигналів. Нехай скалярна лінійна стаціонарна динамічна система описується таким диференціальним рівнянням зв'язку «вхід-вихід»:

$$a_0 y^{(p)} + a_1 y^{(p-1)} + \dots + a_p y = b_0 u^{(q)} + b_1 u^{(q-1)} + \dots + b_q u, \quad (6)$$

де $u(t)$ і $y(t)$ – вхідний і вихідний сигнали відповідно, p і q ($p \geq q$) – максимальні порядки похідних, $a_0, a_1, \dots, a_p, b_0, b_1, \dots, b_q$ – постійні коефіцієнти.

Неважко показати, що у випадку вхідного впливу у вигляді полінома степеня l

$$u(t) = u_0 + u_1 t + \dots + u_l \frac{t^l}{l!}. \quad (7)$$

вимушена складова розв'язку диференціального рівняння (6) також може бути подана поліномом степеня l

$$y(t) = y_0 + y_1 t + \dots + y_l \frac{t^l}{l!}. \quad (8)$$

У подальшому будемо розглядати тільки асимптотично стійкі системи (6) на часових інтервалах, що відповідають практично повному затуханню перехідних процесів, обумовлених ненульовими початковими умовами рівняння (6).

Подамо поліноми (7) і (8) у векторній формі:

$$\begin{aligned} (t) &= \mathbf{T} \mathbf{U}, \\ y(t) &= \mathbf{T} \mathbf{Y}, \end{aligned} \quad (9)$$

де $\mathbf{U} = (u_0, u_1, \dots, u_l)^T$, $\mathbf{Y} = (y_0, y_1, \dots, y_l)^T$.

Після підстановки (9) у (6) з урахуванням правил диференціювання поліномів (4), (5) отримуємо:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}(a_0 \Lambda^p \mathbf{Y} + a_1 \Lambda^{p-1} \mathbf{Y} + \dots + a_p \mathbf{Y}) &= \\ = \mathbf{T}(b_0 \Lambda^q \mathbf{U} + b_1 \Lambda^{q-1} \mathbf{U} + \dots + b_q \mathbf{U}). \end{aligned}$$

Виконавши «скорочення» на \mathbf{T} , що відповідає прівнюванню коефіцієнтів при однакових степенях t , отримуємо остаточно:

$$\begin{aligned} (a_0 \Lambda^p + a_1 \Lambda^{p-1} + \dots + a_p \mathbf{E}) \mathbf{Y} &= \\ = (b_0 \Lambda^p + b_1 \Lambda^{p-1} + \dots + b_q \mathbf{E}) \mathbf{U}. \end{aligned} \quad (10)$$

Вводячи відповідні позначення, співвідношення (10) запишемо у вигляді

$$\mathbf{A} \mathbf{Y} = \mathbf{B} \mathbf{U}, \quad (11)$$

де \mathbf{A} і \mathbf{B} – квадратні матриці порядку $(l+1)$, коефіцієнти яких формуються відповідно до таких правил:

$$\begin{aligned} \{\mathbf{A}\}_{ij} &= \begin{cases} 0, & \text{якщо } i+p < j \vee i > j, \\ a_{i-j+p}, & \text{якщо } i+p \geq j \wedge i \leq j, \end{cases} \\ \{\mathbf{B}\}_{ij} &= \begin{cases} 0, & \text{якщо } i+q < j \vee i > j, \\ b_{i-j+q}, & \text{якщо } i+q \geq j \wedge i \leq j, \end{cases} \end{aligned}$$

де $i, j = \overline{1, l+1}$.

З структури матриць \mathbf{A} і \mathbf{B} випливає, що вони є верхніми трикутними з діагональними елементами

$a_{ii} = a_p$ і $b_{ii} = b_q$ ($i = \overline{1, l+1}$) відповідно, які відмінні від нуля через припущення про стійкість вихідної динамічної системи. Таким чином, матриці \mathbf{A} і \mathbf{B} не вироджені, а система (11) завжди має єдиний розв'язок як відносно \mathbf{Y} при заданому \mathbf{U} (пряма задача), так і відносно \mathbf{U} при заданому \mathbf{Y} (зворотна задача). Завдяки трикутній структурі матриць \mathbf{A} і \mathbf{B} розв'язок системи (11) легко знаходиться послідовним розв'язанням одновимірних лінійних рівнянь, починаючи з останнього.

Ідентифікація коефіцієнтів динамічної системи. Будемо припускати, що вектори коефіцієнтів $\mathbf{U} = (u_0, u_1, \dots, u_l)^T$ поліномів на вході (7) і $\mathbf{Y} = (y_0, y_1, \dots, y_l)^T$ на її виході (8) нам відомі з досить високим ступенем достовірності. Поставимо задачу знаходження векторів коефіцієнтів $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_p)^T$ і $\mathbf{b} = (b_0, b_1, \dots, b_q)^T$ у припущенні, що порядки p і q вищих похідних у (1) також відомі. Якщо апріорні дані по величинам p і q відсутні, то в такому випадку необхідно багаторазово розв'язати задачу ідентифікації для множини можливих пар p і q та оцінити вірогідність результатів ідентифікації шляхом прямого моделювання експериментальних процесів чисельним інтегруванням диференціального рівняння (1).

Для розв'язання поставленої задачі перепишемо основне рівняння перетворення поліноміальних сигналів динамічної системи (10) у такому вигляді:

$$\begin{aligned} a_0 \Lambda^p \mathbf{Y} + a_1 \Lambda^{p-1} \mathbf{Y} + \dots + a_p \mathbf{Y} &= \\ = b_0 \Lambda^q \mathbf{U} + b_1 \Lambda^{q-1} \mathbf{U} + \dots + b_q \mathbf{U}. \end{aligned} \quad (12)$$

Уведемо позначення:

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_k &= \Lambda^k \mathbf{Y}, \quad k = \overline{0, p}, \\ \mathbf{U}_j &= \Lambda^j \mathbf{U}, \quad j = \overline{0, q}. \end{aligned} \quad (13)$$

Тоді рівняння (12) прийме такий вигляд:

$$\overline{\mathbf{Y}} \mathbf{a} = \overline{\mathbf{U}} \mathbf{b}, \quad (14)$$

де $\overline{\mathbf{Y}} = (\mathbf{Y}_p, \mathbf{Y}_{p-1}, \dots, \mathbf{Y})$ і $\overline{\mathbf{U}} = (\mathbf{U}_q, \mathbf{U}_{q-1}, \dots, \mathbf{U})$ – матриці розмірності $(l+1) \times (p+1)$ і $(l+1) \times (q+1)$ відповідно.

Якщо $l \geq p$, то

$$\begin{aligned} \{\overline{\mathbf{Y}}\}_{ij} &= \begin{cases} 0, & \text{якщо } i > j + (l-p), \\ y_{i-j+p}, & \text{якщо } i \leq j + (l-p), \\ j = \overline{1, p+1}, i = \overline{1, l+1}; \end{cases} \\ \{\overline{\mathbf{U}}\}_{ij} &= \begin{cases} 0, & \text{якщо } i > j + (l-q), \\ u_{i-j+q}, & \text{якщо } i \leq j + (l-q), \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

Таким чином, розв'язання задачі ідентифікації зводиться до розв'язання однорідної лінійної системи (14), яку можна подати в загальноприйнятому вигляді:

$$\begin{pmatrix} \bar{Y} \\ \vdots \\ -\bar{U} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \mathbf{0}. \quad (16)$$

Матриця системи (16) має розмірність $(l+1) \times (p+q+2)$.

Розглянемо випадок, коли $l+1 > p+q+2$, тобто коли кількість рівнянь у (16) більша за кількість невідомих. Тоді, фіксуємо один з коефіцієнтів векторів \mathbf{a} або \mathbf{b} дорівнюючим 1, що відповідає діленню всіх коефіцієнтів рівняння (1) на вибраний коефіцієнт, отримуємо лінійну неоднорідну систему вигляду

$$\mathbf{F}\mathbf{x} = \mathbf{C}, \quad (17)$$

де матриця \mathbf{F} являє собою підматрицю матриці $\begin{pmatrix} \bar{Y} \\ \vdots \\ -\bar{U} \end{pmatrix}$, з якої один зі стовпців перенесений у праву частину лінійної системи (16) зі зворотним знаком і є вектором \mathbf{C} правої частини системи (17). Отримана система (17) наближено розв'язується методом псевдообернення [12]:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{F}^T \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{C}. \quad (18)$$

Програмне забезпечення. Структурна схема програмного забезпечення запропонованого методу ідентифікації наведена на рис. 1. Відповідно до структурної схеми за результатами активного або пасивного експерименту деяким відомим методом виконується поліноміальна апроксимація вхідного і вихідного сигналів. Потім для деякого початкового наближення структурних параметрів p і q будуємо матриці \bar{Y} і \bar{U} згідно із формулами (15).

На наступному кроці розв'язуємо систему лінійних рівнянь для визначення векторів коефіцієнтів \mathbf{a} і \mathbf{b} диференціального рівняння математичної моделі об'єкта. Якщо задана точність не задовольняється, то у такому випадку виконуємо коригування степеня апроксимуючих поліномів. У протилежному випадку інтегруємо диференціальне рівняння системи з отриманими параметрами \mathbf{a} , \mathbf{b} і експериментальним вхідним впливом $u(t)$. Отриману вихідну функцію $y^*(t)$ порівнюємо з експериментальною функцією $y(t)$. У випадку виконання умови близькості $y^*(t)$ і $y(t)$ вважаємо задачу ідентифікації розв'язаною. Якщо умова близькості не виконана, то змінюємо структуру системи шляхом назначення нової пари параметрів (p, q) . Якщо для жодної пари (p, q) з заданої множини умова близькості не виконується, то як результат вибираємо пару (p, q) , для якої функції $y^*(t)$ і $y(t)$ є максимально близькими.

Висновки. Запропонований метод ідентифікації лінійних динамічних систем на основі поліноміального подання сигналів дозволяє реалізувати як активний, так і пасивний підхід до розв'язання задачі параметричної ідентифікації. У зв'язку із простотою обчислювальних процедур метод придатний як складова при структурній ідентифікації лінійних систем.

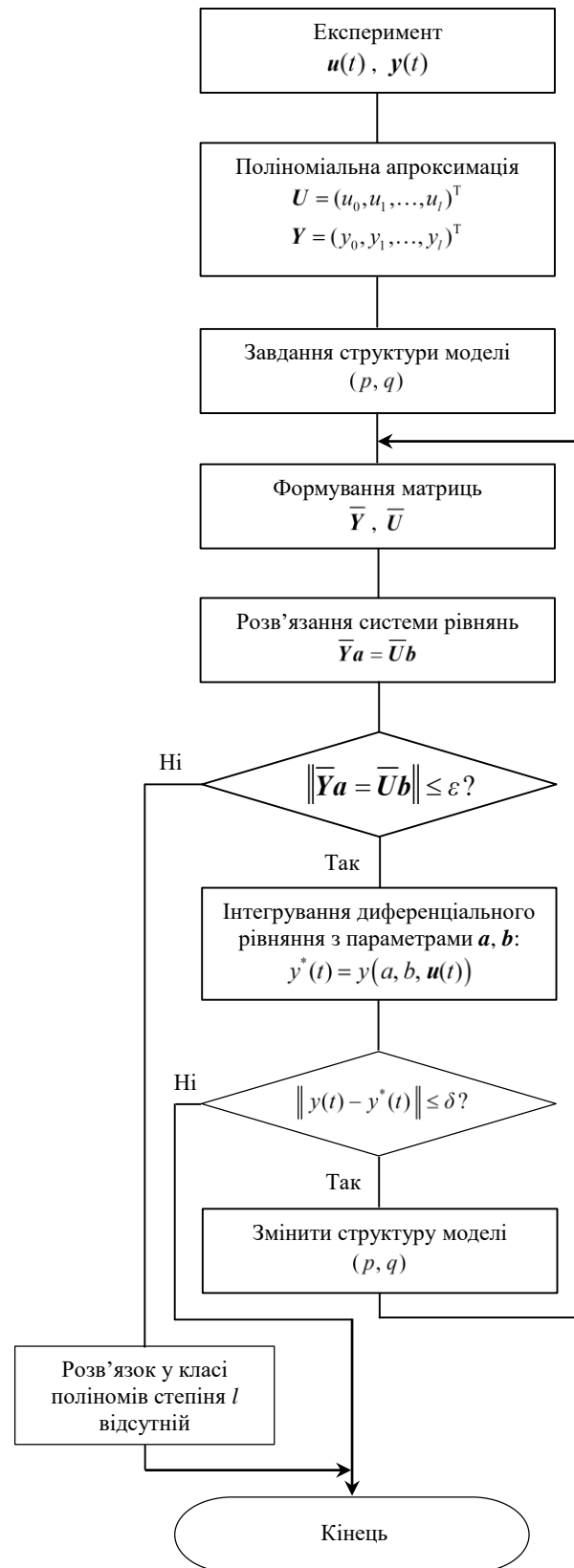


Рис. 1. Структурна схема програмного забезпечення

Список літератури

1. Эйкхофф П. *Основы идентификации систем управления*. Москва: Мир, 1975. 686 с.
2. Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л. *Идентификация систем управления*. Москва: Наука, 1974. 248 с.
3. Дейч А. М. *Методы идентификации динамических объектов*. Москва: Энергия, 1979. 240 с.
4. Льюнг Л. *Идентификация систем: Теория для пользователя*. Москва: Наука, 1991. 431 с.
5. *Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2.* / ред. Н. Д. Егупов, К. А. Пупков. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 640 с.
6. Васильев С. Н. Теория и применение логико-управляемых систем. *Труды 2-й Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'03). 29–31 января 2003 г.* Москва: ИПУ РАН 2003. С. 23–52.
7. Авдеенко Т. В., Каргин С. А. О глобальной идентифицируемости динамических моделей. *Труды 2-й Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'03). 29–31 января 2003 г.* Москва: ИПУ РАН 2003. С. 155–214.
8. Затуливетер Ю. С. Компьютерная информация в модели исчисления древовидных структур. *Труды 2-й Междунар. конф. «Идентификация систем и задачи управления» (SICPRO'03). 29–31 января 2003 г.* Москва: ИПУ РАН 2003. С. 1935–1949.
9. Петрович В. Н. Идентификация параметров математических моделей динамических систем управления. *Искусственный интеллект*. 2011. № 4. С. 343–349.
10. Шумихин А. Г., Бояршинова А. С. Алгоритм выбора структурных параметров искусственной нейронной сети и объема обучающей выборки при аппроксимации поведения динамического объекта. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2015. Т. 7, № 2. С. 243–251.
11. Kutsenko A., Kovalenko S., Tovazhnyansky V. Inversion of dynamic systems for certain classes of signals. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2353. P. 391–401.
12. Гантмахер Ф. Р. *Теория матриц*. Москва: Физматлит, 2010. 558 с.
4. Ljung L. *System Identification: Theory For the User*. 2nd ed. PTR Prentice Hall, Upper Saddle River, 1999. 609 p. (Rus. ed.: Ljung L. *Identifikatsiya sistem: Teoriya dlya polzovatelya*. Moscow, Nauka Publ., 1991. 431 p.).
5. Yegupov N. D., Pupkov K. A., ed. *Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya. Metodi klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. T. 2* [Statistical dynamics and identification of automatic control systems. Methods of classical and modern theory of automatic control. Vol. 2]. Moscow, MG TU im. N. E. Bauman Publ., 2004. 640 p.
6. Vasilev S. N. Teoriya i primenenie logiko-upravlyaemikh sistem [Theory and application of logic-controlled systems]. *Trudi 2-j Mezhdunar. konf. "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya" (SICPRO'03). 29–31 yanvarya 2003 g.* [Proceedings of the 2nd Intern. conf. "Identification of systems and control tasks" (SICPRO'03). January 29–31, 2003]. Moscow, IPU RAN Publ., 2003, pp. 23–52.
7. Avdeenko T. V., Kargin S. A. O globalnoi identifiatsii dinamichestikh modelei [On the global identifiability of dynamical models]. *Trudi 2-j Mezhdunar. konf. "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya" (SICPRO'03). 29–31 yanvarya 2003 g.* [Proceedings of the 2nd Intern. conf. "Identification of systems and control tasks" (SICPRO'03). January 29–31, 2003]. Moscow, IPU RAN Publ., 2003, pp. 155–214.
8. Zatuliveter Yu. S. Kompyuternaya informatsiya v modeli ischisleniya drevovidnykh struktur [Computer information in the model of calculus of tree structures]. *Trudi 2-j Mezhdunar. konf. "Identifikatsiya sistem i zadachi upravleniya" (SICPRO'03). 29–31 yanvarya 2003 g.* [Proceedings of the 2nd Intern. conf. "Identification of systems and control tasks" (SICPRO'03). January 29–31, 2003]. Moscow, IPU RAN Publ., 2003, pp. 1935–1949.
9. Petrovich V. N. *Identifikatsiya parametrov matematicheskikh modelei dinamichestikh sistem upravleniya* [Identification of parameters of mathematical models of dynamic control systems]. *Iskusstvennii intellekt* [Artificial intelligence]. 2011, no. 4, pp. 343–349.
10. Shumikhin A. G., Boyarshinova A. S. Algoritm vibora strukturnykh parametrov iskusstvennoi neironnoi seti i obema obuchayushechi viborki pri approksimatsii povedeniya dinamichestkogo obekta [Algorithm for choosing the structural parameters of an artificial neural network and the size of the training sample when approximating the behavior of a dynamic object]. *Kompyuternie issledovaniya i modelirovaniye* [Computer research and modeling]. 2015, vol. 7, no. 2, pp. 243–251.
11. Kutsenko A., Kovalenko S., Tovazhnyansky V. Inversion of dynamic systems for certain classes of signals. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019, vol. 2353, pp. 391–401.
12. Gantmakher F. R. *Teoriya matrits* [Matrix theory]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 558 p.

References (transliterated)

1. Eykhoff P. *System Identification: Parameter and State Estimation*. New York, John Wiley & Sons, 1974. 555 p. (Rus. ed.: Eykhoff P. *Osnovi identifikatsii sistem upravleniya*. Moscow, Mir Publ., 1975. 686 p.).
2. Sage A. P., Melsa J. L. *System Identification*. New York, Academic Press, 1971. 221 p. (Rus. ed.: Seidzh E. P., Melsa Dzh. L. *Identifikatsiya sistem upravleniya*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 248 p.).
3. Deich A. M. *Metodi identifikatsii dinamichestikh obektov* [Methods for identifying dynamic objects]. Moscow, Energiya Publ., 1979. 240 p.

Надійшла (received) 24.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Кущенко Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7964-1286; e-mail: Oleksandr.Kutsenko@khi.edu.ua

Безменов Микола Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2995-2350>; e-mail: Mykola.Bezmenov@khi.edu.ua

Kutsenko Oleksandr Serhiyovych – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: Oleksandr.Kutsenko@khi.edu.ua

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

О. М. НИКУЛІНА, В. П. СЕВЕРИН, А. І. БУБНОВ, О. М. КОНДРАТОВ

РОЗРОБКА НЕЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЕС ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ

Парогенератори сучасних енергоблоків атомних електричних станцій є критичними елементами енергоблоків та підлягають модернізації. Ідентифікація моделі парогенератора для оптимізації керування парогенератором є актуальним завданням. Мета даної статті полягає у розробці нелінійної математичної моделі парогенератора у відносних змінних для її використання в інформаційній технології оптимізації управління. Наведено математичні моделі процесів теплопередачі та пароутворення у парогенераторі у вигляді систем диференціальних рівнянь у відносних змінних. Ці моделі призначені для імітаційного моделювання теплових процесів у парогенераторі. Теплові процеси пов'язані з підведенням до парогенератора живильної води від системи водної підготовки та теплоносія від ядерного реактора, а також з відведенням пари з парогенератора до головного парового колектору. За законом збереження кількості руху робочого середовища у циркуляційному контурі парогенератора під дзеркалом випаровування отримано нелінійне диференціальне рівняння процесу циркуляції пароводяної суміші. Розроблено нелінійне диференціальне рівняння для обчислення похідної витрати пари через дзеркало випаровування у відносних змінних. Рівняння допоміжного обладнання – головного парового колектору, приводу клапана парової турбіни та виконавчого механізму регулюючого живильного клапана приведено до відносних змінних. З використанням рівнянь теплопередачі, пароутворення, циркуляції та допоміжного обладнання побудовано нелінійну модель парогенератора у просторі станів як об'єкта управління у відносних змінних. Наведено формули для обчислення значень постійних параметрів моделі парогенератора за значеннями конструктивних і технологічних параметрів. Розроблено програму для нелінійної математичної моделі парогенератора ПГВ-1000, яка включена в модуль моделей парогенераторів інформаційної технології. Це дозволить вирішити завдання ідентифікації та оптимізації інформаційної керуючої системи рівня води у парогенераторі ПГВ-1000 енергоблоку з ядерним реактором ВВЕР-1000.

Ключові слова: математична модель, парогенератор, атомна електрична станція, диференціальні рівняння, оптимізація, управління, інформаційна технологія.

O. M. NIKULINA, V. P. SEVERYN, A. I. BUBNOV, O. M. KONDRATOV

DEVELOPMENT OF NONLINEAR MODEL OF NPP STEAM GENERATOR FOR INFORMATION TECHNOLOGY OF CONTROL OPTIMIZATION

Steam generators of modern power units of nuclear power plants are critical elements of power units and are subject to modernization. Identification of the steam generator model for optimizing the control of the steam generator is an urgent task. The purpose of this article is to develop a nonlinear mathematical model of a steam generator in relative variables for its use in information technology for optimizing control. Mathematical models of heat transfer and steam formation processes in a steam generator are presented in the form of systems of differential equations in relative variables. These models are intended for simulation modeling of thermal processes in a steam generator. Thermal processes are associated with the supply of feed water to the steam generator from the water treatment system and coolant from the nuclear reactor, as well as with the removal of steam from the steam generator to the main steam collector. According to the law of conservation of the momentum of the working medium in the circulation circuit of the steam generator under the evaporation mirror, a nonlinear differential equation for the process of circulation of the steam-water mixture is obtained. A nonlinear differential equation has been developed to calculate the derivative of the steam flow through the evaporation mirror in relative variables. The equations for the auxiliary equipment – the main steam header, the steam turbine valve actuator and the control feed valve actuator – are reduced to relative variables. Using the equations of heat transfer, steam formation, circulation and auxiliary equipment, a nonlinear model of the steam generator in the state space as a control object in relative variables is constructed. Formulas are given for calculating the values of the constant parameters of the steam generator model from the values of its design and technological parameters. A program for a nonlinear mathematical model of the PGV-1000 steam generator has been developed, which is included in the information technology steam generator model module. This will make it possible to solve the problems of identifying and optimizing the information control system of the water level in the steam generator PGV-1000 of the power unit with a nuclear reactor VVER-1000.

Keywords: mathematical model, steam generator, nuclear power plant, differential equations, optimization, control, information technology.

Вступ. Для підвищення безпеки атомних електричних станцій (АЕС) України необхідна модернізація систем управління [1]. Розвиток сучасних математичних методів та передових інформаційних технологій дає можливість підвищити точність моделювання процесів управління. Парогенератори АЕС є складними теплотехнічними об'єктами і функціонують при високих температурах та тиску робочого середовища. Тому дослідження, присвячені удосконаленню моделей парогенераторів, є актуальними.

Аналіз літератури. Система управління парогенератором є критично важливою для безпеки АЕС [2]. Моделювання парогенератора враховує теплові, гідравлічні, парові та механічні процеси [3, 4]. Отримані передатні функції ділянки живлення парогенератора ПГВ-1000 [5]. Для управління парогенератором виконане імітаційне моделювання за системою диференціальних рівнянь [6], використана стохастична апро-

ксимація [7], проведена оптимізація параметрів [8–10], розроблені математичні моделі теплових процесів у відносних змінних [11]. Запропонована інформаційна технологія моделювання та оптимізації складних динамічних систем [12]. У роботах з моделювання парогенераторів використані лінійні моделі в абсолютних змінних з великою кількістю розмірних параметрів, які є погано обумовленими. Усе це обґрунтовує доцільність розробки нелінійної математичної моделі парогенератора у відносних змінних.

Мета та задачі дослідження. Мета статті полягає в розробці нелінійної математичної моделі парогенератора у відносних змінних для її використання в інформаційній технології оптимізації управління. Для досягнення мети поставлено задачі.

1. Розглянути моделі теплових процесів парогенератора з відносними змінними.

2. Вивести рівняння витрати пари через дзеркало

© О. М. Нікуліна, В. П. Северин, А. І. Бубнов, О. М. Кондратов, 2022

випаровування у відносних змінних.

3. Розробити моделі допоміжного обладнання енергоблоку для управління парогенератором.

4. Розробити модель парогенератора як об'єкта управління у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь з відносними змінними.

Моделі теплових процесів. Модель теплопередачі від теплоносія до живильної води, що подаються в парогенератор (ПГ), у відносних змінних є системою диференціальних рівнянь (СДР) другого порядку [11]:

$$\begin{cases} d\theta_t/d\tau = b_{tq}q - a_{tm}(\theta_t - \theta_m), \\ d\theta_m/d\tau = a_{mt}(\theta_t - \theta_m) - a_{mw}(\theta_m - \theta_w), \end{cases} \quad (1)$$

де $\theta_t, \theta_m, \theta_w$ – середні температури води в ПГ, теплоносія і металу трубок теплообміну;

τ – змінна часу;

$b_{tq}, a_{tm}, a_{mt}, a_{mw}$ – постійні параметри рівнянь;

q – теплова потужність теплоносія.

Вхідною величиною є теплова потужність теплоносія, вихідною – середня температура води в ПГ та теплова потужність, передана від трубок теплообміну до живильної води,

$$q_m = a_{qm}(\theta_m - \theta_w), \quad (2)$$

де a_{qm} – постійний параметр рівняння.

З рівнянь матеріального і теплового балансів робочого середовища в парогенераторі отримана модель пароутворення у відносних змінних [11]:

$$\begin{cases} \pi_{pt} = \frac{b_{pw}g_w + b_{ps}g_s + q_m}{a_{pw}\xi_w + a_{ps}\xi_s}, \quad \frac{d\pi_p}{d\tau} = \pi_{pt}, \\ g_g = b_{gq}q_m - (a_{gw}\xi_w + a_{gs}\xi_s)\pi_{pt} - b_{gg}g_w, \\ d\xi_w/d\tau = b_{wg}(g_w - g_g) - a_{wp}\xi_w\pi_{pt}, \\ d\xi_s/d\tau = b_{sg}(g_g - g_s) - a_{sp}\xi_s\pi_{pt}, \\ d\xi_c/d\tau = (c_c - a_{cc}\xi_c)\pi_{pt} + b_{cg}(g_s - g_a), \end{cases} \quad (3)$$

де π_{pt} – швидкість зміни тиску пароводяної суміші в ПГ;

$b_{pw}, b_{ps}, a_{pw}, a_{ps}$ – постійні параметри рівняння швидкості зміни тиску пароводяної суміші в ПГ;

g_w і g_s – витрати живильної води і пари;

ξ_w і ξ_s – об'єми води і пари в ПГ;

π_p – тиск пароводяної суміші в ПГ;

g_g – допоміжна змінна рівнянь швидкостей зміни об'ємів води і пари в ПГ;

$b_{gq}, a_{gw}, a_{gs}, b_{gg}$ – постійні параметри рівняння допоміжної змінної;

$b_{wg}, a_{wp}, b_{sg}, a_{sp}$ – постійні параметри рівнянь швидкостей зміни об'ємів води і пари в ПГ;

ξ_c – рівень води в ПГ;

c_c, a_{cc}, b_{cg} – постійні параметри рівняння швидкості зміни рівня води в ПГ;

g_a – витрата пари через дзеркало випаровування (ДВ).

Цій СДР відповідають початкові умови номінального режиму:

$$\pi_p(0) = 1, \xi_w(0) = 1, \xi_s(0) = 1, \xi_c(0) = 0.$$

Рівняння (1)–(3) і визначають модель теплових процесів в ПГ.

Моделювання процесу циркуляції. В систему диференціальних рівнянь (3) входить відносна змінна стану g_a , що відповідає витраті пари G_a через ДВ. Для її визначення розглянуто процес циркуляції пароводяної суміші під дзеркалом випаровування. При моделюванні циркуляції пароводяної суміші припущено, що швидкість зміни тиску у всіх точках циркуляційного контуру парогенератора практично однакова та знехтувано розподілом тиску по контуру циркуляції. Робоче середовище, яке рухається в контурі, замінено наведеною матеріальною точкою, що рухається зі швидкістю, яка дорівнює напівсумі швидкостей на початку і в кінці відповідної ділянки контуру [4].

Рівняння руху робочого середовища в циркуляційному контурі прийнято в формі закону збереження кількості руху [6]:

$$dK/dt = \Delta P = P_b - P_r, \quad P_r = P_w + P_c, \quad (4)$$

де K – кількість руху робочого середовища в циркуляційному контурі;

P_b – сумарна рушійна сила;

P_r – сумарна сила гідравлічного опору руху робочого середовища;

P_w – сила гідравлічного опору опускного руху води;

P_c – сила гідравлічного опору підйомного руху пароводяної суміші.

Представимо K у вигляді суми кількості руху води та пари під ДВ:

$$K = M_w w_w + M_b w_b / 2, \quad (5)$$

де M_w – маса води в ПГ;

w_w – середня швидкість циркуляції маси води;

M_b – маса пари під ДВ;

w_b – швидкість пари безпосередньо під ДВ;

$w_b/2$ – середня швидкість пари.

Визначено ці швидкості через наведену середню швидкість пари над ДВ w_a :

$$w_b = w_a / \alpha_b,$$

$$w_w = w_a / (\alpha_b \beta_b),$$

$$w_a = G_a / (F_c \rho_s),$$

$$\alpha_b = \sqrt[3]{\varphi_b^2},$$

де α_b – частка пари на ДВ;

β_b – відношення швидкостей пари і води під ДВ;

F_c – площа ДВ;

ρ_s – щільність пари;

φ_b – об’ємний вміст пари під ДВ.
З позначеннями

$$\alpha_{cw} = 1/(\alpha_b \beta_b),$$

$$\alpha_{cb} = 1/(2\alpha_b),$$

$$M_e = \alpha_{cw} M_w + \alpha_{cb} M_b,$$

$$V_e = M_e / \rho_s = \alpha_{cw} V_w \rho_w / \rho_s + \alpha_{cb} V_b,$$

$$H_e = V_e / F_c,$$

де ρ_w – щільність води в ПГ;
 V_w – об’єм води в ПГ;
 V_{wb} – об’єм пари під ДВ, за формулою (5) отримано

$$K = V_e G_a / F_c = H_e G_a.$$

Звідси слідує, що

$$dK/dt = (G_a dV_e/dt + V_e dG_a/dt) / F_c. \quad (6)$$

З уведеними позначеннями отримана похідна

$$\frac{dV_e}{dt} = \alpha_{cw} \left[\frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{dV_w}{dt} + \frac{V_w}{\rho_s} \left(\frac{d\rho_w}{dt} - \frac{\rho_w}{\rho_s} \frac{d\rho_s}{dt} \right) \right] + \alpha_{cb} \left(\frac{dV_c}{dt} - \frac{dV_w}{dt} \right).$$

Ця похідна спрощена до виразу

$$dV_e/dt = \alpha_{dw} dV_w/dt + \alpha_{dp} V_w dp/dt + \alpha_{cb} dV_c/dt,$$

де

$$\alpha_{dw} = \alpha_{cw} \alpha_\rho - \alpha_{cb},$$

$$\alpha_\rho = \rho_w / \rho_s,$$

$$\alpha_{dp} = \alpha_{cw} (\rho_{wp} - \alpha_\rho \rho_{sp}) / \rho_s,$$

$$\rho_{wp} = d\rho_w / dp,$$

$$\rho_{sp} = d\rho_s / dp.$$

Тут p – тиск пароводяної суміші в парогенераторі.

Уведено такі позначення:

$$\beta_{aw} = \alpha_{dw} / F_c,$$

$$\beta_{ap} = \alpha_{dp} / F_c,$$

$$\beta_{ac} = \alpha_{cb} / F_c,$$

$$H_{et} = \frac{dH_e}{dt} = \beta_{aw} \frac{dV_w}{dt} + \beta_{ap} V_w \frac{dp}{dt} + \beta_{ac} \frac{dV_c}{dt}.$$

З цими позначеннями перетворена похідна (6)

$$\frac{dK}{dt} = G_a H_{et} + (\beta_{aw} V_w + \beta_{ac} V_c) \frac{dG_a}{dt}. \quad (7)$$

Сили у формулах (4) представлено у вигляді [6]:

$$P_b = gV_b(\rho_w - \rho_s),$$

$$P_w = k_w g \rho_w w_w^2,$$

$$P_c = k_c g w_w [w_w \rho_w + 0,5 w_b (\rho_w - \rho_s)],$$

де k_w і k_c – коефіцієнти гідравлічних опорів опускного і підйомного рухів.

Для сил отримано:

$$P_w = K_w \rho_w w_a^2, \quad P_c = K_c (\alpha_{cwb} \rho_w - \alpha_{cb} \rho_s) w_a^2,$$

де $K_w = k_w g \alpha_{cw}^2$;

$$K_c = k_c g \alpha_{cw};$$

$$\alpha_{cwb} = \alpha_{cw} + \alpha_{cb}.$$

Обчислено значення сил у номінальному режимі:

$$P_{0b} = gV_{0b}(\rho_{0w} - \rho_{0s}),$$

$$P_{0c} = \alpha_{mc} F_c \Delta p_{0m},$$

$$P_{0w} = P_{0b} - P_{0c},$$

де α_{mc} – частка трубного пучка в горизонтальному перетині парогенератора;

Δp_{0m} – гідравлічний опір трубного пучка.

За цими величинами визначено значення коефіцієнтів гідравлічних сил опору:

$$K_w = \frac{P_{0w}}{\rho_{0w} w_{0a}^2},$$

$$K_c = \frac{P_{0c}}{(\alpha_{cwb} \rho_{0w} - \alpha_{cb} \rho_{0s}) w_{0a}^2}.$$

За цими формулами сумарну силу гідравлічного опору представлено виразом

$$P_r = (\gamma_w \rho_w / \rho_s^2 - \gamma_s / \rho_s) G_a^2,$$

де $\gamma_w = (K_w - K_c \alpha_{cwb}) / F_c^2$; $\gamma_s = K_c \alpha_{cb} / F_c^2$.

З урахуванням (7) рівняння закону збереження кількості руху (4) зведено до вигляду

$$G_a H_{et} + (\beta_{aw} V_w + \beta_{ac} V_c) \frac{dG_a}{dt} = P_b - P_r, \quad (8)$$

де сили P_b і P_r визначаються виразами:

$$P_b = K_{PV} (V_c - V_w),$$

$$K_{PV} = g(\rho_w - \rho_s),$$

$$P_r = K_{PG} G_a^2,$$

$$K_{PG} = \gamma_w \rho_w / \rho_s^2 - \gamma_s / \rho_s.$$

Рівняння (8) розв’язано відносно похідної витрати пара через дзеркало випаровування

$$\frac{dG_a}{dt} = \frac{\Delta P - G_a H_{et}}{\beta_{aw} V_w + \beta_{ac} V_c}, \quad (9)$$

де $\Delta P = K_{PV} (V_c - V_w) - K_{PG} G_a^2$.

Визначено змінні цього рівняння та його елементів через відносні змінні:

$$\begin{aligned} p &= \pi_p p_0, \\ V_w &= \xi_w V_{0w}, \\ V_s &= \xi_s V_{0s}, \\ h_c &= (1 + \xi_c) h_{0c}, \\ G_w &= g_w G_0, \\ G_s &= g_s G_0, \\ G_g &= g_g G_0, \\ G_a &= g_a G_0, \end{aligned}$$

де $p_0, V_{0w}, V_{0s}, h_{0c}$ і G_0 – значення тиску, об'ємів води та пари, допустимого рівня води в ПГ, а також масової витрати пари з парогенератора у номінальному режимі.

Після переходу до відносних змінних в рівнянні (9) та алгебраїчних перетворень отримано рівняння похідної відносної змінної витрати пара через дзеркало випаровування:

$$\begin{cases} \frac{dg_a}{d\tau} = \frac{\delta p + g_a h_{ct}}{1 + a_{aw} \xi_w + a_{ac} \xi_c}, \\ \delta p = c_a + b_{ac} \xi_c - b_{aw} \xi_w - b_{aa} g_a^2, \\ h_{ct} = d_{ap} \xi_w \pi_{pt} + d_{aw} \xi_{wt} + d_{ac} \xi_{ct}, \end{cases} \quad (10)$$

де позначені постійні безрозмірні параметри та похідні відносних змінних:

$$\begin{aligned} c_a &= K_a K_{PV} V_{0c}, \\ b_{ac} &= K_a K_{PV} F_c h_{0c}, \\ b_{aw} &= K_a K_{PV} V_{0w}, \\ b_{aa} &= K_a K_{PG} G_0^2, \\ d_{ap} &= K_a G_0 \beta_{ap} V_{0w} p_0 / t_b, \\ d_{aw} &= K_a G_0 \beta_{aw} V_{0w} / t_b, \\ d_{ac} &= K_a G_0 \beta_{ac} F_c h_{0c} / t_b, \\ a_{aw} &= \beta_{aw} V_{0w} / (\beta_{ac} V_{0c}), \\ a_{ac} &= F_c h_{0c} / V_{0c}, \\ K_a &= t_b / (G_0 \beta_{ac} V_{0c}), \\ \xi_{wt} &= d\xi_w / d\tau, \\ \xi_{ct} &= d\xi_c / d\tau. \end{aligned}$$

Для створення математичної моделі парогенератора необхідно об'єднати рівняння теплопередачі (1), балансу (3) і циркуляції (9), а також моделі допоміжного обладнання енергоблоку АЕС.

Моделі допоміжного обладнання. Математична модель парогенератора, як об'єкта автоматичного управління повинна включати крім самого ПГ й допоміжне обладнання – ті ланки, через які на ПГ подаються збудуючі та управляючі дії.

В систему диференціальних рівнянь (3) входять зовнішні дії g_w, g_s, q_m . Витрата живильної води визначена рівнянням регулюючого живильного клапана (РЖК), що витікає з формули гідравліки [3]

$$G_w = \mu_p F_p \sqrt{2\rho_w(p_w - p)},$$

де μ_p – коефіцієнт витрати;
 F_p – площа прохідного перетину клапана;
 p_w – тиск перед живильним клапаном.

З допущеннями, що μ_p і ρ_w постійні в околиці номінального режиму та що площа F_p пропорційна координаті переміщення регулюючого живильного клапана m_w , після переходу до відносних змінних $\mu_w = m_w / m_{0w}, \pi_w = p_w / p_{0w}$ отримано рівняння

$$g_w = \alpha_{gw} \mu_w \sqrt{\pi_w - \pi_p}, \quad (11)$$

де $\alpha_{gw} = 1 / \sqrt{\pi_{0w} - 1}$;
 π_{0w} – значення відносної змінної тиску перед живильним клапаном у номінальному режимі.

Витрата пари з парогенератора визначена за формулою Флюгеля – Стодоли [3]

$$G_s = G_0 \sqrt{(p^2 - p_m^2) / (p_0^2 - p_{0m}^2)},$$

де p_m і p_{0m} – змінне та номінальне значення тиску пари в головному паровому колекторі (ГПК).

Після переходу до відносних значень з позначенням $\pi_m = p_m / p_0$ отримано:

$$g_s = \alpha_{gs} \sqrt{\pi_p^2 - \pi_m^2}, \quad (12)$$

$$\alpha_{gs} = 1 / \sqrt{\pi_{0p}^2 - \pi_{0m}^2}.$$

Для ГПК визначено рівняння матеріального балансу у відносних змінних [3]

$$\tau_m d\pi_m / d\tau = g_s - g_m,$$

де π_m і g_m – відносні значення тиску в ГПК та витрати пари з ГПК.

Відповідні абсолютні змінне та номінальне значення витрати пари [3]:

$$G_m = \mu_s \beta_m F \chi \sqrt{g p_m / \nu},$$

$$G_0 = \beta_{0m} F \chi \sqrt{g p_b \pi_{0m} / \nu},$$

де μ_s – відносне значення положення клапана регулювання турбіни (КРТ);

F – площа перетину КРТ;

χ – постійний коефіцієнт;

g – прискорення вільного падіння;

ν – теоретичний питомий об'єм пари в КРТ;

β_m визначається за формулою Бендемана [3]

$$\beta_m = \sqrt{1 - [(\varepsilon_m - \varepsilon_c)/(1 - \varepsilon_c)]^2}, \quad (13)$$

де $\varepsilon_m = \pi_t/\pi_m$;
 π_t – відносне значення тиску за КРТ;
 ε_c – постійне значення.
 Звідси визначено

$$g_m = \alpha_{gm}\mu_s\beta_m\sqrt{\pi_m}, \quad (14)$$

де $\alpha_{gm} = 1/(\beta_{0m}\sqrt{\pi_{0m}})$.

Після перетворення рівняння ГПК та позначення $a_{mg} = 1/\tau_m$ отримано диференціальне рівняння ГПК

$$d\pi_m/d\tau = a_{mg}(g_s - g_m). \quad (15)$$

Приріст температури живильної води в парогенераторі пропорційний приросту тиску

$$t_w - t_{0w} = t_{0wp}(p - p_0),$$

де t_{0wp} – похідна температури за тиском на лінії насичення.

Після переходу до відносних змінних отримано рівняння

$$\theta_w = b_{wp}\pi_p - c_{wp}, \quad (16)$$

де $b_{wp} = t_{0wp}p_0/T_b$;
 $c_{wp} = b_{wp}\pi_{0p} - \theta_{0w}$;
 T_b – базове значення температури.
 Теплова потужність поверхні теплопередачі трубок теплообміну визначена рівнянням

$$Q_m = \alpha_w F_m (t_m - t_w),$$

де α_w – коефіцієнт тепловіддачі від трубки до живильної води в парогенераторі;

F_m – загальна площа трубок теплообміну;
 t_m і t_w – середні температури металу і води.

За цією формулою отримано рівняння (2) для відносної змінної теплової потужності q_m , де $a_{qm} = \alpha_w F_m T_b / Q_0$.

Моделі виконавчого механізму регулюючого живильного клапану і приводу клапану регулювання турбіни представлені передатними функціями:

$$W_w(s) = 1/(T_{ww}s + 1), \quad W_s(s) = 1/(T_{ss}s + 1),$$

де T_{ww} і T_{ss} – постійні часу.

Цим передатним функціям відповідають диференціальні рівняння:

$$\frac{d\mu_w}{d\tau} = a_{ww}(u_w - \mu_w), \quad (17)$$

$$\frac{d\mu_s}{d\tau} = a_{ss}(u_s - \mu_s), \quad (18)$$

де u_w – керуючий вплив на РЖК;
 u_s – керуючий вплив на КРТ;
 $a_{ww} = t_b/T_{ww}$; $a_{ss} = t_b/T_{ss}$.

Модель парогенератора. За рівняннями (1)–(3), (10)–(18) представлено модель ПГ як об'єкта управління в просторі станів з відносними змінними у вигляді нелінійної СДР десятого порядку:

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_w &= b_{wp}\pi_p - c_{wp}, \\ q_m &= a_{qm}(\theta_m - \theta_w), \\ d\theta_t/d\tau &= b_{tq}q - a_{tm}(\theta_t - \theta_m), \\ d\theta_m/d\tau &= a_{mt}(\theta_t - \theta_m) - a_{mw}(\theta_m - \theta_w), \\ g_w &= \alpha_{gw}\mu_w\sqrt{\pi_w - \pi_p}, \\ g_s &= \alpha_{gs}\sqrt{\pi_p^2 - \pi_m^2}, \\ \pi_{pt} &= \frac{b_{pw}g_w + b_{ps}g_s + q_m}{a_{pw}\xi_w + a_{ps}\xi_s}, \\ d\pi_p/d\tau &= \pi_{pt}, \\ g_g &= b_{gq}q_m - (a_{gw}\xi_w + a_{gs}\xi_s)\pi_{pt} - b_{gg}g_w, \\ \xi_{wt} &= b_{wg}(g_w - g_g) - a_{wp}\xi_w\pi_{pt}, \\ d\xi_w/d\tau &= \xi_{wt}, \\ d\xi_s/d\tau &= b_{sg}(g_g - g_s) - a_{sp}\xi_s\pi_{pt}, \\ \xi_{ct} &= (c_c - a_{cc}\xi_c)\pi_{pt} + b_{cg}(g_s - g_a), \\ d\xi_c/d\tau &= \xi_{ct}, \\ \varepsilon_m &= \pi_t/\pi_m, \\ \beta_m &= \sqrt{1 - [(\varepsilon_m - \varepsilon_c)/(1 - \varepsilon_c)]^2}, \\ g_m &= \alpha_{gm}\mu_s\beta_m\sqrt{\pi_m}, \\ \frac{d\pi_m}{d\tau} &= a_{mg}(g_s - g_m), \\ \delta p &= c_a + b_{ac}\xi_c - b_{aw}\xi_w - b_{aa}g_a^2, \\ h_{ct} &= d_{ap}\xi_w\pi_{pt} + d_{aw}\xi_{wt} + d_{ac}\xi_{ct}, \\ \frac{dg_a}{d\tau} &= \frac{\delta p + g_a h_{ct}}{1 + a_{aw}\xi_w + a_{ac}\xi_c}, \\ d\mu_w/d\tau &= a_{ww}(u_w - \mu_w), \\ d\mu_s/d\tau &= a_{ss}(u_s - \mu_s). \end{aligned} \right.$$

Цю модель представлено у векторному вигляді:

$$d\mathbf{X}/d\tau = \mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \mathbf{c}, \mathbf{g}), \quad \mathbf{X}_0 = \mathbf{X}(0), \quad \xi_c = C(\mathbf{X}),$$

де $\mathbf{X} = \mathbf{X}(\tau)$ і \mathbf{X}_0 – вектори стану та початкових умов моделі ПГ;

$\mathbf{f}(\mathbf{X}, \mathbf{x}, \mathbf{c}, \mathbf{g})$ – векторна функція правих частин СДР ПГ;

\mathbf{x} і \mathbf{c} – вектори змінних та постійних параметрів ПГ;

$\mathbf{g} = (q, \pi_t, u_w, u_s)^t$ – вектор зовнішніх дій,
 $C(\mathbf{X})$ – оператор визначення вихідної змінної ПГ,

$$\mathbf{X} = (\theta_t, \theta_m, \pi_p, \xi_w, \xi_s, \xi_c, \pi_m, g_a, \mu_w, \mu_s)^t,$$

$$\mathbf{X}_0 = (\theta_{0t}, \theta_{0m}, 1, 1, 1, 0, \pi_{0m}, 1, 1, 1)^t.$$

Розроблена програма для моделі парогенератора ПГВ-1000, яка включена до інформаційної технології оптимізації управління та дозволяє виконувати імітаційне моделювання процесів у парогенераторі [12].

Висновки. Дана стаття присвячена розробці нелінійної математичної моделі парогенератора у відносних змінних для використання в інформаційній технології оптимізації управління. За отриманими результатами зроблені наступні висновки.

1. Наведені моделі процесів теплопередачі та пароутворення в парогенераторі у вигляді систем диференціальних рівнянь з відносними змінними.

2. Розроблено нелінійне диференціальне рівняння для обчислення похідної витрати пари через дзеркало випаровування у відносних змінних стану і наведені формули для обчислення постійних параметрів.

3. Рівняння допоміжного обладнання – головного парового колектору, приводу клапана парової турбіни і виконавчого механізму регулюючого живильного клапана приведені до відносних змінних.

4. Побудована математична модель парогенератора як об'єкта управління у вигляді нелінійної системи диференціальних рівнянь десятого порядку у відносних змінних і наведені формули для обчислення значень постійних параметрів. Розроблена програма для моделі парогенератора ПГВ-1000, яка включена до інформаційної технології оптимізації управління.

Список літератури

1. Yastrebenetsky M., Kharchenko V. *Cyber Security and Safety of Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems*. Hershey, Pennsylvania, United States of America: IGI Global, 2020. 501 p.
2. Kumar V., Mishra K. C., Singh P. et al. Reliability analysis and safety model checking of safety-critical and control systems: A case study of NPP control system. *Annals of Nuclear Energy*. England, 2022. Vol. 166.
3. Иванов В. А. *Эксплуатация АЭС: учебник для вузов*. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1994. 384 с.
4. Демченко В. А. *Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС*. Одесса: Астропринт, 2001. 305 с.
5. Демченко В. А., Тодорцев Ю. К., Ложечников В. Ф. Математическая модель участка питания парогенератора ПГВ-1000. *Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сер.: Системный анализ, управление и информационные технологии*. Харьков: ХГПУ, 1999. Вып. 73. С. 133–138.
6. Zou H., Li L., Zheng Y. Modeling and simulation of the water control system of natural circulation vertical steam generators. *Proceedings of 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI)*. 2019. P. 1215-1220.
7. Kong X. S., Zhang J., Xiao Y. N. et al. Performance optimization for steam generator level control based on a revised simultaneous perturbation stochastic approximation algorithm. *Proceedings of 2018 3rd International conference on intelligent green building and smart grid (IGBSG 2018)*. 2018.
8. Salehi A., Safarzadeh O., Kazemi M. H. Fractional order PID control of steam generator water level for nuclear steam supply systems. *Nuclear Engineering and Design*. 2019. Vol. 342. P. 45-59.

9. Xu Z. H., Fan Q. L., Zhao J. Gain-Scheduled Equivalent-Cascade IMC Tuning Method for Water Level Control System of Nuclear Steam Generator. *PROCESSES*. 2020. Vol. 8, no. 1160.
10. Nikulina O., Severin V., Kotsuba N. Parametric synthesis of control systems for the steam generator of a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol 1, no. 2 (115). P. 77–84.
11. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В., Бубнов А. І. Моделювання теплових процесів парогенератора АЕС для інформаційної технології оптимізації управління. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2021, № 1 (5). С. 56–61.
12. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В. Розробка інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020, № 2 (4). С. 63–69.

References (transliterated)

1. Yastrebenetsky M., Kharchenko V. *Cyber Security and Safety of Nuclear Power Plant Instrumentation and Control Systems*. Hershey, Pennsylvania, United States of America: IGI Global, 2020. 501 p.
2. Kumar V., Mishra K. C., Singh P. et al. Reliability analysis and safety model checking of safety-critical and control systems: A case study of NPP control system. *Annals of Nuclear Energy*. England, 2022. Vol. 166.
3. Ivanov V. A. *Ekspluatatsiya AES: uchebnik dlya vuzov* [Operation of NPP: a textbook for universities]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1994. 384 p.
4. Demchenko V. A. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye texnologicheskikh processov AES i TES* [Automation and modeling of technological processes of NPP and TPP]. Odessa, Astroprint Publ., 2001. 305 p.
5. Demchenko V. A., Todorcev Yu. K., Lozhechnikov V. F. Matematicheskaya model' uchastka pitaniya parogeneratora PGV-1000 [Mathematical model of power supply section of steam generator PGV-1000]. *Vestnik Kharkovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravleniye i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University. Thematic issue: System analysis, control and information technology]. Kharkov, KhGPU Publ., 1999, issue 73, pp. 133–138.
6. Zou H., Li L., Zheng Y. Modeling and simulation of the water control system of natural circulation vertical steam generators. *Proceedings of 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI)*. 2019. P. 1215-1220.
7. Kong X. S., Zhang J., Xiao Y. N. et al. Performance optimization for steam generator level control based on a revised simultaneous perturbation stochastic approximation algorithm. *Proceedings of 2018 3rd International conference on intelligent green building and smart grid (IGBSG 2018)*. 2018.
8. Salehi A., Safarzadeh O., Kazemi M. H. Fractional order PID control of steam generator water level for nuclear steam supply systems. *Nuclear Engineering and Design*. 2019. Vol. 342. P. 45-59.
9. Xu Z. H., Fan Q. L., Zhao J. Gain-Scheduled Equivalent-Cascade IMC Tuning Method for Water Level Control System of Nuclear Steam Generator. *PROCESSES*. 2020. Vol. 8, no. 1160.
10. Nikulina O., Severin V., Kotsuba N. Parametric synthesis of control systems for the steam generator of a nuclear power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol 1, no. 2 (115). P. 77–84.
11. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V., Bubnov A. I. Modeluvannya teplovykh procesiv parogeneratora AES dlya informatsiynoi tekhnologii optymizatsii upravlinnya [Modeling of thermal processes of NPP steam generator for information technology of control optimization]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnyye 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., 2021, no. 1 (5), pp. 56–61.

12. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Rozrobka informatsiynoi tekhnologii optymizatsii upravlinnya skladnymy dynamichnymy systemamy [Development of information technology for optimizing the control of complex 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]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 63–69.

Надійшла (received) 10.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Нікуліна Олена Миколаївна – д-р техн. наук, доцент, 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

Северин Валерій Петрович – 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

Бубнов Антон Ігорович – студент кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua

Кондратов Олексій Михайлович – інженер кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6367-9944>; e-mail: kondratovolexiy@gmail.com

Nikulina Olena Mykolaivna – 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

Severyn Valerii Petrovich – 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

Bubnov Anton Ihorovich – Student of Department Computer Mathematics and Data Analysis National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua

Kondratov Oleksii Mikhailovich – Engineer 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

О. М. ЄВСЕЄНКО

СИНТЕЗ СИСТЕМИ ВИМІРУ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯ У ПРИМІЩЕННЯХ ТОРГОВЕЛЬНОГО ЦЕНТРУ

Розглядається питання побудови системи виміру та моніторингу параметрів повітря приміщень торговельного центру. Збільшення населення планети, видобутку енергоресурсів та шкідливих викидів у атмосферу потребує пошуку рішень, направлених на виявлення та зменшення впливу життєдіяльності людей на навколишнє середовище. Це питання є актуальним тому, що зміни, які наносять шкоду навколишньому середовищу, є незворотними. Одним із варіантів отримання інформації про значення таких шкідливих параметрів є побудова та впровадження систем виміру, які називаються метеостанціями. Існуючі метеостанції призначені для загальних потреб вимірювання температури та вологості середовища. Це обмежує кількість параметрів, які можна виміряти. Визначено основні параметри навколишнього середовища приміщень, які впливають на здоров'я людини, та виявлено, що висока концентрація деяких з них може бути смертельною. Оскільки торговельний центр є місцем великого скупчення людей, то питання правильної роботи системи вентиляції та кондиціонування повітря і виміру його показників є актуальною задачею. Огляд існуючих рішень показав, що основними вимогами, які висуваються до побудови метеостанцій, є ціна, кількість параметрів, що вимірюються, автономність роботи. Здійснено вибір контролера та датчиків для побудови метеостанції. Розроблено структурну схему та схему підключення датчиків. Значне місце в роботі приділено опису алгоритмів, за якими працює система вимірювань параметрів повітря. Протестовано програмну систему з використанням обраного контролера та датчиків. Розроблено візуалізацію для відображення отриманих параметрів мікроклімату торговельного центру. На основі отриманих даних підтверджено можливість проведення вимірів на реальному об'єкті управління.

Ключові слова: торговельний центр, метеостанція, автоматизоване керування, апаратно-програмний комплекс, Arduino, терморегулювання

О. М. YEVSIEENKO

SHOPPING MALL AIR PARAMETERS MEASUREMENT SYSTEM SYNTHESIS

The article is devoting to a shopping mall air parameters monitoring system creation. It is stated that increasing energy production, the world's population and harmful emissions into the atmosphere requires identifying solutions for searching and reducing the human activities impact on the environment. This issue is urgent because of the fact that environment harmful changes are irreversible. It is known that one of the options for harmful parameters values obtaining information is the construction and implementation of measurement systems, that are called weather stations. Literature review showed that available weather environment stations of temperature and humidity measuring only for the general purposes are designed. It limits the number of parameters that can be measured. The main parameters of the indoor environment that affect human health have been identified. It has been found that high concentrations of some gases can be dangerous for human health. It is shown that the issue of proper operation of the ventilation and air conditioning system and measuring its performance is an urgent task. The main requirements for the weather stations construction were obtained. Microcontroller and sensors synthesis for the weather station construction is made. The structural scheme and the scheme of connection of sensors are developed. The major attention is paid to the algorithms description that shows how air parameters system measurement works. The software system using the selected controller and sensors has been tested. A visualization of displaying the obtained shopping center air parameters has been developed. Based on received data the possibility of carrying out measurements on real object of management is confirmed.

Keywords: shopping mall, weather station, automated control, hardware and software complex, Arduino, thermal control

Вступ. Сьогодення характеризується стрімким розвитком промисловості, збільшенням кількості світового населення та значним видобутком корисних копалин. Усе це збільшує навантаження на навколишнє середовище: вичерпуються енергоресурси та збільшуються викиди шкідливих елементів. Тому можна виділити такі основні тенденції для захисту навколишнього середовища: зменшення шкідливих викидів та енергозбереження.

Для діагностування змін у навколишньому середовищі використовуються метеостанції, які створюються для великих і малих об'єктів. Потреба їх використання та побудова обумовлені необхідністю отримання конкретного числового значення параметрів, через те, що їх оцінка за допомогою відчуттів є суб'єктивною. Проте числові параметри вимірів обмежені точністю, діапазонами робочих параметрів та вимірювання.

Виміри, що робляться метеостанціями, направлені на відслідковування змін клімату на планеті. Але вони підходять і для простих випадків: кожна людина може побудувати систему вимірювань показників різних параметрів за допомогою контролера і відповідних датчиків середовища. Тому для вирішення своїх завдань кожен дослідник може

створити власну метеостанцію. Ці завдання визначаються складністю об'єкта, кількістю контрольованих параметрів та поведінкою об'єкта управління.

Останнім часом з'явилося безліч праць, присвячених темі контролю параметрів навколишнього середовища. Це сталося завдяки стрімкому розвитку мікроконтролерної техніки, різноманіттю датчиків та легкості освоєння мови програмування Python для побудови програм на Arduino, створенню концепції інтернету речей. Ця концепція передбачає підключення датчиків вимірювання фізичних величин у єдину мережу. Вона налагоджує взаємодію людей через пристрої та об'єднує пристрої за допомогою інтернету.

Торговельний центр – це складний об'єкт, підтримання параметрів якого є необхідним через унікальність умов та кількість людей, що змінюються протягом доби. Кожен торговельний центр є унікальним. Тому для побудови моделі об'єкта та синтезу енергозберігаючих рішень необхідна інформація про кожен об'єкт окремо. Ідентифікація об'єкта може здійснюватися за рахунок виміру його показників за допомогою метеостанцій.

Наразі на ринку доступні різні метеостанції.

© О. М. Євсєєнко, 2022

Вони відрізняються ціною, кількістю датчиків, комплектацією, програмними засобами. Проте вони є метеостанціями загального призначення і не покривають більшість потреб об'єктів керування. Більш спеціалізовані метеостанції коштують дорожче через унікальність розробки.

Тому для побудови метеостанції для торговельного центру існує потреба у виділенні основних параметрів об'єкта керування, підбору датчиків, синтезу системи моніторингу.

Аналіз основних досягнень і літератури. У більшості публікацій використовуються контролери різних фірм: ESP32 [1], Arduino [2–8], NodeMCU [9].

У [1] вказується, що основними компонентами розумної метеостанції є комунікаційна мережа, мікроконтролер, датчики для спостереження та вимірювання параметрів навколишнього середовища. Для віддаленого читання та керування даними використовується програмна платформа Blynk. Застосування цієї платформи є поширеним, зокрема вона використовується у роботах [1, 9]. У [10] концепція інтернету речей використовується в меліпоникультурі, у процесі вирощення бджіл для видобування меду. Проведення вимірів дозволило виділити активність бджіл при конкретній температурі, чого не можливо було б з'ясувати без вимірів.

Розроблена система має бути дешевою, компактною, розрахованою на широкий діапазон вимірювання, тривалий термін використання [11–13] та низьке енергоспоживання [9]. У роботі [7] пропонується використовувати відновлювальні джерела енергії. Для заряду джерела живлення використовується енергія сонячної батареї. Проте для збору показань параметрів торговельного центру ця система не підходить.

У [3] показано, що маючи дані про об'єкт, можна побудувати його модель та прогнозувати його поведінку. Пропонуються два методи для побудови прогнозу стану об'єкта. Проте методика визначення інтервалу прогнозування не наводиться.

Частина публікацій присвячена темі збереження навколишнього середовища та зміни клімату [3, 5, 13]. Моніторинг погоди виконує дуже важливу роль у розумінні кліматичних змін.

Більшість датчиків, доступних для купівлі на ринку, не є метрологічними засобами вимірювань, тому вони мають певні значення похибок, що можуть впливати на об'єктивність отриманих даних. У [9] виміри обраних датчиків порівнюються з інформацією, отриманою з погодних ресурсів. Показано, що відносна похибка вимірювань складає від 1 % до 3 % [9] та від 1 % до 5 % [7], що вважається хорошим показником [9].

У більшості робіт за дійсне одразу береться вимірне значення. Проте, необхідно проводити певну фільтрацію даних, наприклад, брати середнє значення з декількох вимірів, або використовувати інші фільтри: фільтр Калмана, або аперіодичний фільтр.

Викладення основного матеріалу. Нормативні документи регламентують правила побудови систем вентиляції та кондиціонування повітря. Ці правила визначають концентрацію та рівень складу повітря для безпечного перебування людини в приміщенні. До параметрів складу повітря, які визначаються цими правилами, відносяться: чадний газ (CO), частинки PM2.5 та PM10, вуглекислий газ (CO₂), формальдегід (HCHO), летучі органічні сполуки (TVOC), а також температура, швидкість, вологість повітря та рівень шуму. Для їх вимірювання пропонується апаратне забезпечення, яке складається з датчиків BME280, MH-Z19B, MICS68, M1X8410, MQ7, PMS5003, WSP2110. Підібрані датчики використовуються для вимірювання температури, вологості, тиску, чадного газу, пилу.

Характер об'єкта, який досліджується, визначає діапазон робочих температур обладнання, яке має використовуватися. Фізичні властивості приміщень торговельного центру встановлюють вимоги до діапазону температур вимірювання, що має бути від 5 °C до 40 °C, а вологість – від 0 % до 90 %. Це дає змогу підібрати датчики у більш вузькому робочому діапазоні, які є дешевшими.

Виміряні значення отримуються за допомогою контролера Arduino Uno. Він виводить їх на LCD-дисплей, логує на SD-карту та передає у хмарне середовище за допомогою Wi-Fi передавача ESP8266. Для отримання значення поточного часу використовується модуль RTC-DS1307.

Далі наводиться опис підбраного обладнання:

- MicroSD адаптер з MicroSD-картою

SD-карта використовується для зберігання показників датчиків у локальному сховищі. Логування відбувається із заданим періодом, щоб зберегти дані, якщо зник зв'язок із сервером. Воно відбувається у форматі дата, час, показники датчиків (табл. 1).

Файл використовує поточну дату для створення файлу та має ім'я у форматі DD-MM-YY-HH-MM-SS_№.csv, де DD – день, MM – місяць, YY – рік, HH – година, MM – хвилина, SS – секунда, № – число від 1 з номером вимірювання за поточний день.

Структуроване збереження файлів вимірювань пропонується реалізовувати наступним чином. Файл з вимірюваннями зберігати в папці з іменем поточного дня, яка знаходиться в папці з іменем поточного місяця, розташованій у папці з поточним роком. Якщо

Таблиця 1 – Зріз даних з лог-файлу

DATE	TIME	T (°C)	H (%)	CO2 (ppm)	NH3 (ppm)	CO (ppm)
04-05-22	11:02:07	29.53	66.33	340	4	23
04-05-22	11:03:07	29.54	66.35	342	4	24
04-05-22	11:04:07	29.55	66.34	341	4	24
04-05-22	11:05:07	29.56	66.33	343	4	24

якоїсь з цих папок не існує, то вона створюється перед створенням файлу вимірювань.

Недоліком збереження даних у локальному сховищі є те, що він обмежений за об'ємом. Збільшення об'єму потребує використання сховища більшої ємності. Це вимагає придбання пам'яті більшого об'єму, що є затратним. Тому необхідно використовувати хмарне середовище та додаток, який уміє зчитувати дані з сервера.

- Годинник реального часу DS1302

Годинник використовується для заповнення інформації з метою логування дати та часу виміру. Поточні дата та час виводяться на дисплей. Після подачі живлення виконується порівняння поточних дати та часу з датою та часом, які зчитані з сервера часу. Якщо показники годинника реального часу відрізняються від серверних показників, то показання DS1302 корегуються. Якщо відсутній зв'язок із сервером, то показники не корегуються, і у вимірюваннях використовуються поточні дата та час.

- LCD дисплей LCD1602

Дисплей використовується для відображення інформації. Зовнішній вигляд дисплею наведено на рис. 1. На дисплеї в реальному часі відображаються поточні виміряні значення датчиків, стан з'єднання з інтернетом через Wi-Fi модуль. Поточні час та дата позначаються у правому верхньому куті екрана. На дисплеї є віртуальні кнопки початку проведення вимірів. Після натискання ця кнопка змінюється на червону з написом «STOP».



Рис. 1. LCD-дисплей з поточною інформацією про вологість

Також починається відлік часу, який пройшов з початку вимірювань. На дисплеї є можливість вибору параметра для його відображення на графіку.

За допомогою дисплею також задається інтервал архівації параметрів та вибір режиму вимірювань: вимірювати протягом заданого часу (режим таймер), або увесь час до зупини програми користувачем (режим секундомір).

- Wi-Fi модуль ESP8266

ESP8266 – це пристрій для організації бездротового підключення до локальної мережі. Для його використання необхідно провести налаштування, обрати локальну мережу та ввести пароль. Підключення модуля до контролера здійснюється через послідовний порт. Якщо мережа має доступ до інтернету, дані передаються на сервер даних для зберігання та відображення в мобільному додатку, або в браузері.

- Барометр BME280

Датчик дозволяє проводити виміри атмосферного тиску. Також до його складу входять датчики виміру температури та вологості. BME280 буде розташову-

ватись усередині корпусу приладу, тому ці датчики будуть показувати температуру і вологість приладу. Датчик має точність вимірювання температури від 0.5 °C до 1 °C, точність вимірювання вологості на рівні 3 %, точність вимірювання тиску на рівні 1 гПа при діапазоні вимірювань від 300 гПа до 1100 гПа.

- Датчик вимірювання рівня вуглекислого газу MH-Z19B

Цей датчик проводить вимірювання рівня вуглекислого газу в діапазоні від 0 ppm до 5000 ppm з точністю 50 ppm \pm 3 % від результату вимірювань. Цей діапазон покриває потреби в отриманні даних, тому що згідно з вимогами вентиляції провітрювання має розпочинатися при перевищенні рівня вуглекислого газу значення 500 ppm. Інформація про поточний рівень параметра визначається за значенням тривалості імпульсу ШІМ-сигналу, який генерує датчик.

- Датчик вимірювання рівня чадного газу, нітрогену, аміаку MICS 6814

Цей датчик проводить вимірювання рівня чадного газу в діапазоні від 1 ppm до 1000 ppm, нітрогену в діапазоні від 0.05 ppm до 10 ppm, аміаку в діапазоні від 1 ppm до 500 ppm. Окрім вимірювання цих параметрів, здійснюється вимір рівня етанолу (C₂H₅OH), гідрогену (H₂), пропану (C₃H₈), ізо-бутану (C₄H₁₀), що обумовлює високу вартість цього датчика.

- Датчик рівня кисню MFX8410

Виміри тиску проводяться в діапазоні від 0 % до 25 %. Цей датчик має досить тривалий час виміру параметра, що може досягати 10 секунд.

- Датчик чадного газу MQ7

Як альтернатива датчику MICS 6814 рівень чадного газу можна отримати, використовуючи датчик MQ7. Він має ширший діапазон вимірювань від 10 ppm до 10000 ppm та меншу ціну. Натомість не вмє визначати інші параметри середовища.

- Датчик виміру кількості часток мікродисперсного середовища PMS5003

Датчик реагує на частки розміром від 0.3 мкм до 10 мкм, що відносяться до трьох параметрів: PM_{1.0} (від 0.3 мкм до 1 мкм), PM_{2.5} (від 1 мкм до 2.5 мкм), PM₁₀ (від 2.5 мкм до 10 мкм). Використовуючи послідовний інтерфейс, можна отримати інформацію про вміст цих часток у повітрі для кожного параметра окремо.

- Датчик формальдегіду Grove HCHO Sensor

Датчик дозволяє виявити формальдегід у повітрі з концентрацією до 1 ppm. Також за допомогою датчика можливо виявити деякі концентрації бензолу, толуолу.

- Датчик вологості та температур DHT22

Цей датчик дозволяє вимірювати вологість у діапазоні від 0 % до 100 % з роздільною здатністю \pm 1 %. Його додатковою особливістю є можливість виміру температури в діапазоні від мінус 40°C до плюс 80 °C з роздільною здатністю \pm 0.1 °C. Якщо є потреба збільшити точність вимірювань, то можна використовувати датчик температури DS18B20 з роздільною здатністю \pm 0.0625 °C. Перевагою

використання DHT22 є можливість його винесення на відстань до 20 метрів від контролера.

Синтез схем підключення. Вимірювані параметри та датчики представлені у вигляді структурної схеми (рис. 2).

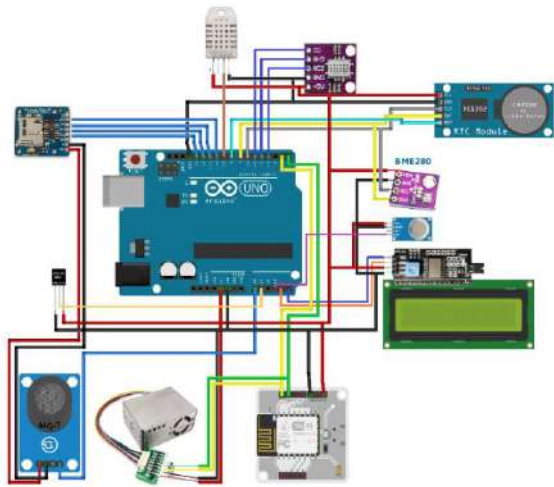


Рис. 3. Схема підключення обраних компонентів

Використавши інформацію про розташування та призначення виводів, розроблено схему підключення (рис. 3).

Для підключення датчиків використовується послідовний інтерфейс із застосуванням універсального синхронно-асинхронного передавача (UART). Джерелом живлення є модуль батареї на плюс 5 В. Аналогові виходи датчиків підключено до аналогових входів контролера. Підключення до LCD-дисплея, годинника поточного часу, датчика тиску здійснюється за допомогою I2C інтерфейсу, а з датчиками

рівня вуглекислого газу, чадного газу, аміаку – за допомогою UART. На рис. 4 наведено макет зібраної системи.

Синтез програмної системи. Програма працює наступним чином. Після подачі живлення на контролер іде встановлення з'єднання з Wi-Fi модулем та перевірка обміну даних з дисплеєм. Якщо дисплей не підключено, або є несправність, засвічується червоний світлодіод на контролері.



Рис. 4. Зібраний макет для тестування програми

Далі йде опитування усіх датчиків, які мають бути присутні в системі, вичитуються поточні дані та

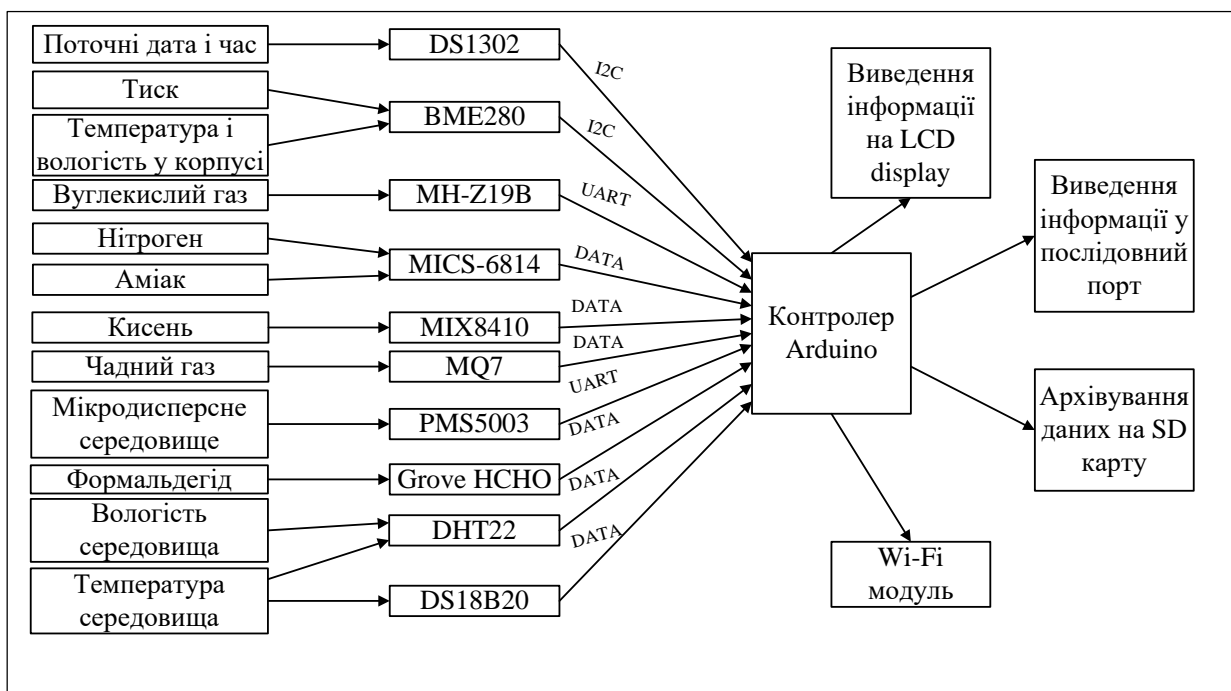


Рис. 2. Структурна схема контролю показників повітря в торговельному центрі

час. Якщо з датчиками встановлено з'єднання, то йде вичитування їхніх показань та відображення на дисплеї. Якщо усі датчики знайдено в системі, то йде їх опитування з періодом, що дорівнює 5 секундам. Ці дані в реальному часі виводяться на дисплей та передаються в мобільний додаток.

Якщо немає з'єднання з інтернетом, то дані виводяться тільки на дисплей. Якщо немає зв'язку з дисплеєм, то дані передаються в мобільний додаток. Якщо відсутні або несправні обидва компоненти, то опитування датчиків не відбувається. Це свідчить про несправність системи, про що сповіщається підсвічуванням червоного світлодіода.

У користувача є можливість вибору режиму вимірювання: секундомір та таймер. Режим обирається в мобільному додатку, або з дисплею. Для початку вимірювань користувач повинен натиснути віртуальну кнопку «Старт». Після цього на SD-карті створюється файл з інформацією про поточні вимірювання. Дані у файл записуються з періодом, що дорівнює п'яти секундам.

Загальний опис алгоритмів ініціалізації та виміру показників повітря наведено на рис. 5 та на рис. 6. Користувач зупиняє запис до файлу натисканням віртуальної кнопки «Стоп». Якщо під час роботи отримані некоректні дані, або немає зв'язку з одним із датчиків, то це значення не виводиться.

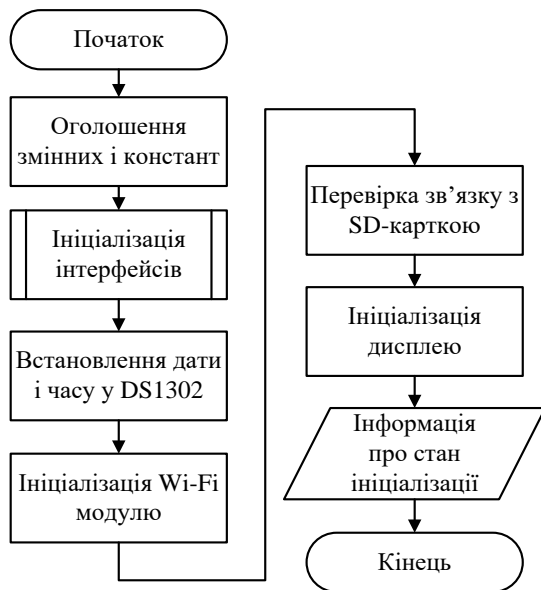


Рис. 5. Блок-схема алгоритму ініціалізації програми

На місці показань цього датчика на дисплеї виводиться червоний хрестик, а лог-файл заповнюється порожнім значенням.

Тестування розробленої системи моніторингу виконано за допомогою отримання та обробки даних з COM-порту (рис. 7) та мобільного застосунку (рис. 8). Дані з COM-порту отримуються при підключенні контролера до комп'ютера. Проте, у більшості випадків використання комп'ютера на об'єктах неможливе через тривалість часу проведення вимірів. Також таке з'єднання обумовлюється довжиною дротового вико-

ристання інтерфейсу RS232, який обмежується двома метрами.

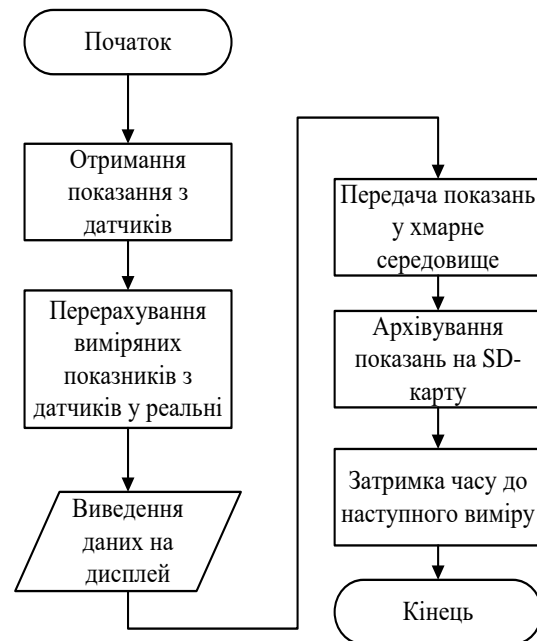


Рис. 6. Блок-схема алгоритму одного циклу виміру параметрів

DATE	TIME	T(°C)	H(%)	CO2(ppm)	NH3(ppm)	CO(ppm)
04-05-22	11:02:07	29.53	66.33	340	4	23
04-05-22	11:03:07	29.43	66.35	342	4	24
04-05-22	11:04:07	29.45	66.34	341	4	24
04-05-22	11:05:07	29.48	66.33	343	4	24
04-05-22	11:06:07	29.50	66.34	342	4	24
04-05-22	11:07:07	29.51	66.40	344	4	24
04-05-22	11:08:07	29.51	66.37	342	4	23
04-05-22	11:09:07	29.52	66.35	342	4	23

Рис. 7. Тестування системи за допомогою отримання даних з COM-порту

Проведене тестування (рис. 8) системи підтвердило її працездатність та можливість використання для отримання показів реального об'єкта.



Рис. 8. Тестування системи за допомогою мобільного додатку

Проведено порівняння значень, вимірених за допомогою розробленої системи, зі значеннями, отриманими з еталонних датчиків. Порівняння показань температури показало похибку вимірювань на рівні ± 0.6 °C, а вологості – на рівні ± 1.5 %.

Висновки. Дослідження присвячене розробці апаратно-програмного комплексу ідентифікації параметрів повітря торговельного центру. Проведений огляд засвідчив наявність великої кількості праць, присвячених вимірюванню фізичних параметрів навколишнього середовища, натомість підтвердив необхідність створення власної метеостанції для отримання параметрів повітря в приміщеннях торговельного центру. Підібране обладнання для створення метеостанції дозволило отримувати значення п'ятнадцяти показників повітря. Використання контролера Arduino та мови програмування Python скоротило час написання коду програми та побудови апаратної системи.

Програма обробки побудована таким чином, що дані вимірювань можуть бути збережені на SD-карті, або передані на сервер у базу даних. Дані з сервера використовуються для відображення в мобільному застосунку, або в браузері. Розроблена система показала високу надійність, якщо під час проведення вимірювань відбуваються якісь проблеми з роботою SD-карти, з підключенням до інтернету, або з роботою дисплея.

Порівняння показань розробленої системи з еталонними вимірюваннями підтвердило, що вона може застосовуватися для ідентифікації параметрів торговельного центру.

Список літератури

- Kreculj M. D., Nikolić V., Sajic J. L., Dihovični D., Kovačević N. R. The IoT Weather Station Model. *Science and Higher Education in Function of Sustainable Development – SED 2021: 12th International Scientific Conference Science and Higher Education in Function of Sustainable Development, Užice, Serbia, 8/10/21*. URL: <http://www.vpts.edu.rs/sed/fajlovi/inf/14.pdf> (дата звернення: 20.03.2022).
- Dhungana B., Sharma M., Shrestha R. Digital Portable Weather Station Monitoring System Using Arduino Uno. *Semiconductor Science and Information Devices*. 2021. Vol. 3, issue 1. P. 33–40.
- Mestre G., Ruano A., Duarte H., Silva S., Khosravani H., Pesteh S., Ferreira P. M., Horta R. An Intelligent Weather Station. *Sensors*. 2015. Vol. 15 (12). P. 31005–31022. DOI:10.3390/s151229841.
- Adepoju T. M., Oladele M. O., Kasali A. A., Fabiyyi G. J. Development of a Low-Cost Arduino-Based Weather Station. *FUOYE Journal of Engineering and Technology (FUOYEJET)*. 2020. Vol. 5, issue 2. P. 69–73.
- Hussein Z. K., Hadi H. J., Abdul-Mutaleb M. R., Mezaal Y. S. Low cost smart weather station using Arduino and ZigBee. *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*. 2020. Vol. 18, no. 1. P. 282–288. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v18i1.12784.
- Essiane S. N., Essama B. G. O. Development of a micro weather station using Arduino and Internet of Things. *Physics Education*. 2022. Vol. 57, issue 1. P. 1–11. DOI: 10.1088/1361-6552/ac2670.
- Hawkinson S. J., Madhumitha M., Raj A. S. Weather station update using renewable energy source. *Journal of Xidian University*. 2020. Vol. 14, issue 5. P. 4782–4792. DOI: 10.37896/jxu14.5/527.
- Gheorghie A. C., Stoica C. I. Wireless weather station using arduino mega and arduino nano. *Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty*. 2021, no. 1, pp. 35–38. DOI: 10.2478/sbeef-2021-0008.
- Shahadat A. S. B., Ayon S. I., Khatun M. R. Efficient IoT based Weather Station. *2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*. Bangladesh, 2021, pp. 227–230. DOI: 10.1109/WIECON-ECE52138.2020.9398041.
- Yunus M. A., Ibrahim S., Kaman K. K., Anuar N. H. K., Othman N., Majid M. A., Muhamad N. A. Internet of Things (IoT) Application in Meliponiculture. *International Journal of Integrated Engineering – Special Issue on Electrical Electronic Engineering*. 2017, vol. 9, no. 4, pp. 57–63.
- Haavashja T., Nylander, P. Puhakka L. A compact road weather station. *30th International Baltic Road Conference (IBRC 2021)*. Riga, Latvia, 2021, pp. 1–6. DOI:10.1088/1757-899X/1202/1/012037.
- Suparta W., Warsita A., Ircham I. A low-cost development of automatic weather station based on Arduino for monitoring precipitable water vapor. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2021. Vol. 24, no. 21. P. 744–753. DOI: 10.11591/ijeecs.v24.i2.pp744-753.
- Aziz S., Hesham N., Elfiky D. *Design and implement a real time weather station using Arduino and lab-View*. Cairo: NARSS, 2021. 2 p. (Preprint. National Authority for Remote Sensing and Space Science).

References (transliterated)

- Kreculj M. D., Nikolić V., Sajic J. L., Dihovični D., Kovačević N. R. The IoT Weather Station Model. *Science and Higher Education in Function of Sustainable Development – SED 2021: 12th International Scientific Conference Science and Higher Education in Function of Sustainable Development, Užice, Serbia, 8/10/21*. Available at: <http://www.vpts.edu.rs/sed/fajlovi/inf/14.pdf> (accessed 20.03.2022).
- Dhungana B., Sharma M., Shrestha R. Digital Portable Weather Station Monitoring System Using Arduino Uno. *Semiconductor Science and Information Devices*. 2021, vol. 3, issue, 1, pp. 33–40.
- Mestre G., Ruano A., Duarte H., Silva S., Khosravani H., Pesteh S., Ferreira P. M., Horta R. An Intelligent Weather Station. *Sensors*. 2015, vol. 15 (12), pp. 31005–31022. DOI:10.3390/s151229841.
- Adepoju T. M., Oladele M. O., Kasali A. A., Fabiyyi G. J. Development of a Low-Cost Arduino-Based Weather Station. *FUOYE Journal of Engineering and Technology (FUOYEJET)*. 2020, vol. 5, issue 2, pp. 69–73.
- Hussein Z. K., Hadi H. J., Abdul-Mutaleb M. R., Mezaal Y. S. Low cost smart weather station using Arduino and ZigBee. *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*. 2020, vol. 18, no. 1, pp. 282–288. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v18i1.12784.
- Essiane S. N., Essama B. G. O. Development of a micro weather station using Arduino and Internet of Things. *Physics Education*. 2022, vol. 57, issue 1, pp. 1–11. DOI: 10.1088/1361-6552/ac2670.
- Hawkinson S. J., Madhumitha M., Raj A. S. Weather station update using renewable energy source. *Journal of Xidian University*. 2020, vol. 14, issue 5, pp. 4782–4792. DOI: 10.37896/jxu14.5/527.
- Gheorghie A. C., Stoica C. I. Wireless weather station using arduino mega and arduino nano. *Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty*. 2021, no. 1, pp. 35–38. DOI: 10.2478/sbeef-2021-0008.
- Shahadat A. S. B., Ayon S. I., Khatun M. R. Efficient IoT based Weather Station. *2020 IEEE International Women in Engineering (WIE) Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*. Bangladesh, 2021, pp. 227–230. DOI: 10.1109/WIECON-ECE52138.2020.9398041.
- Yunus M. A., Ibrahim S., Kaman K. K., Anuar N. H. K., Othman N., Majid M. A., Muhamad N. A. Internet of Things (IoT) Application in Meliponiculture. *International Journal of Integrated Engineering – Special Issue on Electrical Electronic Engineering*. 2017, vol. 9, no. 4, pp. 57–63.
- Haavashja T., Nylander, P. Puhakka L. A compact road weather station. *30th International Baltic Road Conference (IBRC 2021)*. Riga, Latvia, 2021, pp. 1–6. DOI:10.1088/1757-899X/1202/1/012037.
- Suparta W., Warsita A., Ircham I. A low-cost development of automatic weather station based on Arduino for monitoring precipitable water vapor. *Indonesian Journal of Electrical*

Engineering and Computer Sciences. 2021, vol. 24, no. 21, pp. 744–753. DOI: 10.11591/ijeecs.v24.i2.pp744-753.

2021. 2 p. (Preprint. National Authority for Remote Sensing and Space Science).

13. Aziz S., Hesham N., Elfiky D. *Design and implement a real time weather station using Arduino and lab-View*. Cairo, NARSS Publ.,

Надійшла (received) 07.05.2022

Відомості про автора / About the Author

Євсеєнко Олег Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автоматизації та управління в технічних системах; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5432-1211>; e mail: olegjevseienko@gmail.com

Yevseienko Oleh Mykolaiovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor at the Department of automation and control in technical systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5432-1211>; e mail: olegjevseienko@gmail.com

УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

УДК 004.91

DOI: 10.20998/2079-0023.2022.01.06

Д. Е. ДВУХГЛАНОВ, М. І. БЕЗМЕНОВ, О. В. ШМАТКО, А. С. ДВУХГЛАНОВА, Д. С. КОРХОВИЙ, М. В. ЧЕРКУН

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПІДГОТОВКИ ПЛАНУ НАВЧАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВИКЛАДАЧІВ КАФЕДРИ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Представляється формалізований опис процесу планування навчального навантаження науково-педагогічних працівників кафедри на навчальний рік на кафедрі закладу вищої освіти. Актуальність представлення моделі у формалізованому вигляді визначається необхідністю мати єдиний погляд на процеси підготовки потрібних даних, принципи та алгоритми перетворення даних, а також для уніфікації результатів представлення кінцевих результатів. Запропонований формалізований опис розглядається як основа для подальшого створення відповідної автоматизованої системи розрахунку та розподілу навчального навантаження із можливістю автоматизованої генерації та розсилки звітних документів, зокрема семестрового плану та плану навчального навантаження, а також персональних витягів для науково-педагогічних працівників для розділу «Навчальна робота» їх індивідуальних планів. Представлений процес відображає особливості здійснення розподілу та представлення вихідних даних та результатів планування навантаження на певній кафедрі певного закладу вищої освіти України. Для підготовки моделей використано систему підтримки процесів проектування Enterprise Architect, а тому запропонований формалізований опис може бути адаптований до специфіки іншого закладу вищої освіти або його підрозділу. Основу формалізованого опису складає доменна модель. Кожна з суттєвостей доменної моделі представлена набором атрибутів, що дозволяє використовувати кортежі опису при проектуванні бази даних відповідної програмної системи. Визначені етапи планування навчального навантаження у вигляді діаграм бізнес-процесів BPMN та діаграм діяльності UML. Представлені математичні співвідношення та описи порядку проведення обчислень, які дозволяють отримати задані значення величин на визначених етапах формування плану. Запропоновані результати отримані на основі нормативної бази України у сфері освіти.

Ключові слова: автоматизація планування навчального навантаження, доменна модель процесу планування навчального навантаження.

D. E. DVUKHGLAVOV, M. I. BEZMENOV, O. V. SHMATKO, A. S. DVUKHGLAVOVA, D. S. KORKHOVIY, M. V. CHERKUN

FORMALIZATION OF THE PROCESS OF PREPARATION OF THE TEACHERS STUDYLOAD PLAN OF THE HIGHER EDUCATION INSTITUTION DEPARTMENT

A formalized description of the process of planning the studyload of teachers of the department for the academic year at the department of higher education institution. The relevance of presenting the model in a formalized form is determined by the need to have a unified view of the processes of preparation of the required data, principles and algorithms of data transformation, as well as to unify the results of presenting the final results. The proposed formalized description is considered as a basis for further creation of an automated system for calculating and distributing studyload with the possibility of automated generation and distribution of reporting documents, including semester plan and studyload plan, and personal extracts for preparing part "Educational work" in teacher's individual plans. The presented process reflects the peculiarities of the distribution and presentation of initial data and results of studyload planning at a particular department of a particular institution of higher education in Ukraine. The Enterprise Architect design support system was used to prepare the models, and therefore the proposed formalized description can be adapted to the specifics of another higher education institution or its department. The basis of the formalized description is the domain model. Each of the essentials of the domain model is represented by a set of attributes that allows the use of description tuples in the design of the database of the respective software system. The stages of training load planning in the form of BPMN business process diagrams and UML activity diagrams are defined. Mathematical relations and descriptions of the order of calculations are presented, which allow to obtain the set values of the values at certain stages of the plan formation. The proposed results are obtained on the basis of the regulatory framework of Ukraine in the field of education.

Keywords: automation of studyload planning, domain model of studyload planning process.

Аналіз стану питання. Однією з завдань підготовки до нового навчального року на кафедрі закладу вищої освіти (ЗВО) є планування навчального навантаження (ПНН) науково-педагогічних працівників (НПП) кафедри на рік. Основним документом, що визначається базові принципи розрахунку навчального навантаження є [1]. Він розроблений у Міністерстві освіти та науки України. На його основі ЗВО

створюють власні інструкції, які уточнюють принципи розрахунків, враховуючи специфіку певного закладу. Прикладами таких документів є [2] та [3].

Автоматизоване вирішення задачі розрахунку ПНН НПП також не є новим. У [4] можна знайти опис інтерфейсу АРМ «Навчальна частина», яка дозволяє працювати із навчальними планами Національного технічного університету «ХПІ», а також розраховува-

© Д. Е. Двухглавов, М. І. Безменов, О. В. Шматко, А. С. Двухглавова, Д. С. Корховий, М. В. Черкун, 2022

ти кількість штатних одиниць викладачів для кафедр. У [5] зазначено, що в Харківському національному університеті радіоелектроніки використовується інформаційна автоматизована система (ІАС) «Університет», до складу якої входить декілька підсистем, у тому числі підсистема «Кафедра». До складу цієї підсистеми входить модуль «Розподіл навчального навантаження», який використовується «... для розподілу навчального навантаження між викладачами, формування звітів та форм вихідних документів, а саме штатного розпису кафедри; навантаження викладача для індивідуального плану викладача; загального обсягу навчального навантаження на кафедру за викладачами». У [6] декларується наявність автоматизованої системи планування навчального процесу «АСП НП», застосування якої забезпечує «... автоматизований процес формування навчальних планів і робочих навчальних планів, формування відповідних документів для подальшого розрахунку навантаження НПП, формування семестрових планів та навантаження кафедр». Ця система розгорнута у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». При більш наполегливому пошуку можна знайти аналоги систем у кожного закладі вищої освіти такого рівня.

Також є комерційні продукти, які вирішують завдання, що розглядається. Посилання [7] містить опис продукту «Автоматизована система управління вищим навчальним закладом III–IV рівня акредитації», у складі якої є модуль «Навчальна частина–01». Модуль дозволяє «... вирішувати проблеми створення сховища бази даних, розрахунків, аналізу та звітності за такими напрямками роботи навчальної частини ВНЗ:

- облік та закріплення навчальних дисциплін за кафедрами;
- розподіл навчальних дисциплін для теоретичної підготовки об'єднаних академічних потоків із різних спеціальностей (спеціалізацій);
- облік академічних потоків, груп і лабораторних підгруп;
- розрахунок кількості ставок професорсько-викладацького складу;
- розрахунок навчального навантаження кафедр у залежності від складу НПП кафедр, форми навчання та фінансування;
- автоматизація аналізу та формування звітної інформації для друку по всім видам розрахунків» [7].

Аналогічний функціонал також є й у системі АС «Деканат» [8]. Можливостями функціонала щодо задачі, яка розглядається, є:

- розробка навчальних, робочих планів на навчальний рік, закріплення навчальних груп за планами;
- генерація та відновлення робочих навчальних планів за навчальними планами;
- закріплення контингенту для навантаження по робочим навчальним планам;
- навантаження кафедр: агрегація та розподілення викладачами;

- індивідуальний план викладача кафедри.

Таким чином, приклади автоматизації зазначеного процесу є в наявності. Але при цьому, як показує вивчення джерел, тільки декларується наявність системи автоматизації ПНН (повністю або частково), але не представлені алгоритми, які реалізовані у програмному забезпеченні таких систем, і які обмеження при цьому визначені. Це все має бути, інакше виникне питання, а чи правильно функціонує та чи інша система? Пошук ресурсів, які б могли прояснити ці питання, не дав потрібних результатів.

Також можна стверджувати, що відсутність чітко визначених алгоритмів розрахунків створює передумови для того, що принципи розрахунків, проведені у різних структурних підрозділах, будуть відрізнятися. Особливо для крупних ЗВО, до складу яких входить велика кількість університетів.

Мега роботи. Відсутність опису алгоритмів функціонування систем автоматизованого формування навчального навантаження відкриває шлях для вільної імплементації алгоритмів розрахунків при розробці відповідного програмного забезпечення. З урахуванням того, що мова йде про задачу, яка має вирішуватись одним способом у межах всієї країни, необхідно чітко визначити компоненти опису базових понять для представлення предметної області задачі та алгоритми реалізації процесу обробки відповідно до нормативних документів, при цьому виключаючи неоднозначну інтерпретацію положень, наведених в них. Наявність формалізованого опису стане важливим кроком до відпрацювання єдиного підходу до вирішення типового завдання всіма причетними виконавцями. В основних розділах роботи виносяться на розгляд варіант формалізованого опису базових понять та принципів реалізації окремих етапів розробки плану навчального навантаження НПП на кафедрі закладу вищої освіти України.

1. Розробка доменної моделі процесу підготовки плану навчального навантаження науково-педагогічних працівників.

Доменна модель (або концептуальна модель) представляє собою набір суттєвостей (Entity) і відносин (Relationships) між ними [9]. Їх перелік представлений у табл. 1. При побудові даного переліку використані відомості, наведені у [10]. Деякі суттєвості, зокрема поняття «навчального потоку», були введені після узгодження із безпосередніми виконавцями розрахунків, що розглядаються.

Кожна суттєвість характеризується набором атрибутів. Перелік атрибутів для кожної суттєвості пропонується нижче.

Факультет F може бути представлений кортежем:

$$F = \langle NameF, SNameF, CodF \rangle,$$

де $NameF$ – назва факультету;

$SNameF$ – скорочена назва факультету;

$CodF$ – код факультету, який використовується для кодування документів різного призначення, зокрема навчальних планів.

Таблиця 1 – Суттєвості доменної моделі

Ім'я суттєвості	Позначення	Ім'я суттєвості українською	Коментар
Faculty	F	Факультет	Структурний підрозділ ЗВО, що об'єднує не менш як три кафедри та/або лабораторії, які в сукупності забезпечують підготовку не менше 200 здобувачів вищої освіти
Department	Dep	Кафедра	Базовий структурний підрозділ ЗВО, що провадить освітню, методичну та/або наукову діяльність за певною спеціальністю (спеціалізацією) чи міжгалузевою групою спеціальностей
Specialty	S	Спеціальність	Предметна область освіти і науки, яка об'єднує споріднені освітні програми
Group	G	Група	Навчальна група, яка створюється із студентів одного факультету при наборі. Навчальна група навчається за певним навчальним планом
Student	St	Студент	Особа, що навчається у складі групи (тільки однієї групи), а також персонально виконує кваліфікаційні (курсіві та дипломні) роботи
Study plan	SP	Навчальний план	Розробляється для підготовки бакалаврів або магістрів по певній спеціальності
Discipline	D	Дисципліна	Навчальні дисципліни, що вивчаються студентами відповідно до навчальних планів
Discipline of SP	DSP	Дисципліна НП	Деталі вивчення дисципліни згідно певного навчального плану
Block of disciplines for free student choice	SCB	Блок дисциплін вільного вибору	Блок дисциплін, які вивчаються тільки частиною
Lecture	L	Лекції	Вид навчального заняття, на якому вчитуються основні теоретичні положення дисципліни; проводиться для студентів, що навчаються за напрямом або спеціальністю
Practice	Pr	Практика	Лабораторні та практичні заняття, виробничі, переддипломні та інші практики
Qualification Work	QW	Кваліфікаційна робота	Курсові, дипломні бакалаврські та магістерські роботи
Teacher	T	Викладач	Професори, доценти, старші викладачі, викладачі, асистенти, що залучені до проведення лекційних та практичних занять, керівництва кваліфікаційними роботами
Group for classes	GC	Потік для проведення занять	Організаційна одиниця, яка утворюється із академічних навчальних груп для проведення занять. Потоки визначаються на початку періоду планування. Вони можуть змінюватись з року в рік
Group for lecture	GL	Лекційний потік	Реалізація GC для випадку проведення лекцій. Зазвичай включає декілька груп. Поєднуються можуть групи з однієї спеціальності, з одного факультету, з різних факультетів. Для вибіркового дисциплінарного лекційного потоку можуть створюватись із окремих груп однієї чи різних спеціальностей
Group for practice	GP	Потік для практичних занять	Реалізація GC для випадку проведення лабораторних або практичних занять. Такі потоки містять одну групу. Але при великій кількості студентів можуть бути поділені на підгрупи. В умовах перевантаження викладачів навпаки відбувається об'єднання академічних груп в одну для скорочення сумарного часу, що відводиться для проведення занять
Group for qualification work	GQ	Потік для виконання кваліфікаційної роботи	Віртуальне поняття, що буде розглядатись для узагальнення обробки інформації. Відповідає окремому студенту, який має виконати або курсову, або дипломну роботу.

У деяких ЗВО структурною одиницею є науково-навчальний інститут. З точки зору завдання ПНН НПП можна вважати поняття «факультет» та «науково-навчальний інститут» еквівалентними.

Кафедра Dep може бути представлена кортежем:

$$Dep = \langle NameDep, SNameDep, CodDep \rangle,$$

де $NameDep$ – назва кафедри;
 $SNameDep$ – скорочена назва кафедри;
 $CodDep$ – код кафедри.

Спеціальність підготовки S можна представити таким набором:

$$S = \langle CodS, NameS \rangle,$$

де $CodS$ – номер спеціальності згідно переліку [11];
 $NameS$ – назва спеціальності.
 Група G представляється набором таких відомостей:

$$G = \langle CodG, NameG, Kst, F, S, NP, Lan \rangle,$$

де $CodG$ – шифр групи;
 F – факультет, до складу якого входить група;
 S – спеціальність підготовки;
 Kst – кількість студентів у групі;
 NP – за яким навчальним планом навчається;
 Lan – мова навчання студентів групи.

Відомі різні підходи до утворення шифрів груп. Зазвичай у шифрі групи представляється відомість про факультет або інститут, про освітню програму, за якою навчаються студенти, про рік набору або курс.

З урахуванням того, що частина навантаження передбачає закріплення певного студента за керівником для виконання атестаційних або підсумкових робіт, пропонується додати суттєвість, яка описуватиме певного студента. Студент St може бути представлений так:

$$St = \langle SN_St, FN_St, PN_St, G, SD, P, Dep \rangle,$$

де SN_St – прізвище студента (second name);
 FN_St – ім'я студента (first name);
 PN_St – по батькові (patronymic name);
 G – група, в якій він навчається.

Враховуючи, що система може зберігати та оброблювати іншу інформацію про студентів (контакти, форму навчання та відомості про оплату, дані про батьків студентів, про місце мешкання тощо), то із часом цей набір може бути скорегований.

Навчальний план SP (study plan) характеризується таким відомостями:

$$SP = \langle CodNP, S, Year, LT \in \{B, M\}, \\ Lan \in \{UA, EN\}, A \in \{true, false\} \rangle,$$

де $CodNP$ – шифр навчального плану;
 S – спеціальність підготовки студентів згідно плану;
 $Year$ – рік створення;
 LT – рівень підготовки (training level) (магістр (M) або бакалавр (B));

Lan – мова НП;

TS – термін навчання;

A – ознака актуальності.

Ознака актуальності може або вводитись, або розраховуватись на основі поточного року та року розробки навчального плану.

Дисципліна D характеризується такими відомостями:

$$D = \langle NameD, SNameD \rangle,$$

де $NameD$ – назва дисципліни;
 $SNameD$ – коротка назва дисципліни.

Перелік дисциплін має бути унікальним в межах вишу. При цьому однакові дисципліни можуть викладатись на різних кафедрах та факультетах, для різних спеціальностей, у різній кількості годин. Виходячи із цього дуже важливим є те, які години виділені на цю дисципліну в начальному плані. Тому важливим елементом і для зберігання навчальних планів, і для планування навантаження є наступна суттєвість – Discipline of SP.

Суттєвість «Дисципліна навчального плану» DSP визначає розподіл годин на викладення, звітність, місце в системі підготовки та в структурно-логічній схемі підготовки за навчальним планом. Це можна представити таким кортежем:

$$DSP = \langle D, NP, Dep, KG, KK, KC, KIW, Sem, R, IT \rangle,$$

де D – дисципліна з переліку дисциплін;
 NP – навчальний план, у складі якого розглядається дисципліна;
 Dep – кафедра, яка відповідає за проведення згідно навчального плану NP ;
 KG – кількість годин на вивчення згідно навчального плану NP ;
 KK – кількість годин на вивчення в годинах згідно навчального плану NP ;
 KC – кількість годин на проведення занять аудиторних;
 KIW – кількість годин на самостійну роботу;
 Sem – семестр вивчення;
 R – звітність (залік з оцінкою або без неї, екзамени);
 IT – тип індивідуального завдання (реферат, індивідуальне завдання, курсова робота або проєкт).

Фактично ця суттєвість відповідає рядкам навчальних планів у розділі, де представлені дані про кількість годин на вивчення.

Блок дисциплін вільного вибору SCB створюється для того, щоб виділити частину дисциплін, яка вивчається тільки частиною студентів груп. В ЗВО, на базі якого проведено дослідження процесу ПНН, такі дисципліни викладаються на 2-му та 3-му курсах. Після вибору студентами блоку дисциплін, який вони бажають вивчати, група може розділитися на декілька. Виходячи з цього для опису таких блоків необхідно мати такі відомості:

$$SCB = \langle NameB, CodB, NP, BDList \rangle,$$

де $NameB$ – шифр блоку;

$CodB$ – назва блоку;

NP – навчальний план, в рамках якого визначений блок

$BDList$ – перелік дисциплін, що входять до блоку.

Заняття, що проводяться з кожної дисципліни, поділяють на лекційні (Л), практику (лабораторні заняття (ЛЗ) та практичні заняття (ПЗ)). На вивчення кожної з них виділяється визначена кількість годин, яку треба врахувати під час визначення навчального навантаження. Також, кількість лекцій у дисциплін може залежати від навчального плану, у склад якого входить дисципліна. Також при плануванні навчальні години виділяються на керівництво виконанням та на проведення захисту кваліфікаційних робіт, таких як курсові роботи (КР), курсові проекти (КП), дипломні роботи бакалаврів (ДРБ), дипломні роботи магістрів (ДРМ). Таким чином пропонується створити типові об'єкти із полями TC – тип занять (type of classes) (Л, ЛЗ, ПЗ, КР, КП, ДРБ, ДРМ), KgD – кількість годин на проведення, DSP – дисципліна навчального плану, для якої визначається даний набір годин.

У результаті будуть отримані наступні кортежі для опису:

лекцій L :

$$L = \langle DSP, TC = Л, KgD \rangle;$$

практики Pr :

$$Pr = \langle DSP, TC = ПЗ|ЛЗ, KgD \rangle;$$

кваліфікаційних робіт QW :

$$QW = \langle DSP, TC = КР|КП|ДРМ|ДРБ, KgD \rangle.$$

Викладач T характеризується таким відомостями:

$$T = \langle SN, FN, PN, AR, SD, P, Dep \rangle,$$

де SN – прізвище;

FN – ім'я;

PN – по батькові;

AR – вчене звання (academic rank);

SD – науковий ступень (science degree)

P – посада, яку він займає (position);

Dep – кафедра, на якій він працює (department).

Потік для проведення занять GC характеризується таким відомостями:

$$GC = \langle NameGC, GList = \{G_i \in G\}, TC, Ks \rangle,$$

де $NameGC$ – умовна назва (або код) потоку;

$GList$ – набір груп, які до нього входять;

TC – тип занять, для проведення яких він створений (type of classes);

Ks – кількість студентів в потоці.

Дана суттєвість є базовою, яка визначає узагальнений елемент предметної області. На практиці розподіл визначається наступним чином:

- окремий викладач (і тільки один) призначається на читання лекцій, а також прове-

дення заліків або екзаменів, а також консультацій для них;

- для кожної групи для проведення практичних або лабораторних занять призначається окремий викладач (і тільки один), але він проводить тільки проведення практики (якщо одночасно не є лектором);
- курсові, бакалаврські та магістерські роботи виконуються індивідуально, тому відбувається закріплення одного (і тільки одного) викладача для керівництва (консультування) студента.

Цей момент достатньо важливий, тому що під час розподілу під окрему позицію слід буде виділити окремий рядок у плані навчального навантаження, крім планування розподілу курсових та дипломних – для обчислення кількості штатних посад немає необхідності знати, хто ким керує під час дипломного або курсового проектування.

Відразу слід зазначити, що найменування потоку пропонується призначати таким, щоб воно не співпадало із академічними назвами потоків, звичайно, щоб було унікальним, та відбивало зміст утворення. Наприклад, назва $JavaEEOptLect$ визначає, що потік створюється для читання вибіркового дисциплін з блоку «Розробка додатків на Java EE», а $KN-420_P$ – визначає групу для проведення практики, яка відвідує заняття без поділу на підгрупи. Визначення такої системи не повинне викликати складнощі.

Також вираз визначає, що потік можуть утворювати тільки академічні групи факультетів.

Лекційний потік GL поєднує всі групи, для яких мають бути прочитані лекції. Це можна представити у такий спосіб:

$$GL = \langle NameGC, GList = \{G_i \in G\}, TC = L, Ks \rangle.$$

Аналогічно формально представляється потік для практичних занять GP :

$$GP = \langle NameGC, GList = \{G_i \in G\}, TC = Pr, Ks \rangle$$

а також потік для виконання кваліфікаційної роботи GQ :

$$GQ = \langle NameGC, GList = \{G_i \in G\}, TC = QW, Ks \rangle.$$

Щоб показати взаємодію суттєвостей доменної моделі між собою, створено діаграму класів в Enterprise Architect (рис. 1). Розробка доменної моделі для процесу ПНН НПП, дозволяє перейти до формалізації етапів процесу формування навчального навантаження.

2. Формалізація етапів підготовки плану.

2.1. Розробка моделі формування семестрового плану.

Розробка семестрового плану полягає у підготовці узагальненого витягу дисциплін з актуальних навчальних планів, за якими кафедра має провести заняття у заданому навчальному році. При цьому для кожної дисципліни має бути представлений перелік груп, в яких будуть проведені заняття, а також розподіл годин на проведення занять.

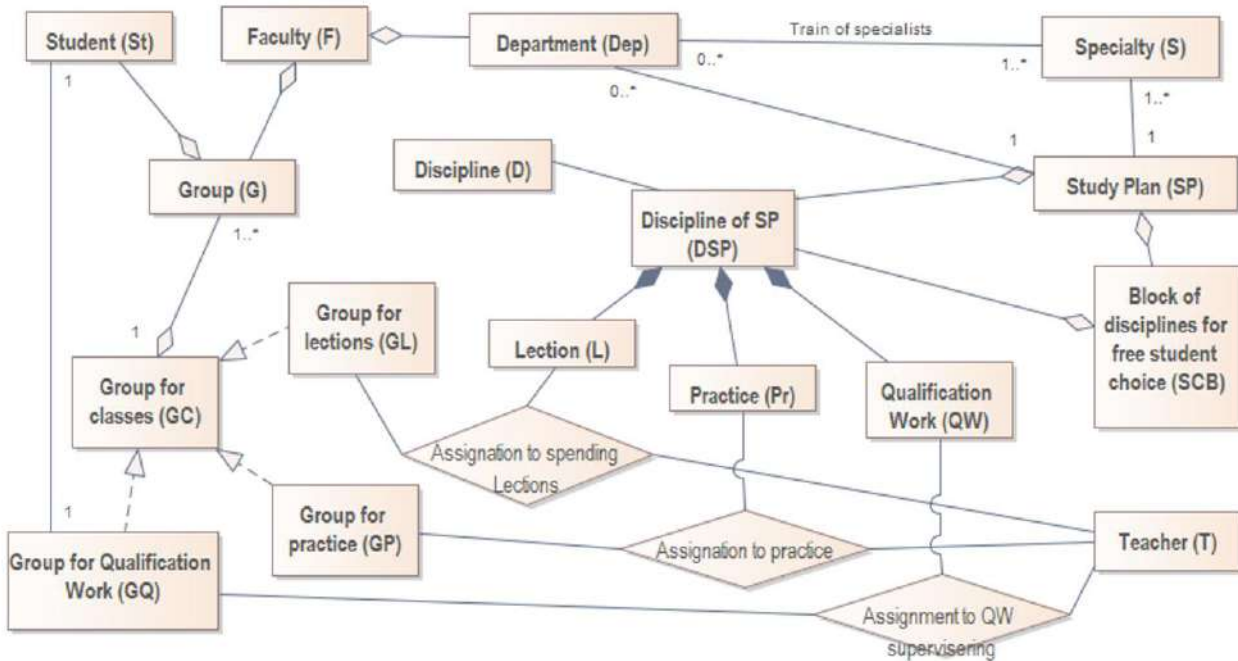


Рис. 1. Доменна модель для задачі створення плану навчального навантаження НПП кафедри

Вихідні дані. Задається навчальний рік, для якого необхідно сформувавши план навчального навантаження.

Необхідно. Сформувавши перелік дисциплін, заняття з яких повинні бути викладені НПП кафедри у заданому навчальному році. Цей документ отримав назву семестрового навчального плану.

Для планування навантаження на основі даного документу запропоновано створити базовий варіант плану навчального навантаження. У даному варіанті повинні бути представлені:

- список дисциплін із вказуванням шифру навчального плану та шифру дисципліни в цьому плані;
- номер семестру, звітність та вид індивіду-

ального завдання для виконання;

- загальна кількість часу на вивчення у годинах та кредитах;
- розподіл годин по видам занять.

Модель даного процесу представлена на рис. 2.

Для подальшого розподілу навчального навантаження НПП слід визначити навчальні потоки для проведення лекційних, практичних та лабораторних занять.

2.2. Розробка моделі процесу формування потоків для проведення занять. Формування потоків полягає у об'єднанні навчальних груп з метою оптимізації процесу навчання, а також із метою підвищення ефективності навчання, перш за все, ефективності проведення практичних видів навчання.

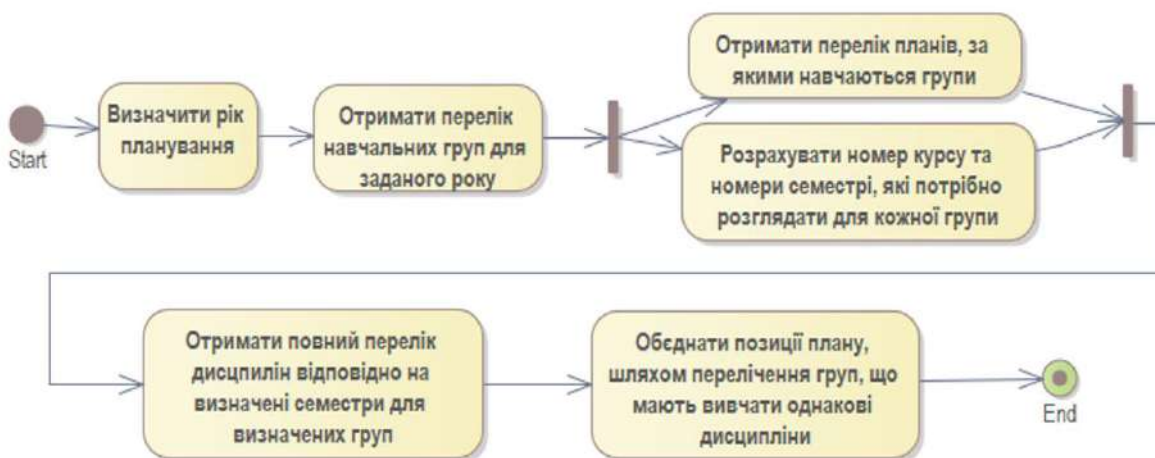


Рис. 2. Модель формування витягів з навчального плану на рік

Вихідні дані. Є перелік груп, про кожну з яких відомо шифр та шифр навчального плану, за яким група навчається. Далі можна витягти всю інформацію про спеціальність тощо.

Є перелік дисциплін, в яких є два напрями підготовки – лекції та практичні (лабораторні, практичні). До лекційних входять також консультації, екзамени або заліки.

Необхідно створити потоки для читання лекцій та потоки для проведення практичних занять.

Перш за все слід було визначитися, яким чином утворюються потоки. Ця інформація була зведена у табл. 2.

Крім представленого роз'яснення, які потоки та із ким можуть поєднуватись, слід зазначити ще декілька принципів:

- групи, що навчаються різними мовами, до одного потоку не включаються; це стосується будь-яких видів занять;
- об'єднання груп різних факультетів та різних кафедр має місце тільки для дисциплін, коли семестр викладення, кількість годин та їх розподіл по видам занять співпадають.

Поділ групи на підгрупи здійснюється виключно на практичних заняттях. Звичайно поділ йде на дві частини, але на таких дисциплінах, як англійська мова, підгруп може бути більше.

Нижче представляється варіант імплементації формування потоків. Діаграма активності UML, що візуалізує представлений алгоритм, представлена на рис. 3. Варто зазначити, що цей етап є одним з місць, який припускає поліваріантність імплементації.

1. У переліку дисциплін без потоків, вибрати дисципліну.

2. Призначити (якщо є) або створити та призначити потік для лекційних занять:

а) якщо є лекційний потік у переліку існуючих, який може бути зв'язаний із даною дисципліною, то він додається до дисципліни;

б) якщо ні, то здійснити створення:

- призначити назву (наприклад, 121L – для всіх груп спеціальностей 121, 121_122_126L для груп з математичного аналізу, JavaL – для дисциплін вільного вибору, які вивчають стек технологій Java);
- додати групи, обираючи їх з переліку груп, що зберігається у базі даних.

При створення автоматично має додаватись інформація про кількість груп, про загальну кількість студентів – ця інформація використовуються далі при розрахунку годин, тому доцільно мати можливість її отримання без зайвих витрат часу.

3. Призначити (якщо є) або створити та призначити потоки для практичних занять.

Реалізація аналогічна створенню лекційних. Прикладами назв буде КН-719_720 або КН-219аб – для потоку з двох груп, КН-219а – для однієї групи (доцільно створити потоки з однієї групи з точки зору перспективи подальшої обробки).

Окремо створюються потоки для приймання курсових, дипломних та магістерських робіт. На етапі ПНН приймання кваліфікаційних робіт достатньо представити одним потоком, в якому слід показати кількість тих, хто виконує курсові, дипломні та магістерські роботи.

Після здійснення такого розподілу може бути створений базовий план навчального навантаження. Якщо виконувати вручну, то створення цього плану відбувається на основі семестрового плану, в якому вказано перелік дисциплін. Необхідно нагадати, що в цьому плані міститься набір унікальних дисциплін. Рухаючись по створеним потокам, слід додати рядки для всіх створених потоків. Також потрібно мати на увазі, що кожен з рядків являє собою доручення для окремого викладача.

Далі в цей план додаються формули у певні комірки таблиці, а сума рядка визначить загальну кількість проведення занять.

2.3 Формалізація процесу розрахунку навчального навантаження. Розрахунок навчального навантаження полягає в тому, що для кожної позиції базового розподілу навчального навантаження обчислюється кількість годин на викладення дисципліни на основі документів [1] та [2].

Перед тим, як привести формули для обчислень слід розглянути результати розрахунків, отриманих із застосуванням Excel (рис. 4).

Слід звернути увагу, що в таблиці є рядки двох типів:

- ті, що відповідають лекціям в потоках (рядок 39 та 49);
- ті, що відповідають практичним заняттям в окремих групах, включаючи курсові роботи (усі інші стовпці).

Таблиця 2 – Особливості створення переліку навчальних потоків

Тип	Тип дисципліни	Поєднання груп з різних факультетів	Поєднання груп з різних кафедр одного факультету	Поєднання груп з різних спеціальностей однієї кафедри	Поєднання груп з однієї спеціальності однієї кафедри
Лекційний потік	Загальні	Так	Так	Так	Так
	Професійні	Ні	Так	Так	Так
	Вільний вибір	Ні	Так	Так	Так
Потік для практичних занять	Лабораторні заняття	Ні	Ні	Ні	Так
	Практичні заняття	Ні	Ні	Ні	Так

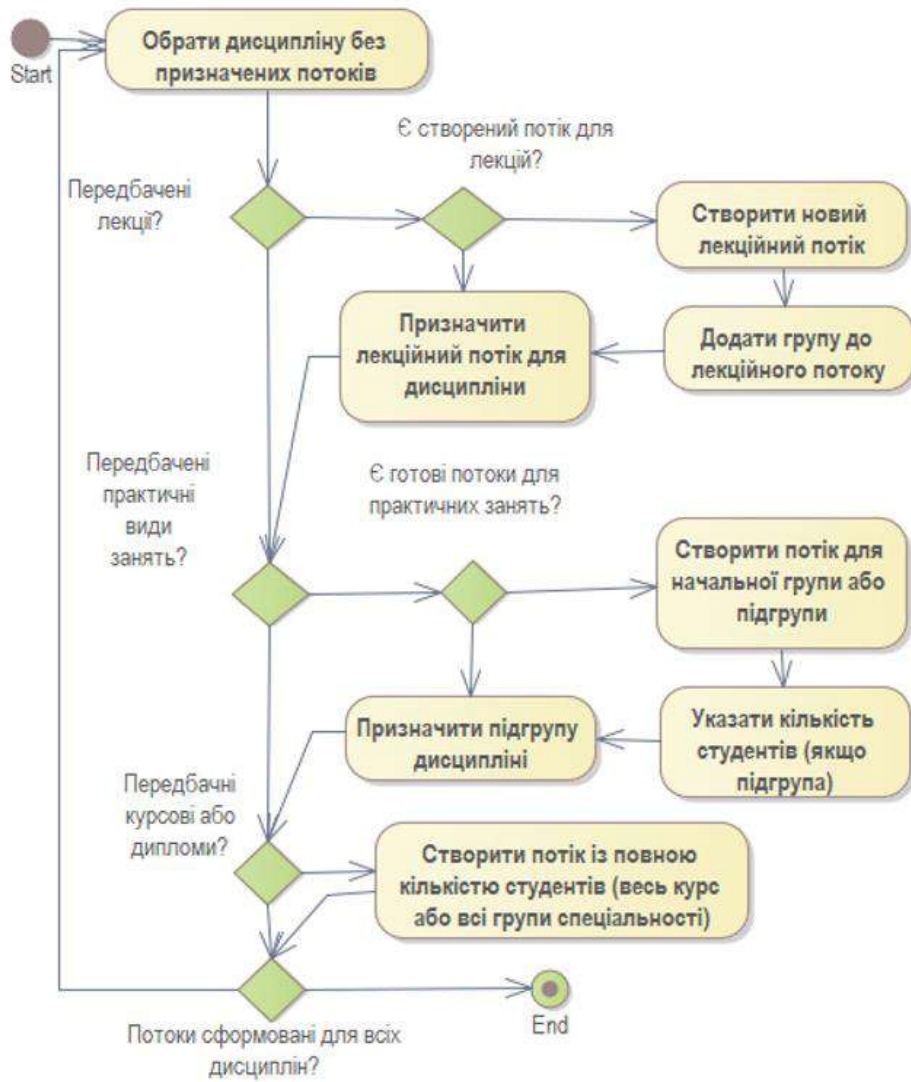


Рис. 3. Модель створення потоків та їх зв'язування із заняттями

Кафедра Програмної інженерії та інформаційних технологій управління								Факультет Комп'ютерних наук і програмної інж.										ВЕСНЯНИЙ				
№ п/п	Назва навчальних предметів і навчальних доручень	Курс	Кількість студентів	Потік	Проф. група	Кількість потоків	Кількість груп для місця прац. роботи	Розрахунок годин														
								Лекції	Консультації	Лабораторні заняття	Практичні заняття	Підготовка до самостійної роботи	Курсові проекти	Залки	Екзамени	Усього	Кількість викладачів					
38	6 Основи безпеки програм та даних	3	8	121Lab3_3	КН-219а	1	1	0	0	32	0	0	0	0	0	0	32	0,11				
39	6 Основи безпеки програм та даних (EN)	3	53	121_122EL	КН-219аа,КН-220се,КН-219іа,е,КН-219іб,е,КН-219ів,е,КН-219іа,е,КН-219іа,е	1	3	16	6	0	0	0	0	0	0	17	39	0,13				
40	6 Основи безпеки програм та даних (EN)	3	16	121_122Lab3_1	КН-219аа,КН-220се	1	1	0	0	32	0	0	0	0	0	32	0,11					
41	6 Основи безпеки програм та даних (EN)	3	31	121_122Lab3_2	КН-219іа,е,КН-219іб,е,КН-219ів,е	1	1	0	0	32	0	0	0	0	0	32	0,11					
42	6 Основи безпеки програм та даних (EN)	3	8	121_122Lab3_3	КН-219іа,е, КН-419ді,е	1	1	0	0	32	0	0	0	0	0	32	0,11					
43	7 Практичний семінар з проектування баз даних	2	16	JavaLab3_1	КН-219а	1	1	0	0	16	0	0	48	2	0	66	0,22					
44	7 Практичний семінар з проектування баз даних	2	23	JavaLab3_2	КН-419а,КН-220с	1	1	0	0	16	0	0	69	2	0	87	0,29					
45	7 Практичний семінар з проектування баз даних	2	14	JavaLab3_3	КН-719,КН-720с	1	1	0	0	16	0	0	42	2	0	60	0,2					
46	8 Архітектура та проектування програмного забезпечення (Частина 2)	3	53	JavaL3	КН-219а,КН-419а,КН-220с,КН-719,КН-720с	1	3	32	6	0	0	0	0	0	17	55	0,19					

Рис. 4. Приклад розрахунків навчального навантаження, отриманих в Excel

Таким чином, можна розглянути розрахунок навчального навантаження лектора та викладача, що веде практику.

Робота лектора включає:

- проведення лекцій в одному потоці;
- проведення консультацій перед екзаменами;
- приймання заліків або екзаменів.

Кількість лекцій в явному вигляді прописана в таблиці. На консультацію до екзамену виділяється 2 години на кожну навчальну групу. Прийняття заліку в принципі має відбуватись шляхом підбиття підсумків роботи у семестрі.

На приймання заліку відводиться 2 години на кожну групу, що входить до потоку. На приймання екзамену відводиться 0,33 година на одного студента. Таким чином, можна витрати навчального часу на роботу лектора TL у годинах можна обчислити за виразом:

$$TL = \begin{cases} KL + 2 \cdot Kgr, & \text{якщо залік;} \\ KL + 2 \cdot Kgr + 0,33 \cdot Kst, & \text{якщо іспит,} \end{cases}$$

де KL – кількість годин на читання лекцій;
 Kgr – кількість навчальних груп в потоці;
 Kst – кількість студентів у потоці.

Викладач, який веде практичні заняття або лабораторні роботи витрачає свій час виключно на проведення занять за розкладом.

Для керівництва курсовими роботами можуть виділятися декілька викладачів, але загальна кількість у будь-якому випадку буде визначатися кількістю студентів, на кожного з яких відводиться по 2 години на 1 та 2 курсах та 3 години на старших курсах.

Аналогічно обчисленню часу на керівництво курсовими роботами, час на керівництво бакалаврами та магістрами обчислюється, виходячи з кількості студентів-бакалаврів (4 курс) та кількості студентів-магістрів (5 курс). На керівництво бакалавром виділяється 14 годин на кожного, а на керівництво магістром – 27 год. Крім того, по 2 години виділяється на внутрішнє рецензування. Таким чином, можна визначити кількість годин на проведення практичних занять TPr :

$$TPr[\text{год}] = KPr,$$

де KPr – кількість годин на читання лекцій.

Кількість годин на керівництво кваліфікаційними роботами TQW буде виділено:

$$TQW = \begin{cases} 2 \cdot Kst, & \text{якщо КР на 1 та 2 курсах;} \\ 3 \cdot Kst, & \text{якщо КР на 3,4,5,6 курсах;} \\ 16 \cdot Kst, & \text{якщо ДРБ;} \\ 27 \cdot Kst, & \text{якщо ДРМ.} \end{cases}$$

Для обчислення загального обсягу навчального навантаження Tnn слід вирахувати суму всіх позицій у базовому плані робіт. Формалізовано це визначається так:

$$Tnn[\text{год}] = \sum_l TL_l + \sum_p TPr_p + \sum_q TQW_{iq},$$

де $\sum_l TL_l$ – сума годин по всіх лекційним позиціям;
 $\sum_p TPr_p$ – сума годин по всіх позиціям практичної підготовки;
 $\sum_q TQW_{iq}$ – сума годин по всіх позиціям кваліфікаційних робіт.

Завершальним етапом розрахунків є визначення кількості штатних одиниць для виконання навчального навантаження. Воно розраховується виходячи з того, що викладач має провести 600 годин протягом навчального року. Тому кількість штатних одиниць можна обчислити так:

$$KTnn[\text{осіб}] = \left[Tnn[\text{год}] / 600 \left[\frac{\text{год}}{\text{особу}} \right] \right].$$

Отримання цієї цифри завершує процес планування навчального навантаження НПП кафедри.

Висновки. Проведена розробка формалізованого опису процесу ПНН НПП кафедри ЗВО дозволяє стверджувати, що процес формалізації є гарною практикою для того, щоб розробити систему вирішення типової задачі у організації, яка відрізняється великою ієрархічною структурою, що, як наслідок, приводить до появи різних варіацій у реалізації. Наявність чіткої формальної методики вирішення задачі, представленої у зрозумілому формалізованому вигляді дозволяє упорядкувати процеси, а також забезпечити контроль за коректністю їх реалізації, а у найкращому випадку – автоматизувати, усуваючи суб'єктивні фактори.

Представлений набір моделей та формул може стати основою для однозначного визначення процесу ПНН в рамках структурного підрозділу і, навіть, вищого навчального закладу, надаючи вирішенню цієї задачі прозорості реалізації, чіткого представлення вхідних та вихідних даних, можливості обговорення принципів реалізації планування та їх вдосконалення за потреби, а також можливості організації навчання відповідних співробітників.

Також слід зазначити, що представлений формалізований опис процесу отриманий для планування навчального навантаження певної кафедри певного закладу вищої освіти. При цьому ключові цифри розрахунків отримані з нормативних документів, тому більшість виразів буде доречною до представлення розрахунків на будь-якій кафедрі будь-якого ЗВО. Відрізнятися на різних факультетах і, навіть, на різних кафедрах одного факультету, можуть моделі процесів формування навчальних потоків, розподілу занять між викладачами, принципи призначення керівників курсових та дипломних робіт. Але ж у будь-якому випадку наявність формалізованої моделі робить можливим і аналіз відповідності процесу ПНН вимогам нормативних документів, і його вдосконалення, і доведення принципів планування навчального навантаження для зацікавлених осіб.

Розробка формалізованого опису також забезпечує основу для побудови бази даних системи автот-

атизованого планування навчального навантаження, а також вихідні дані визначення системи функціональних вимог до неї. Зокрема, автоматизувати у системі розглянутого призначення можливо:

- процес формування плану навчального навантаження кафедр на навчальний рік;
- процес закріплення викладачів за дисциплінами та видами навчального навантаження, призначення керівників КР (КП) та ДР;
- процес формування відомості навчальних доручень, що відбиває чіткий розподіл навчального навантаження на навчальний рік;
- процес формування витягів з розподілу навчального навантаження у вигляді розділу «Навчальна робота» для окремих викладачів із автоматичною розсилкою електронною поштою.

Наявність переліченого функціоналу дозволить істотно скоротити час на рутинну роботу як безпосередніх учасників ПНН, так і роботу науково-педагогічних працівників під час планування їх діяльності на навчальний рік.

Список літератури

1. Про затвердження норм часу для планування і обліку навчальної роботи та переліків видів навчальної, методичної, інноваційної, наукової, організаційної роботи та іншої педагогічної діяльності педагогічних і науково-педагогічних працівників закладів фахової передвищої освіти: наказ Міністра освіти та науки України від 18.06.2021 р. № 686. URL: <https://mon.gov.ua/ua/npa/pro-zatverdzhennya-norm-chasu-dlya-planuvannya-i-obliku-navchalnoyi-roboti-ta-perelikiv-vidiv-navchalnoyi-metodichnoyi-innovacijnoyi-naukovoyi-organizacijnoyi-roboti-ta-inshoyi-pedagogichnoyi-diyalnosti-pedagogichnih> (дата звернення: 11.11.2021).
2. Положення про планування і облік основних видів роботи науково-педагогічних працівників НТУ «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ», 2021. URL: <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/metodotdel/wp-content/uploads/sites/28/2021/10/olozhennya-pro-planuvannya-ta-oblik-osnovnih-vidiv-roboti-naukovo-pedagogichnih-pratsivnikiv-NTU-HPI.pdf> (дата звернення: 10.11.2021).
3. Положення про порядок розрахунку та розподілу навчального навантаження й перелік основних видів методичної, наукової, організаційної роботи науково-педагогічних працівників Запорізького Національного університету. Запоріжжя: ЗНТУ, 2021. URL: https://sites.znu.edu.ua/navchalnyj_viddil/normativna_basa/polozhennya_pro_poryadok_rozrakhunku_ta_rozpodil_lu_navch_navantazh_j_perel_k_osnovnikh_vid_v_metod_nauk_organ_z_roboti_naukovo-pedagog_chnikh_prats_vnik_v_znu.pdf (дата звернення: 12.05.2022).
4. Автоматизована система управління навчальним процесом НТУ «ХПІ» (АСУ НП). URL: http://www.kpi.kharkov.ua/rus/wp-content/uploads/sites/3/2018/05/asu_rus.pdf (дата звернення: 20.02.2022).
5. Опис внутрішньої системи забезпечення якості освітньої діяльності у Харківському національному університеті радіоелектроніки. URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/opys-vsizio.pdf. (дата звернення: 12.05.2022).
6. Положення про систему внутрішнього забезпечення якості вищої освіти у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». URL: https://document.kpi.ua/files/2020_7-165.pdf (дата звернення: 12.05.2022).
7. Автоматизована система управління вищим навчальним закладом III-IV рівня акредитації. URL: <https://www.unitec.com.ua/products/commercial-software/> automated-system-for-higher-education-institution/ (дата звернення: 12.05.2022).
8. АС «Деканат» АСУ «ВНЗ». URL: <https://vuz.osvita.net/asu-vnz/as-dekanat/> (дата звернення: 12.05.2022).
9. Embley D., Thalheim B. *Handbook of Conceptual Modeling: Theory, Practice, and Research Challenges*. Berlin, Springer, 2011. 597 p.
10. Про вищу освіту: Закон України від 01.04.2014 р. № 1556-VII : станом на 12.05.2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18> (дата звернення: 21.05.2022).
11. Перелік галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти: станом на 07.07.2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/762-2021-%D0%BF> (дата звернення: 21.05.2022).
12. Офіційний сайт розробника Enterprise Architect. URL: <https://sparxsystems.com/> (дата звернення: 20.05.2022).

References (transliterated)

1. *Pro zatverdzhennya norm chasu dlya planuvannya i obliku navchal'noyi roboty` ta perelikiv vy`div navchal'noyi, metody`chnoyi, innovacijnoyi, naukovoyi, organizacijnoyi roboty` ta inshoyi pedagogichnoyi diyal'nosti pedagogichny`x i naukovo-pedagogichny`x pracivny`kiv zakladiv faxovoyi peredvy`shhoi osvity` : nakaz Ministra osvity` ta nauky` Ukrainy` vid 18.06.2021 r. # 686* [About approval of time norms for planning and accounting of educational work and lists of types of educational, methodical, innovative, scientific, organizational work and other pedagogical activity of pedagogical and scientific-pedagogical workers of institutions of professional higher education: order of the Minister of Education and Science of Ukraine from 18.06.2021 № 686]. Available at: <https://mon.gov.ua/ua/npa/pro-zatverdzhennya-norm-chasu-dlya-planuvannya-i-obliku-navchalnoyi-roboti-ta-perelikiv-vidiv-navchalnoyi-metodichnoyi-innovacijnoyi-naukovoyi-organizacijnoyi-roboti-ta-inshoyi-pedagogichnoyi-diyalnosti-pedagogichnih> (accessed 11.11.2021).
2. *Polozhennya pro planuvannya i oblik osnovny`x vy`div roboty` naukovo-pedagogichny`x pracivny`kiv NTU "XPI"* [Regulations on planning and accounting of the main types of work of scientific and pedagogical workers of NTU "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2021. Available at: <http://blogs.kpi.kharkov.ua/v2/metodotdel/wp-content/uploads/sites/28/2021/10/olozhennya-pro-planuvannya-ta-oblik-osnovnih-vidiv-roboti-naukovo-pedagogichnih-pratsivnikiv-NTU-HPI.pdf> (accessed 10.11.2021).
3. *Polozhennya pro poryadok rozrakhunku ta rozpodilu navchal'nogo navantazhennya j perelik osnovny`x vy`div metody`chnoyi, naukovoyi, organizacijnoyi roboty` naukovo-pedagogichny`x pracivny`kiv Zaporiz`kogo Nacional'nogo universy`tetu* [Regulations on the procedure for calculating and distributing the studyload and a list of the main types of methodological, scientific, organizational work of scientific and pedagogical staff of Zaporizhia National University]. Zaporizhia: ZNTU, 2021. Available at: https://sites.znu.edu.ua/navchalnyj_viddil/normativna_basa/polozhennya_pro_poryadok_rozrakhunku_ta_rozpodil_lu_navch_navantazh_j_perel_k_osnovnikh_vid_v_metod_nauk_organ_z_roboti_naukovo-pedagog_chnikh_prats_vnik_v_znu.pdf (accessed 12.05.2022).
4. *Avtomaty`zovana sy`stema upravlinnya navchal'ny`m procesom NTU "XPI" (ASU NP)* [Automated control system of the educational process of NTU "KhPI" (ACS NP)]. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/rus/wp-content/uploads/sites/3/2018/05/asu_rus.pdf (accessed 20.02.2022).
5. *Opy`s vnutrishn`oyi sy`stemy` zabezpechennya yakosti osvity`nyi diyal'nosti u Xarkivs`komu nacional'nomu universy`tetu radioelektroniky`* [Description of the internal system of quality assurance of educational activities at Kharkiv National University of Radio Electronics]. Available at: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/opys-vsizio.pdf. (accessed 12.05.2022).
6. *Polozhennya pro sy`stemu vnutrishn`ogo zabezpechennya yakosti vy`shhoi osvity` u Nacional'nomu texnichnomu universy`tetu Ukrainy`` «Ky`yivs`ky`j politexnichny`y insty`tut imeni Igora Sikors`kogo»* [Regulations on the system of internal quality assurance of higher education at the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky"].

- Available at: https://document.kpi.ua/files/2020_7-165.pdf (accessed 12.05.2022).
7. *Avtomatyzovana sy'stema upravlinnya vy'shy'm navchal'ny'm zakladom III-IV rivnya akredytaciyi* [Automated management system of higher educational institution of III-IV level of accreditation]. Available at: <https://www.unitex.com.ua/products/commercial-software/automated-system-for-higher-education-institution/> (accessed 12.05.2022).
 8. *AS «Dekanat» ASU «VNZ»* [AS "Dean's Office" ACS "University"]. Available at: <https://vuz.osvita.net/asu-vnz/as-dekanat/> (accessed 12.05.2022).
 9. Embley D., Thalheim B. *Handbook of Conceptual Modeling: Theory, Practice, and Research Challenges*. Berlin, Springer, 2011. 597 p.
 10. *Pro vy'shu osvitu: Zakon Ukrainy` vid 01.04.2014 r. # 1556-VII: stanom na 12.05.2022 r.* [On higher education: Law of Ukraine of 01.04.2014 № 1556-VII: as of 12.05.2022]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18> (accessed 21.05.2022).
 11. *Perelik galuzej znan` i special'nostej, za yaky'my` zdiysnyuyet'sya pidgotovka zdobuvachiv vy'shhoj osvity` : stanom na 07.07.2021 r.* [The list of branches of knowledge and specialties for which higher education students are trained: as of 07.07.2021]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/762-2021-%D0%BF> (accessed 21.05.2022).
 12. *Oficijny`j sajt rozrobny`ka Enterprise Architect* [Official site of the developer Enterprise Architect]. Available at: <https://sparxsystems.com/> (accessed 20.05.2022).

Надійшло (received) 27.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Двухглазов Дмитро Едуардович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Програмна інженерія та інтелектуальні технології управління»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3361-3212>; e-mail: ddimae72@gmail.com

Безменов Микола Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2995-2350>; e-mail: Mykola.Bezmenov@khp.edu.ua

Шматко Олександр Віталійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Програмна інженерія та інтелектуальні технології управління»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2426-900X>; e-mail: oleksandr.shmatko@khp.edu.ua

Двухглазова Альона Сергіївна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистентка кафедри «Програмна інженерія та інтелектуальні технології управління»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0111-3010>; e-mail: alona.dvukhhlavova@gmail.com

Корховий Дмитро Сергійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент-магістр; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9374-8100>; e-mail: d.korkhovyi@gmail.com

Черкун Микита Вікторович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент-магістр; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8369-1497>; e-mail: cherkunmv@gmail.com

Dvukhhlavov Dmytro Eduardovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Software engineering and management intelligent technology"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3361-3212>; e-mail: ddimae72@gmail.com

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

Shmatko Oleksandr Vitaliievych – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Software engineering and management intelligent technology"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2426-900X>; e-mail: oleksandr.shmatko@khp.edu.ua

Dvukhhlavova Alona Serhiivna – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Assistant at the Department of "Software engineering and management intelligent technology"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0111-3010>; e-mail: alona.dvukhhlavova@gmail.com

Korkhovyi Dmytro Serhiiovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Master- Student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9374-8100>; e-mail: d.korkhovyi@gmail.com

Cherkun Mykyta Viktorovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Master- Student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8369-1497>; e-mail: cherkunmv@gmail.com

С. В. ШЕВЧЕНКО

ПРО КОНЦЕПЦІЮ ВЕКТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ В ЗАДАЧАХ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ВИБОРУ

Розглядаються задачі багатокритеріального вибору з оцінками претендентів по ряду локальних критеріїв. Відомі підходи до вирішення таких задач використовують їх особливості з виділенням відповідних класів задач та ряду припущень, що значно обмежують можливості їх практичного застосування. Це використання фіксованих шкал для порівняння значень, які не відповідають реальним діапазоном величин, що зіставляються, припущення про наявність лінійних залежностей між оцінками якості та атрибутами рішень, що приймаються, про відсутність нелінійних залежностей між оцінками за локальними критеріями та значеннями параметрів варіантів рішень з різних діапазонів. Наведені обставини можуть призводити до втрати адекватності рішень, що приймаються, та викликати неприйнятні наслідки. Викладається підхід до процедур багатокритеріальної оптимізації на основі змісту оптимізації як вибору претендента рішення з кращими значеннями обраного векторного критерію у складі елементів допустимої множини рішень. Для пошуку рішення пропонується використовувати узагальнений критерій у вигляді скалярного добутку векторів, один з яких містить компонентами значення локальних критеріїв для претендента рішення, а інший є віртуальним вектором еталону цілі у заданому просторі з кращими або прогнозованими значеннями. Для порівняння претендентів пропонуються підходи до формування підмножини Парето-оптимальних рішень як сукупності рішень за узгодженими локальними критеріями, використовуючи серію поступок за локальними критеріями, що представлені математичними моделями з виділенням альтернативних варіантів зміни значень оцінок локальних критеріїв, які дозволяють формувати узгоджені рішення. Результати аналізу дозволяють використовувати підходи, що пропонуються, для формування підмножини ефективних рішень у складі підсистем підтримки прийняття рішень, що забезпечують оперативне управління динамічними процесами обслуговування та виробництва.

Ключові слова: критерії, вектори, багатокритеріальна оптимізація, локальні критерії, еталонний вектор цілі, підсистеми прийняття рішень.

S. V. SHEVCHENKO

ON THE CONCEPT OF VECTOR OPTIMIZATION IN THE TASKS OF MULTICRITERIAL CHOICE

Problems of multi-criteria choice with estimates of applicants by a number of local criteria are considered. Known approaches to the solution of such problems use their peculiarities with the allocation of the corresponding classes of problems and a number of assumptions that significantly limit the possibilities of their practical application. This is the use of fixed scales to compare values that do not correspond to real ranges of values, the assumption of linear relationships between quality assessments and decision attributes, the absence of nonlinear relationships between estimates of local criteria and parameter values of solutions from different ranges. The given circumstances can lead to the loss of adequacy of the taken decisions and cause unacceptable consequences. An approach to procedures of multi-criteria optimization based on the content of optimization as a choice of a solution applicant with the best values of the chosen vector criterion within the elements of the admissible solution set is outlined. To find a solution, it is suggested to use a generalized criterion in the form of a scalar product of vectors, one of which contains components of the values of local criteria for the solution pretender, and the other is a virtual vector of the target reference in a given space with the best or predicted values. To compare the applicants, we propose approaches to forming a subset of Pareto optimal solutions as a set of solutions by consistent local criteria, using a series of concessions on the local criteria represented by mathematical models with the allocation of alternatives to change the values of local criterion estimates, allowing the formation of consistent solutions. The results of the analysis allow us to use the proposed approaches to form a subset of effective solutions in the decision support subsystems, providing operational management of dynamic processes of service and production

Keywords: criteria, vectors, multi criteria optimization, local criteria, reference target vector, decision subsystems.

Вступ. Задачі багатокритеріального вибору формалізують процес визначення кращого варіанту, використовуючи зіставлення характеристик претендентів, що аналізуються, на основі низки критеріїв із застосуванням методів багатокритеріальної оптимізації.

Якщо для порівняння варіантів вибору використовувати простір, утворений векторами, що визначають оцінки по обраним критеріям, то підсумкові оцінки претендентів можуть бути розглянуті з позицій узагальненого критерію ефективності у вигляді вектору, в якому компонентами є оцінки по локальним критеріям.

Не втрачаючи загальності можна вважати, що за допомогою адекватних перетворень всі критерії можуть бути приведені до максимізації значень. Тоді можна запропонувати підхід до процедур багатокритеріальної оптимізації, оснований на змісті процедур оптимізації як виборі претенденту на вирішення задачі, що має кращі значення обраного векторного критерію, який визначає цільові переваги оптимізації у складі елементів допустимої множини рішень. Кращі значення векторного критерію означають, що

значення жодного із локальних критеріїв, як компонентів узагальненого критерію, не можуть бути поліпшені без погіршення значень інших критеріїв.

Постановка задачі. Напрямок оптимізації рішень, що приймаються, може бути визначено деяким вектором, значеннями компонент якого повинні бути максимальні оцінки значень локальних критеріїв відповідно до зроблених припущень, що таким чином призводить до формування простору рішень у складі доступних варіантів.

Область допустимих рішень визначається перетином підмножин для допустимих значень змінних, які визначають варіанти рішень, що приймаються, шляхом використання сукупності обмежень та/або формування допустимих значень параметрів вектору вибору у складі наявних варіантів.

Зазвичай задачі векторної оптимізації розглядаються як завдання багатокритеріальної оптимізації. При цьому виділяються окремі класи задач зі специфічними особливостями, які дозволяють застосовувати відповідні підходи та алгоритми рішень, в наслідок чого зникає їх універсальність, відбувається

втрата ознак загальності результатів і відповідності змісту концепції векторної оптимізації, оскільки її результати формуються як об'єднання рішень, кожне з яких є скалярною оптимізацією по одному з локальних критеріїв, а в інших випадках використовуються лінійні перетворення параметрів і змінних задачі з урахуванням низки припущень (лінійність, відсутність залежностей та ін.) [1].

Врахування структурних особливостей задачі багатокритеріальної оптимізації найяскравіше демонструється на підході, запропонованому Т. Сааті як метод аналізу ієрархій [2]. В результаті його застосування формується ієрархія критеріїв з використанням фіксованої шкали порівнянь та низки припущень, що дозволяють застосувати лінійні перетворення та дозволяють швидко отримати оцінку доцільності вибору варіанту рішення серед доступних альтернатив. Допущення, що використовуються у методі аналізу ієрархій, є досить спірними і часто не мають місця в практичних ситуаціях. Це ігнорування наявності критеріїв, незрівнянних між собою за важливістю, виходячи з їх змісту, використання шкали порівнянь із застосуванням набору фіксованих рівнів, однакових для всіх можливих порівнянь з ігноруванням наявності існуючих діапазонів значень, запровадження різноманіття результатів порівнянь в залежності від проведення порядку порівнянь, що призводять до появи невизначеності, ігнорування наявності нелінійних залежностей між різними діапазонами значень, що порівнюються. Однак, незважаючи на це, простота отримання оцінок та певна правдоподібність обчислень призвели до широкого поширення методу аналізу ієрархій з ігноруванням можливості отримання помилкових результатів через використання спрощених припущень [3]–[9].

У загальному випадку, початковий зміст обчислень, що вкладається в поєднання термінів «векторна оптимізація», передбачає можливість побудови процедури вибору деякого вектору із заданої підмножини, що є сукупністю варіантів векторів, допустимих для використання згідно ряду обмежень як вирішення задачі вибору найкращого варіанту серед доступних альтернатив за значенням векторного критерію.

З цією метою кожен з варіантів вирішення у вигляді вектору з допустимої множини повинен містити у складі своїх компонент складові, величини яких дозволяють порівнювати доступні варіанти вирішення за значеннями оцінок локальних критеріїв.

В роботі пропонується використання концепції векторної оптимізації з формуванням вектору цілі, який задає напрямком оптимізації, та підмножини векторів, що визначають допустимі варіанти вирішення задачі вибору. Тоді результатом вирішення задачі може бути визначення вектору з наявними оцінками характеристик варіантів вибору по локальним критеріям у складі допустимої множини за умови максимізації скалярного добутку цього вектору та вектору, що визначає цілі оптимізації. Дискретність підмножини доступних векторів задачі для вибору найкращого варіанту призводить до неприйнятності

застосування існуючих процедур оптимізації у просторі безперервних значень.

У якості локальних критеріїв можуть бути використані не тільки значення деяких цільових функцій, а також визначення стану задоволення заданим обмеженням, а також оцінки значень ступеню такого задоволення (нечіткі множини) з рівнем прийнятної величини значимості, що задається відповідно до приведення до деякої числової шкали вимірювань [10].

Таким чином, цільовий вектор може бути представлений набором локальних критеріїв оптимальності з компонентами, склад яких визначається змістом задачі, виходячи зі специфіки предметної області та умов прийняття рішень.

Зіставлення значень критеріїв різного змісту та з різними фізичними одиницями виміру можливе при перетворенні їх величини до відносних значень. Крім цього, для врахування відмінностей рівнів важливості окремих критеріїв можна використовувати процедури експертного оцінювання значень їх коефіцієнтів важливості [11].

Відповідно до концепцій, що пропонуються в роботі, а також, враховуючи наявність різних діапазонів та одиниць вимірювання значень критеріїв, різні рівні їх важливості, для отримання адекватних оцінок має сенс використовувати процедури нормування критеріїв за кращими значеннями [12].

За змістом аналізу, наведеному в роботі [13], обсяг досліджень, присвячений багатокритеріальній оптимізації та підтримці прийняття рішень, свідчить про наявність широкого кола не повністю вирішених питань, що визначають нові напрямки досліджень.

Будемо вважати, що множина допустимих рішень представлена множиною D , що складається з низки претендентів для вибору, які задані векторами X_j , $j \in J$.

Значення компонент векторів претендентів вирішення $X_j = \{x_{ij}\}$, $j \in J$, обмежені допустимими значеннями, що визначаються відповідними підмножинами. Тоді множина допустимих рішень матиме вигляд

$$D = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}: X_j = \{x_{ij}\}, x_{ij} \in G_i, i \in I, j \in J,$$

де G_i підмножина допустимих значень параметрів i -го локального критерію.

Будемо вважати, що претенденти вибору можна порівняти між собою за значеннями введених локальних критеріїв ефективності

$$\{f_i\}, i \in I = \{1, 2, \dots, m\}.$$

Кожен претендент вибору $X_j \in D$ є вектором вирішення задачі вибору $X_j = \{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}$, компоненти якого визначають значення контрольованих параметрів претендентів вирішення задачі вибору і які можуть бути оцінені локальними критеріями.

Тоді для кожного значення компонента вектору рішення $X_j \in D$ за допомогою визначеної процедури

може бути знайдено значення i -го локального критерію, $i \in I$, $q_{ij} = f_i(X_j)$, що залежить від значень відповідних компонентів вектору претендента вибору у вигляді значень його параметрів, режимів або умов функціонування відповідно до змісту задачі і допустимих величин.

В результаті цих дій може бути сформований векторний критерій якості претендента

$$Q(X_j) = \{q_{ij}\} = \{f_i(X_j)\}, X_j \in D.$$

Якщо підмножини допустимих значень не перетинаються $\forall i_1, i_2 \in I, i_1 \neq i_2 : G_{i_1} \cap G_{i_2} = \emptyset$, то визначення параметрів варіанту вибору претенденту, які забезпечують екстремальне значення кожного локального критерію, може виконуватися незалежно від проведення інших аналогічних оцінок. У такому разі загальним результатом рішення буде суперпозиція або об'єднання окремих локальних рішень.

Інакше, якщо $\exists i_1, i_2 \in I, i_1 \neq i_2 : G_{i_1} \cap G_{i_2} \neq \emptyset$, результат, який необхідно визначити відповідно до прийнятої концепції багатокритеріальної оптимізації, може бути знайдений як компромісне Парето-оптимальне рішення з урахуванням рівнів важливості окремих критеріїв.

Для визначення вирішення задачі вибору слід врахувати, що значення оцінок локальних критеріїв, перш за все, залежать від обсягів необхідних ресурсів, які визначають можливості та характеристики результатів прийняття рішень, що мають бути досягнені. Зміст таких залежностей визначається особливостями та умовами їх побудови, а їх ідентифікація може бути отримана на основі технологій дослідження операцій, системного аналізу та математичного моделювання.

Результативність векторної оптимізації варіантів прийнятих рішень можна оцінити рівнем наближення до віртуального зразка еталону вирішення задачі вибору.

Віртуальним зразком еталону вирішення може бути цільовий вектор, побудований експертним формуванням його компонент і значень, на основі кращих або прогнозованих оцінок локальних критеріїв з урахуванням їх рівнів важливості на момент прийняття рішень.

Оцінка наближення вектору поточного варіанту вирішення до вектору віртуального еталону може бути отримана в результаті скалярного добутку цих векторів.

Розглянемо m -вимірний простір, утворений локальними критеріями $\{f_1, f_2, \dots, f_m\}$. Тоді у даному просторі можна розглянути цільовий вектор F , що представлений вектором віртуального еталону.

З урахуванням прийнятих припущень та використання процедур нормалізації координати цього вектору можуть бути надані одиничними значеннями.

Тоді

$$F = \{1, 1, \dots, 1\}.$$

У результаті процес векторної оптимізації може бути подано процесом вибору кращого варіанту рішення, що приймаються, у вигляді визначення вектору вирішення задачі вибору $X^* \in D$ на основі значень узагальненого критерію у вигляді максимального скалярного добутку сформованого вектору оцінок за локальними критеріями для претендента вирішення і вектору віртуального еталону F , рис. 1:

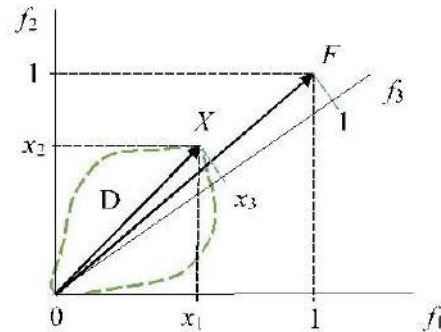


Рис. 1. Візуалізація векторної оптимізації у тривимірному просторі локальних критеріїв

Якщо виділити ресурси та їх вартості $\{\Omega_l\}$, $\{e_l\}$, $l \in L$, величини яких впливають на значення приватних критеріїв, то для пошуку Парето-оптимальних рішень необхідно отримати та використовувати функціональні залежності значень оцінок локальних критеріїв для формування компромісних рішень.

Ідентифікація залежностей $q_{ij} = f_i(X_j)$ передбачає визначення функціональної залежності впливу величин ресурсів $\rho = \{\rho_{il}\}$, $i \in I, l \in L$, що виділяються, та їх питомих вартостей $e = \{e_l\}$, $l \in L$, на значення оцінок локальних критеріїв. Тоді відповідні залежності матимуть вигляд

$$Q = \{q_{ij}\} : q_{ij} = f_i(X_j, \rho(e)), i \in I, j \in J, l \in L.$$

Вважаючи, що різні критерії мають різний рівень важливості, будемо використовувати коефіцієнти важливості $R = \{r_i\}$, $i \in I$.

В результаті, векторна оптимізація рішень, що приймаються, може бути представлена наступною задачею. Знайти

$$X^* = \arg \max_{X_j \in D, \rho} S = (RQ(X_j), F) = (\{r_i f_i(X_j, \rho(e))\}, F) \quad (1)$$

при обмеженнях

$$\sum_{i \in I} \rho_{il} \leq \Omega_l, l \in L, \quad (2)$$

$$\sum_{l \in L} e_l \sum_{i \in I} \rho_{il} \leq E, \quad (3)$$

$$X_i = \{x_{ij}\} \in D, \quad (4)$$

$$x_{ij} \in G_i, i \in I, j \in J, \quad (5)$$

$$\rho_{il} \geq 0, i \in I, l \in L, \quad (6)$$

де E – доступний обсяг фінансування;

$\rho = \{\rho_{il}\}$ – вектор, компоненти якого задають

розподіл l -го ресурсу між процедурами, що визначають значення оцінок локальних критеріїв.

Зміст виразу (1) в математичній моделі (1)–(6) в термінах багатокритеріальної оптимізації відповідає відомому виразу адитивного узагальненого критерію з однорідними локальними критеріями у вигляді відносних значень, що передбачає отримання накопичуваного сумарного ефекту. Отриманий вираз свідчить про інваріантність наведеної процедури, що використовується для пошуку компромісних рішень з адитивним узагальненим критерієм.

В загальному випадку отримання оптимальних значень оцінок локальних критеріїв під час вирішення задачі (1)–(6) є самостійним завданням, вирішення якого залежить від особливостей предметної області. Однак можна виділити деякі загальні чинники, що визначають значення локальних критеріїв, використання яких може бути застосовано для визначення компромісних рішень.

Серед них насамперед слід назвати наявність доступних варіантів змін розглянутих претендентів рішення $P = \{P_i\}, i \in I$, які можуть відобразитися у структурі та складі технологій, що використовуються, або організації функціонування, які мають певну вартість і забезпечують відповідні значення локальних критеріїв. Крім цього, слід враховувати доступні обсяги фінансування варіантів змін.

Тоді постає задача розподілу обсягів фінансування для реалізації варіантів зміни стану претендентів, що аналізуються, і які забезпечують максимізацію значень локальних критеріїв та узагальненого критерію при обмеженні на обсяг фінансування.

Позначимо A_{ijp} – вартість p -го варіанту зміни j -го претенденту для забезпечення значення i -го локального критерію, β_{ijp} – оцінка очікуваного значення i -го критерію при використанні p -го варіанту зміни j -го претенденту, $p \in P, i \in I, A_0 \geq E$ – доступний обсяг фінансування варіантів змін.

Будемо вважати, що $\forall j \in J$ та $\forall i \in I$ елементи множини $p \in P$ проіндексовані за зростанням значень.

Введемо логічні змінні $\{y_{ijp}\}$: $y_{ijp} = 1$, якщо використовується p -й варіант, і $y_{ijp} = 0$ в іншому випадку, $p \in P, i \in I$.

В результаті може бути розглянута серія наступних задач $k = 1, 2, \dots$ для визначення нових значень локальних критеріїв з рівноважними станами, використовуючи поступки та зміни розподілу ресурсів.

Знайти $Y = \{y_{ijp}\}$, що забезпечує

$$\max G = \sum_{i \in I} r_i \sum_{j \in J} \sum_{p \in P^{(k)}} \beta_{ijp} y_{ijp} \quad (7)$$

при обмеженнях

$$\sum_{p \in P^{(k)}} y_{ijp} \leq 1, i \in I, j \in J, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P^{(k)}} A_{ijp} y_{ijp} \leq A_0, \quad (9)$$

$$y_{ijp} \in \{0, 1\}, i \in I, j \in J, p \in P^{(k)}. \quad (10)$$

В математичній моделі задачі (7)–(10) використовуються додаткові позначення:

$$P^{(k)} = P^{(k-1)} \setminus \{p \in P : y_{ijp}^{*(k-1)} = 1\},$$

де $\{y_{ijp}^{*(k-1)}\}$ – розв'язання задачі (7)–(10) на $(k-1)$ -й ітерації;

$P^{(0)}$ – вихідна множина введених варіантів змін.

Висновки. Порівняння варіантів вибору альтернатив в підсистемах підтримки прийняття рішень потребує застосування методів багатокритеріальної оптимізації, які мають забезпечити прозоре обґрунтування оцінок рішень, що приймаються, з позицій введених локальних критеріїв з формуванням загальної оцінки якості претендентів вирішення задачі вибору. Існуючі підходи до формування загальної оцінки варіантів вибору орієнтовані на використання наявних особливостей виділених класів задач і втрачають ефективність при порушенні прийнятих припущень, які не виконуються для ряду практичних ситуацій. Запропонований підхід та математичні моделі дозволяють формувати оцінки рішень, що приймаються, використовуючи логічне обґрунтування обчислень з використанням векторної оптимізації рішень в задачах багатокритеріального вибору.

Застосування процедур формування оцінок варіантів вибору в підсистемах підтримки прийняття рішень, що пропонуються в роботі, дозволяє формувати підмножини Парето-оптимальних рішень, інтегрувати результати розрахунків з іншими процедурами, підвищуючи рівень їх достовірності та стійкості, що сприяє зростанню адекватності розрахунків умовам прийняття рішень. Результати аналізу дозволяють використовувати підходи, що пропонуються, для формування підмножини ефективних рішень у складі підсистем підтримки прийняття рішень, що забезпечують оперативне управління динамічними процесами обслуговування та виробництва [14].

Список літератури

1. Podinovski V. V. Potential optimality in multicriterial optimization. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2014. Vol. 54. P. 429–438.
2. Саати Т. *Прийняття рішень. Метод аналізу ієрархій* / Пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.
3. Євстрат Д. І., Кушнерук Ю. І. Застосування методу аналізу ієрархій для оцінки маркетингової активності торговельних

- підприємств. *Проблеми економіки*. 2012. № 2. С. 66–71. URL: https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2012-2_0-pages-66_71.pdf (дата звернення: 15.05.2022).
4. Нісфоян С. С., Сисолина Н. П., Савеленко Г. В. Розвиток методу аналізу ієрархій як механізму вибору інвестиційного проекту на підприємстві. *Центральноукраїнський науковий вісник. Економічні науки*. 2020. Вип. 5(38). С. 228–237.
 5. Ершова Н. М. Принятие решений на основе метода анализа иерархий. *Вісник Придніпровської держ. акад. буд-ва і архітектури*. 2015. № 9 (210). С. 39–45.
 6. Кульчицька Х. Б., Предко Л. С. Застосування методу аналізу ієрархій при виборі проекту поліграфії. *Поліграфія і видавнича справа*. 2018. № 1. С. 51–60.
 7. Трунова О. В. Застосування методу Саати при прийнятті управлінських рішень. *Вісник Чернігівського національного педагогічного університету. Педагогічні науки*. 2013. Вип. 108.1. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VchdpuP_2013_1_108_34 (дата звернення: 19.11.2020).
 8. Бадюл М. Г., Крамаренко В. А. Застосування методу аналізу ієрархій у проектуванні та будівництві. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування*. 2013. Вип. 70. С. 27–35.
 9. Чибісов Ю. В., Шульга Ю. С. Застосування методів багатокритеріальної оптимізації для вирішення задачі розподілу вагонів по вантажним фронтам. *Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна «Транспортні системи та технології перевезень»*. 2014. Вип. 7. С. 65–72.
 10. Андриевская Н. В., Резников А. С., Черанев А. А. Особенности применения нейро-нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления. *Фундаментальные исследования*. 2014. Ч. 7, № 11. С. 1445–1449.
 11. Podinovski V. V., Podinovskaya O. V. An approach of the criteria importance theory to decision making problems with hierarchical criterial structures. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2014. Vol. 48, № 1. P. 1–5.
 12. Odu G. O., Charles–Owaba O. E. Review of Multi–criteria Optimization Methods – Theory and Applications. *OSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. Vol. 3. Issue 10. 2013. P. 1–14.
 13. Bronevich A. G., Rosenberg I. N. Applying models of imprecise probabilities in the mathematical theory of criteria importance. *Automation and Remote Control*. 2017. Vol. 78. P. 1460–1473.
 14. Nelyubin A. P., Podinovski V. V., Potapov M. A. Methods of criteria importance theory and their software implementation. *Conference proceedings «Computational Aspects and Applications in Large–Scale Networks»*. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. 2018. Vol. 247. P. 189–196.
 4. Nisfoian S. S., Sysolina N. P., Savelenko H. V. Rozvytok metodu analizu iierarkhii yak mekhanizmu vyboru investytsiinoho proiektu na pidpriemstvi [Development of the method of analysis of hierarchies as a mechanism for choosing an investment project in the enterprise]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Ekonomichni nauky* [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Economic sciences]. 2020, issue 5(38), pp. 228–237.
 5. Ershova N. M. Pryniatyte reshenyi na osnove metoda analiza yerarkhyi [Decision making based on the hierarchy analysis method]. *Visnyk Prydniprovskoi derzh. akad. bud–va i arkhitektury* [Bulletin of the Dnieper State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2015, no. 9 (210), pp. 39–45.
 6. Kulchytska Kh. B., Predko L. S. Zastosuvannia metodu analizu iierarkhii pry vybori proektu polihrafii [Application of the method of analysis of hierarchies when choosing a printing project]. *Polihrafia i vydavnycha sprava* [Printing and publishing]. 2018, no. 1, pp. 51–60.
 7. Trunova O. V. Zastosuvannia metodu Saati pry pryiniatti upravlynskykh rishen [Application of Saati method in making managerial decisions]. *Visnyk Chernihivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu. Pedahohichni nauky* [Bulletin of Chernihiv National Pedagogical University. Pedagogical sciences]. 2013, vyp. 108.1. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VchdpuP_2013_1_108_34 (accessed: 19.11.2020).
 8. Badiul M. H., Kramarenko V. A. Zastosuvannia metodu analizu iierarkhii u proiektuvanni ta budivnytstvi [Application of the method of hierarchy analysis in design and construction]. *Budivnytstvo, materialoznavstvo, mashynobuduвання* [Construction, materials science, mechanical engineering]. 2013, vyp. 70, pp. 27–35.
 9. Chybisov Yu. V., Shulha Yu. S. Zastosuvannia metodiv bahatokryterialnoi optymizatsii dlia vyrishennia zadachi rozpodilu vahoniv po vantazhnym frontam [Application of multicriteria optimization methods to solve the problem of distribution of cars on freight fronts]. *Zbirnyk naukovykh prats DNUZT im. akad. V. Lazariana «Transportni systemy ta tekhnologii perevezenn»* [Collection of scientific works of DNUZT named after acad. V. Lazaryan «Transport systems and transportation technologies»]. 2014, vyp. 7, pp. 65–72.
 10. Andriyevskaya N. V., Reznikov A. S., Cheranav A. A. Osobennosti primeneniya neyro–nечetkikh modeley dlya zadach sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya [Features of the application of neuro–fuzzy models for the synthesis of automatic control systems]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Basic research]. 2014, part. 7, no. 11, pp. 1445–1449.
 11. Podinovski V. V., Podinovskaya O. V. An approach of the criteria importance theory to decision making problems with hierarchical criterial structures. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*. 2014, vol. 48, no. 1, pp. 1–5.
 12. Odu G. O., Charles–Owaba O. E. Review of Multi–criteria Optimization Methods – Theory and Applications. *OSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. 2013, vol. 3, issue 10, pp. 1–14.
 13. Bronevich A. G., Rosenberg I. N. Applying models of imprecise probabilities in the mathematical theory of criteria importance. *Automation and Remote Control*. 2017, vol. 78, pp. 1460–1473.
 14. Nelyubin A. P., Podinovski V. V., Potapov M. A. Methods of criteria importance theory and their software implementation. *Conference proceedings «Computational Aspects and Applications in Large–Scale Networks»*. Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, 2018, vol. 247, pp. 189–196.

References (transliterated)

1. Podinovski V. V. Potential optimality in multicriterial optimization. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2014, vol. 54, pp. 429–438.
2. Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York, McGraw–Hill Publ., 1980. 287 p. (Russ. ed.: Saaty T. Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy. Moscow, Radyo y svyaz Publ., 1993. 278 p.).
3. Yevstrat D. I., Kushneruk Yu. I. Zastosuvannia metodu analizu iierarkhii dlia otsinky marketynhovoї aktyvnosti torhovelnkykh pidpriemstv [Application of the method of hierarchy analysis to assess the marketing activity of commercial enterprises]. *Problemy ekonomiky* [Problems of the economy]. 2012, no. 2, pp. 66–71. Available at: https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2012-2_0-pages-66_71.pdf (accessed: 15.05.2022).

Надійшла (received) 20.05.2022

Відомості про автора / About the Authors

Шевченко Сергій Васильович – кандидат технічних наук, професор НТУ «ХПІ», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3831-5425>; e-mail: serhii.shevchenko@khi.edu.ua

Shevchenko Sergiy Vasyliovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), Professor of NTU "KhPI", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Software Engineering and Intelligent Technology Management; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3831-5425>; e-mail: serhii.shevchenko@khi.edu.ua

МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 519.246.8

DOI: 10.20998/2079-0023.2022.01.08

О. А. ГАЛУЗА, О. В. КОСТЮК, А. О. НИКУЛЬЧЕНКО, О. Б. АХІЄЗЕР, М. О. АСЛАНДУКОВ

МОДЕЛЬ НА ОСНОВІ ШАБЛОНІВ ДЛЯ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ КІЛЬКОСТІ ТРАНЗАКЦІЙ У РОЗДРІБНИХ МАГАЗИНАХ ОДЯГУ

Отримання прогнозних значень показників з урахуванням історичних даних, що представлені часовими рядами, відіграє вирішальну роль у прийнятті бізнес-рішень у різних галузях. Однією з таких сфер застосування є задача передбачення кількості транзакцій у fashion-магазинах роздрібною мережі з метою оптимального планування робочого часу працівників та досягнення максимального задоволення покупців якістю обслуговування. Вибір відповідної моделі прогнозування часових рядів залежить від горизонту прогнозу, а також характеристик часового ряду, а саме тренду, сезонності, циклічності та нерегулярності. Традиційні методи аналізу та прогнозування часових рядів призначені для обробки однієї сезонності в часовому ряду, але за наявності множинної сезонності ці методи не працюють задовільно. Застосування методів декомпозиції часового ряду характеризується обчислювальною складністю. Використання методів машинного навчання також не завжди є доцільним з низки різноманітних причин. Таким чином, необхідно використовувати прості адаптивні моделі, на основі вибраних шаблонів, для прогнозування сезонних даних складної структури, що повторюються. Основна мета цієї статті – розробити успішну адаптивну модель та запропонувати методи її використання для короткострокового прогнозування кількості транзакцій на основі даних у вигляді часових рядів. Для цілей оцінки використовується набір погодинних рядів кількості покупців (транзакцій) деяких магазинів роздрібною мережі, що характеризуються множинною сезонністю. Результати обчислювальних експериментів показують, що запропонована модель на основі шаблонів є досить ефективною для отримання короткострокових прогнозних значень. Ця модель, що характеризується простотою, інтуїтивною зрозумілістю і мінімальним числом параметрів, фактично може бути застосована до будь-якої області даних, представлених часовими рядами.

Ключові слова: кількість транзакцій, часові ряди, модель на основі шаблонів, методи короткострокового прогнозування, прогнозування числа покупців, адаптивна прогнозна модель.

О. А. HALUZA, O. V. KOSTIUK, A. O. NIKULCHENKO, O. B. AKHIEZER, M. O. ASLANDUKOV

TEMPLATE-BASED MODEL FOR SHORT-TERM FORECASTING OF THE NUMBER OF TRANSACTIONS IN RETAIL CLOTHING STORES

Obtaining predictive values of indicators based on historical data represented by time series plays a crucial role in making business decisions in various industries. One of these areas of application is the task of predicting the number of transactions in retail stores in order to optimally plan the working hours of employees and achieve maximum customer satisfaction with the quality of service. The choice of an appropriate time series forecasting model depends on the forecast horizon, as well as the characteristics of the time series, namely trend, seasonality, cyclicity, and irregularity. Traditional time series analysis and forecasting methods are designed to handle a single seasonality in a time series, but in the presence of multiple seasonality, these methods do not work satisfactorily. The use of time series decomposition methods is characterized by computational complexity. The use of machine learning methods is also not always advisable for a number of different reasons. Thus, it is necessary to use simple adaptive models, based on selected patterns, for recurring seasonal data of complex structure. The main goal of this article is to develop a successful adaptive model and propose methods for using it for short-term forecasting of the number of transactions based on time series data. For estimation purposes, a set of hourly time series of the number of customers (transactions) of some retail chain stores, characterized by multiple seasonality, is used. The results of computational experiments show that the proposed template-based model is quite effective for obtaining short-term predictive values. This model, characterized by simplicity, intuitiveness and a minimum number of tuning parameters, can actually be applied to any area of data represented by time series.

Keywords: number of transactions, time series, pattern-based model, short-term forecasting methods, customer number forecasting, adaptive forecasting model.

Вступ. Моделювання часових рядів є активною областю досліджень. Багато галузей, таких як бізнес, енергетика, наука, медицина і т. д., використовують моделювання часових рядів для прогнозування майбутніх значень, щоб потім використовувати їх для прийняття рішень.

Вибір методу прогнозування значною мірою обумовлений попереднім аналізом характеристик часового ряду та підбором відповідної моделі. Модель

прогнозування часових рядів, як правило, має чотири складові: тренд, циклічну, сезонну та випадкову. Тренд характеризує довгострокову тенденцію. Циклічна складова відноситься до більш тривалих циклів, ніж сезонні складові, а випадкова складова не відповідає жодному з трьох перерахованих вище класів [1, 2]. Сезонність відноситься до передбачуваних і повторюваних тенденцій і закономірностей протягом певного періоду часу. Повторення шаблону може бути днем,

тижнем, місяцем, кварталом і т. д. Ці сезонні коливання відіграють важливу роль у прийнятті управлінських рішень.

Вибір відповідної моделі (методики) прогнозування часових рядів залежить від горизонту прогнозу, а також характеристик часового ряду, зокрема наявності наступних компонентів: тренду, сезонності, циклічності та нерегулярності. Традиційні методи статистичного аналізу та прогнозування часових рядів, що використовують різноманітні регресійні та авторегресійні моделі, такі як ARIMA, SARIMA і т. д., успішно використовуються для моделювання одновимірних часових рядів, але вимагають проведення ретельного аналізу та присутності дослідника, до того ж містять досить велику кількість настроюваних параметрів. За наявності множинної сезонності ці методи не працюють задовільно.

Методи (SSA або Singular Spectrum Analysis або «гусениця» [3, 4], Adaptive harmonic components detection and forecasting [5, 6, 7]), що передбачають декомпозицію вихідного часового ряду на складові, які можна описати стандартними математичними функціями, успішно працюють для даних в галузі техніки, фізики, а також біології, але не завжди ефективні для опису економічних явищ. Зазначені методи характеризуються обчислювальною складністю і потребують постійної присутності дослідника. Підходи, що засновані на використанні методів машинного навчання та штучних нейронних мереж [8, 9], є досить популярними в даний час, але отримані результати не є прозорими, а необхідність одночасного настроювання та подальшої адаптації іноді кількох тисяч однотипних моделей є витратною щодо ресурсів.

Окремо можна вказати клас моделей, що використовують для опису часового ряду шаблони на основі послідовності історичних даних цього ж ряду певної довжини. Такі шаблони не вимагають ідентифікації та пошуку композиції складних математичних функцій, а також розв'язання окремої задачі настроювання параметрів цих функцій та перевірки їхньої адекватності. Самі шаблони містять мінімально можливу кількість настроюваних параметрів і, в окремих випадках, дозволяють відразу ж визначитися з довжиною та формою. Їх також можна адаптивно настроювати відповідно до надходження поточної інформації, при цьому обчислювальна складність є невеликою. Ефективність використання подібного підходу для прогнозування сезонних даних складної структури, що повторюються, показана дослідниками при прогнозуванні часових рядів, зокрема, в галузі електроенергетики [10], медицини [11].

У сучасному світі часові ряди зі складною сезонною закономірністю – звичайне явище. Наприклад, погодинне або щоденне споживання електроенергії, кількість транзакцій, що здійснюються покупцями, швидкість надходження дзвінків у кол-центри і т. д. не мають періодичної сезонності, а містять динамічну сезонність. Враховуючи цей факт, метою цієї статті є розробка простої та ефективної моделі часового ряду з використанням шаблонів для отримання короткострокового прогнозу, а також розробка методики побудови

шаблону та його адаптивного настроювання [12]. Розроблена модель була протестована на даних погодинних рядів кількості покупців (транзакцій) деяких fashion-магазинів великої роздрібною мережі.

Постановка задачі. У загальному вигляді поставлена вище задача може бути сформульована наступним чином. Нехай є статистичні дані про сумарну кількість транзакцій на годину по всіх касах деяких магазинів, задані часовими рядами за певний період часу з частотою 1 год. Необхідно розробити модель для прогнозування кількості транзакцій на наступну годину з метою планування зайнятості кас та/або касових працівників.

Аналіз вихідних даних. Статистика касових транзакцій магазинів представлена набором даних з 2019-10-11 19:00 до 2020-01-28 22:00 з кроком 1 годину та охоплює транзакції 778 магазинів. Погодинну динаміку транзакцій на прикладі статистики одного такого магазину (№19) представлено на рис. 1. Оскільки більшість магазинів мають аналогічні часові ряди транзакцій, всі подальші висновки ілюструватимуться даними для цього магазину.

Аналіз загальної кількості транзакцій на годину за кожним магазином показав, що графіки (режими) роботи магазинів мережі різні. Тому всі дані по окремих магазинах представлені в єдиному форматі: вказані з кроком в 1 годину, години роботи суміщені з годинами на добу: 0, 1 ... 23. Графічне представлення потоку транзакцій на добу (24 години) за досліджуваний період для обраного магазину зображено на рис. 2 (добовий потік покупців).

Графічне представлення потоку транзакцій на тиждень (7×24 години) за досліджуваний період цього ж магазину зображено на рис. 3 (тижневий потік покупців).

На рис. 4 представлений графік автокореляційної функції (АКФ) транзакцій магазину за період, що досліджується. З аналізу корелограми АКФ видно, що часовий ряд транзакцій містить явну циклічну компоненту з періодом $k=24$.

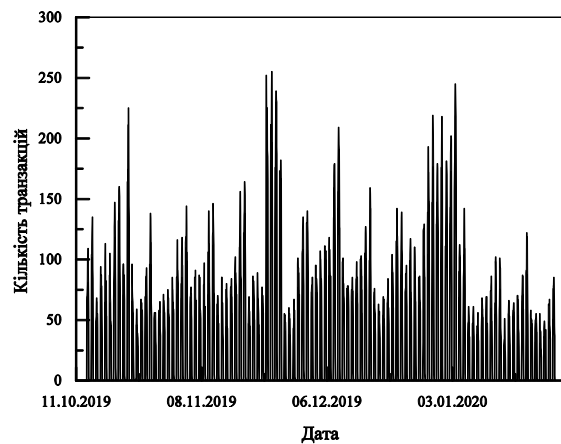


Рис. 1. Погодинна динаміка транзакцій магазину № 19

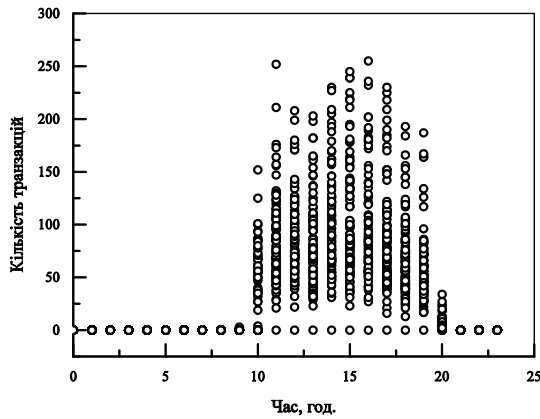


Рис. 2. Добовий потік покупців за досліджуваний період

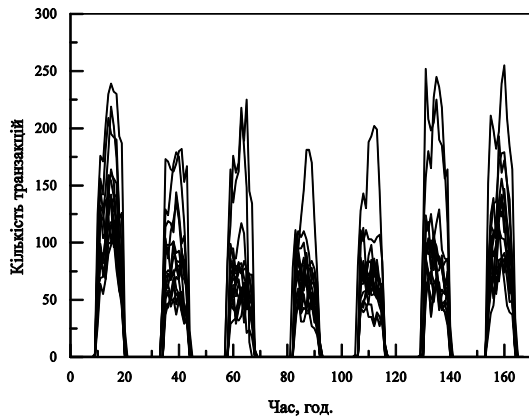


Рис. 3. Тижневий потік покупців за досліджуваний період

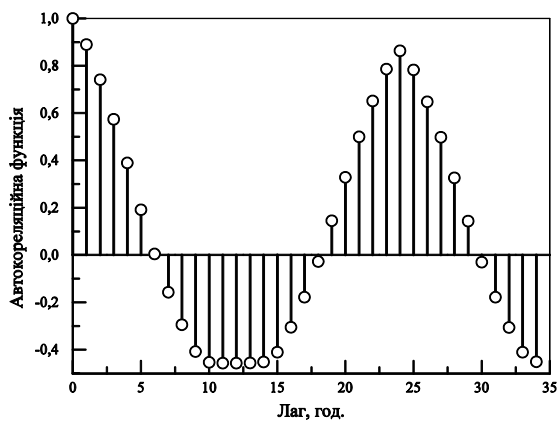


Рис. 4. Графік АКФ транзакцій за досліджуваний період

З даних рис. 1–4 випливає, що

- ряди транзакцій магазину – періодичні, обмежені за амплітудою, характеризуються посиленням амплітуди у періоди «Чорної п'ятниці» та «Нового року»;
- очевидні два періоди – добовий та тижневий (рис. 3–4);
- динаміка транзакцій по днях неоднакова.

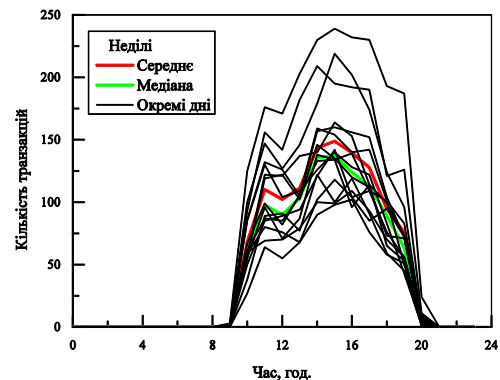
Враховуючи перелічені властивості динаміки транзакцій, використовуватимемо ідею максимальної подібності [10] для побудови моделі короткострокового прогнозування значень транзакцій. У такій моделі,

на основі шаблонів, передбачається, що якщо в деякий момент часу в минулому потік транзакцій виглядав певним чином, то в майбутньому така поведінка (така послідовність) повториться (з точністю до лінійного перетворення) у зв'язку з тим, що часовий ряд транзакцій є послідовністю вибірок або шаблонів.

Результати аналізу часових рядів. Основний висновок, отриманий в результаті аналізу часових рядів транзакцій за різними магазинами, полягає в тому, що часові ряди, що відповідають однаковим дням тижня, – якісно подібні. Основні відмінності – кількісні. Наприклад, на рис. 5 показані часові ряди, що відповідають усім неділям у зазначений період.

З рис. 5 видно, що перші три робочі години кількість транзакцій різко зростає, потім слідує незначний спад (об 11:00). Далі кількість транзакцій знову зростає до 15 години, після чого починає спадати до нуля до закриття. Така динаміка поведінки характерна й по всіх недільних днях, хоча на неї накладаються деякі випадкові компоненти.

На рис. 6 наведено аналогічні залежності для решти днів тижня. З рисунків також видно, що протягом аналізованого періоду було кілька днів (2–3 дні), у яких кількість транзакцій значно перевищувала кількість транзакцій за інші дні, хоча загальна тенденція зберігалася.

Рис. 5. Часові ряди транзакцій у магазині №19 по неділям за досліджуваний період з 11.10.2019 по 28.01.2020 (вісь x – номер години в межах доби)

Для виділення характерної добової динаміки транзакцій усі дні тижня були усереднені протягом періоду спостережень. Усереднення проводилося як середнє арифметичне (червоні лінії на рис. 5 та 6), або як медіана (зелені лінії на рис. 5 та 6) за кожну годину. Ці отримані середні значення далі називатимемо «шаблонами». Видно, що шаблон-медіана завжди лежить трохи нижче за шаблон-середнє. Це пов'язане з тим, що медіана є менш чутливою до викидів величиною, ніж середнє арифметичне.

Наявність подібних шаблонів послужило основою моделі прогнозування, описаної нижче.

Модель. В рамках запропонованої моделі прогноз на першу робочу годину збігається зі значенням шаблону за відповідну годину. Прогноз на кожну наступну годину ($i + 1$) обчислюється як значення t_{i+1}^d відповідного шаблону на цю годину, помножене на масштабний коефіцієнт k_i . Коефіцієнт k_i обчис-

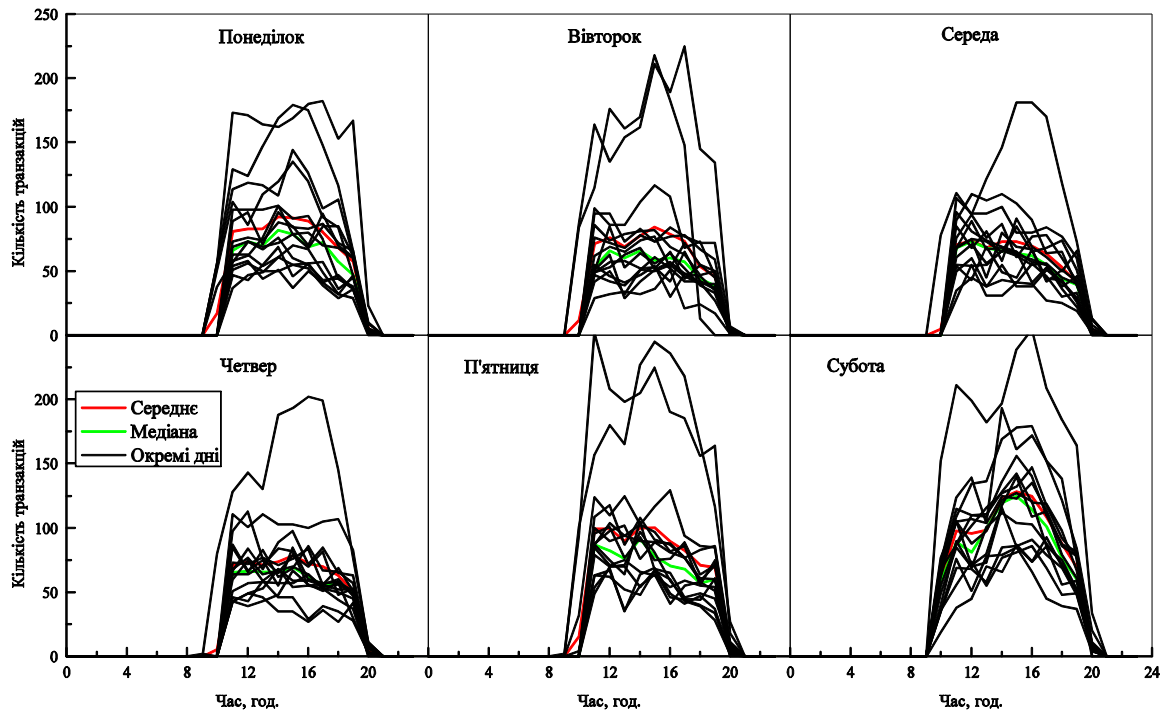


Рис. 6. Часові ряди транзакцій у магазині №19 по всіх днях тижня (крім неділі) за досліджуваний період (вісь x – номер години у межах доби)

люється як середнє відношення фактичної кількості транзакцій до шаблонних за час, що минув від початку продажів. Оскільки з кожною новою годиною k_i коригується, відбувається підстроювання шаблону до поточного дня. За межами робочого часу будемо вважати $k_i = 1$.

Запишемо наведені міркування формально. Нехай дана множина шаблонів:

$$T^d = (t_0^d, t_1^d, \dots, t_{23}^d) \quad (1)$$

де d – номер дня тижня (1 – неділя, ... 7 – субота).

Нехай p_i – фактична кількість транзакцій за i -ту годину поточного дня d . Тоді прогноз \hat{p}_{i+1}^d будемо обчислювати таким чином:

$$\hat{p}_{i+1}^d = k_i \cdot t_{i+1}^d \quad (2)$$

$$k_i = \frac{1}{N} \sum_{j \in J} \frac{p_j}{t_j^d} \quad (3)$$

$$J = \{j \leq i \cap t_j^d \neq 0\}, \quad N = \dim J.$$

Загальна модель для більшості магазинів однакова. Аналогічним чином може бути отриманий прогноз більш ніж на 1 годину вперед.

Результати роботи моделі. На рис. 7 показаний результат роботи вищеописаної моделі для неділі останнього тижня періоду, що розглядається. На рисунку наведено часові ряди фактичної кількості транзакцій (p_i), прогнозу (\hat{p}_{i+1}^d), шаблону (t_i^d) та коефіцієнта (k_i) для неділі тестового тижня.

На рис. 8 наведено аналогічні графіки для решти днів тестового тижня.

Наведені на рис. 7 та 8 результати отримані без будь-якої оптимізації параметрів моделі. Як критерій якості моделі рекомендовано максимальне абсолютне значення похибки прогнозу за тиждень (можливі й інші критерії). Цей критерій можна мінімізувати з метою підвищення якості прогнозування.

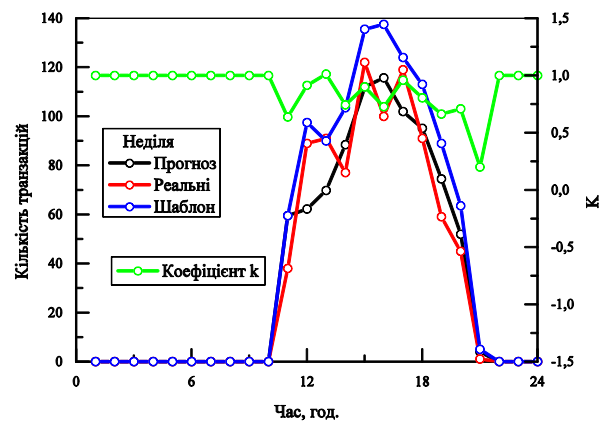


Рис. 7. Прогноз (чорна лінія), фактичні значення кількості транзакцій (червона лінія), шаблон (синя лінія) та значення коефіцієнта (зелена лінія) для неділі 2020.01.19

Таким чином, для підвищення якості прогнозування можливі наступні кроки:

- Адаптивна побудова шаблонів на підставі обмеженої передісторії.
- Адаптивне обчислення коефіцієнта на підставі обмеженої передісторії.
- Підвищення порядку моделі (побудова прогнозу на підставі більш ніж однієї точки шаб-

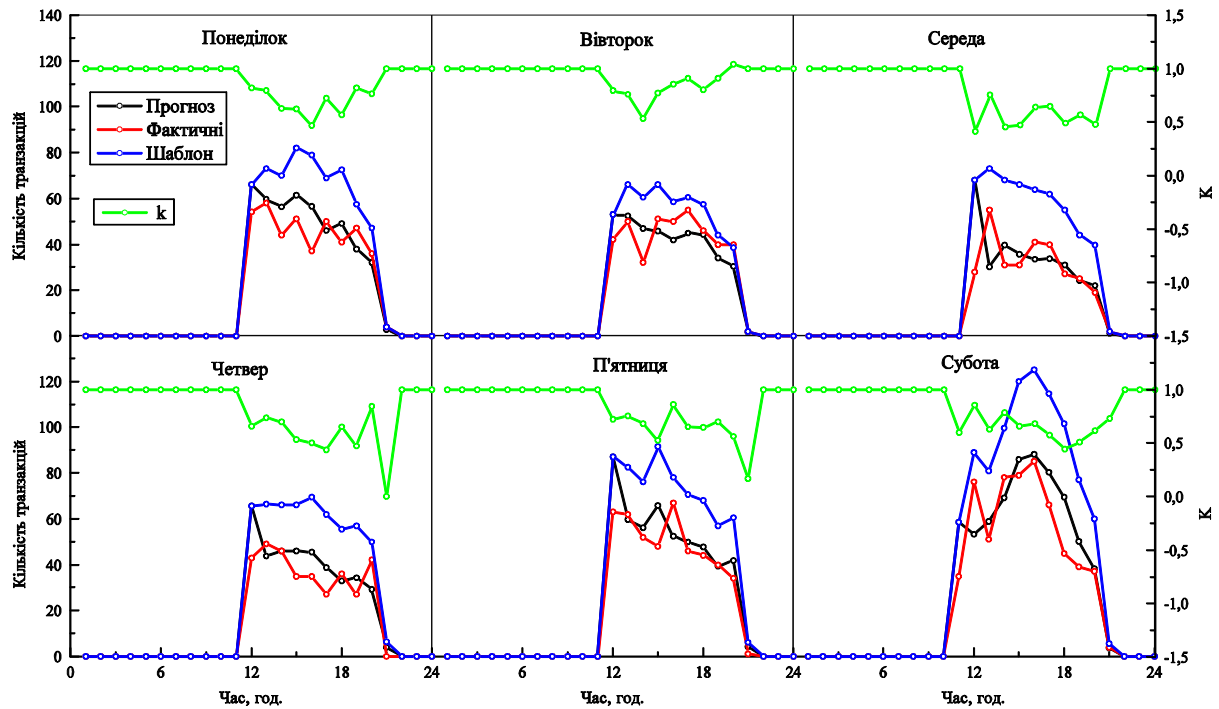


Рис. 8. Прогноз (чорна лінія), фактичні значення кількості транзакцій (червона лінія), шаблон (синя лінія) та значення коефіцієнта (зелена лінія) для понеділка–суботи тестового тижня

лону, явне урахування попередніх фактичних значень тощо).

- Використання в якості шаблону найбільш схожого з попередніх днів.
- Отримання інтервального прогнозу, а не лише точкового.
- Використання виваженого значення кількох шаблонів, побудованих за різними принципами.
- Та інші.

Висновки. У роботі розглянуто задачу побудови адаптивної прогнозує моделі кількості транзакцій у роздрібних магазинах одягу на основі шаблонів з мінімально можливим числом параметрів, коли вихідна інформація представлена у вигляді часових рядів.

Виконано попередній аналіз та уніфікацію часових рядів, виявлено добову та тижневу періодичності, які дозволили сформулювати два типи тижневих шаблонів, з використанням усереднення на основі середнього арифметичного та медіани. Отримані шаблони склали основу представленої моделі прогнозування, що містить лише один параметр.

Керуючись обраним критерієм оптимальності, виділено можливі напрями оптимізації параметрів моделі й покращення якості короткострокового прогнозу.

Показано, що отримана модель прогнозування на основі шаблонів може бути успішно використана для отримання короткострокових прогнозів кількості транзакцій fashion-магазинів за умови адаптивного настроювання її параметра та оптимального вибору виду шаблону з урахуванням наведених вище рекомендацій. Цей результат є підставою для побудови

складніших критеріїв оптимізації з метою підвищення якості прогнозування, а також може бути використаний для отримання короткострокових прогнозів у випадках часових рядів з подібною динамікою.

Список літератури

1. Naim I., Mahara T., Idrisi A. R. Effective Short-Term Forecasting for Daily Time Series with Complex Seasonal Patterns. *Proc. Comp. Sci.* 2018. Vol. 132. P. 1832–1841.
2. Снитюк В. Є. *Прогнозування. Моделі. Методи. Алгоритми.* Київ: Маклаут, 2008. 364 с.
3. Golyandina N., Usevich K. 2D-extension of Singular Spectrum Analysis: algorithm and elements of theory. *Matrix Methods: Theory, Algorithms and Applications.* World Scientific Publishing, 2010. P. 449–473.
4. Haghbin H., Najibi S. M., Mahmoudvand R., Trinkka J., Madoliat M. Functional singular spectrum analysis. *Stat.* 2021. Vol. 10, issue 1. e330.
5. Бодянский Е. В., Воробьев С. А., Костюк О. В., Любчик Л. М. Фильтрация и прогнозирование тренд-сезонных временных рядов на основе искусственных нейронных сетей. *Радиоэлектроника и информатика.* 1998. № 3. С. 76–83.
6. Xiong L., Liu X., Liu Y. Decaying DC and Harmonic Components Detection for Absorbing Impact Load Currents in Weak Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery.* 2020. Vol. 36, no. 3. P. 1907–1910.
7. Beltran-Carbajal F., Tapia-Olvera R. An adaptive neural online estimation approach of harmonic components. *Electric Power Systems Research.* 2020. Vol. 186. 106406.
8. Gheyas I. A., Smith L. S. A Neural Network Approach to Time Series Forecasting. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science.* 2009. Vol. 2177. P. 1292–1296.
9. Бодяньський Є. В., Тищенко О. К., Копаліані Д. С. Прогнозування багатовимірних нестационарних часових рядів на основі адаптивної нео-фаззі-моделі. *Комп'ютерні науки та інформаційні технології.* 2012. №744. С. 312–118.
10. Кораблев Н. М., Иващенко Г. С. Применение модели клонального отбора, использующей вывод по прецедентам, для прогнозирования временных рядов. *Бионика интеллекта.* 2013. № 1 (80). С. 108–111.

11. Hooi B., Liu S., Smailagic A., Faloutsos C. BEATLEX: Summarizing and Forecasting Time Series with Patterns. *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 10535*. Cham: Springer. P. 3–19.
12. Grinberg G. Stock market statistical data analysis for prices forecasting and trading decision support. *Proc. of int. conf. "Theory and practice of science"*. 2021. Vol.58. P. 283–288.
7. Beltran-Carbajal F., Tapia-Olvera R. An adaptive neural online estimation approach of harmonic components. *Electric Power Systems Research*. 2020, vol. 186. 106406.
8. Gheyas I. A., Smith L. S. A Neural Network Approach to Time Series Forecasting. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*. 2009, vol. 2177, pp. 1292–1296.
9. Bodyansiy Ye. V., Tishchenko O. K., Kopaliani D. S. Prognozuvannya bagatovymirnyh nestazionarnykh chasovykh rydiv na osnovi adaptivnoyi neo-fazzi-modeli [Prediction of multidimensional nonstationary time series based on the adaptive neo-fazzi model]. *Compyuterni nauky ta informaciyini tehnologii*. 2012, no. 744, pp. 312–118.
10. Korablev N. M., Ivashchenko G. S. Primenenie modeli klonalnogo otbora, ispolzuyushchei vivod po pretседentam, dlya prognozirovaniya vremennykh ryadov [Application of clonal selection model using precedent inference to predict time series]. *Bionika intelekta*. 2013, no. 1 (80), pp. 108–111.
11. Hooi B., Liu S., Smailagic A., Faloutsos C. BEATLEX: Summarizing and Forecasting Time Series with Patterns. *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases. Lecture Notes in Computer Science. Vol. 10535*. Cham, Springer. pp. 3–19.
12. Grinberg G. Stock market statistical data analysis for prices forecasting and trading decision support. *Proc. of int. conf. "Theory and practice of science"*. 2021, vol.58, pp. 283–288.

References (transliterated)

1. Naim I., Mahara T., Idrisi A. R. Effective Short-Term Forecasting for Daily Time Series with Complex Seasonal Patterns. *Proc. Comp. Sci.* 2018, vol. 132, pp. 1832–1841.
2. Snityuk V. Ye. *Prognozuvannya. Modeli. Metody. Algoritmy* [Forecasting. Models. Methods. Algorithms]. Kyiv: Maklout Publ., 2008. 364 p.
3. Golyandina N., Usevich K. 2D-extension of Singular Spectrum Analysis: algorithm and elements of theory. In: *Matrix Methods: Theory, Algorithms and Applications*. World Scientific Publishing, 2010, pp. 449–473.
4. Haghbin H., Najibi S. M., Mahmoudvand R., Trinkla J., Madoliat M. Functional singular spectrum analysis. *Stat.* 2021, vol. 10, issue 1. e330.
5. Bodyansiy Ye. V., Vorobyov S. A., Kostyuk O. V., Lyubchik L. M. Fil'traciya i prognozirovanie trend-sezonnnykh vremennykh ryadov na osnovе iscusstvennykh neironnykh setey [Filtering and forecasting trend-seasonal time series based on artificial neural networks]. *Radioelektronika i informatika*. 1998, no. 3, pp. 76–83.
6. Xiong L., Liu X., Liu Y. Decaying DC and Harmonic Components Detection for Absorbing Impact Load Currents in Weak Grids. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2020, vol. 36, no. 3, pp. 1907–1910.

Надійшла (received) 28.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Галуза Олексій Анатолійович – доктор фізико-математичних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3809-149X>; e-mail: oleksii.haluza@khp.edu.ua

Костюк Ольга Василівна – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2037-7713>; e-mail: olha.kostiuk@khp.edu.ua

Нікульченко Артем Олександрович – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2154-291X>; e-mail: artem.nikulchenko@khp.edu.ua

Ахієзер Олена Борисівна – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувачка кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>; e-mail: olena.akhiezer@khp.edu.ua

Асландуков Микола Олексійович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8797-5817>; e-mail: mykola.aslandukov@khp.edu.ua

Haluza Oleksii Anatoliyovych – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3809-149X>; e-mail: oleksii.haluza@khp.edu.ua

Kostiuk Olga Vasylivna – Candidate of Technical Sciences (PhD), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2037-7713>; e-mail: olha.kostiuk@khp.edu.ua

Nikulchenko Artem Oleksandrovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2154-291X>; e-mail: artem.nikulchenko@khp.edu.ua

Akhiezer Olena Borysivna – Candidate of Technical Sciences (PhD), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", head of the Department of Computer Mathematics and Data Analysis; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7087-9749>; e-mail: olena.akhiezer@khp.edu.ua

Aslandukov Mykola Oleksiyovych – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior lecturer at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8797-5817>; e-mail: mykola.aslandukov@khp.edu.ua

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION TECHNOLOGY

UDC 004.9

DOI: 10.20998/2079-0023.2022.01.09

S. V. OREKHOV, H. V. MALYHON, N. K. STRATIENKO

PROBLEM OF CLASSIFICATION OF SEMANTIC KERNELS OF WEB RESOURCE

The article presents a new theoretical basis for solving the problem of situational management of semantic cores identified on the basis of WEB content. Such a task arises within the framework of a new phenomenon called virtual promotion. Its essence lies in the fact that a real product can exist in two realities: online and offline. According to marketing theory, the lifetime in two realities is the same. However, in the online mode, the goods exist independently and in accordance with the laws of the use of Internet technologies. Therefore, based on the concept of a marketing channel, it was proposed to consider a message in such a channel as a semantic core. The core is a specially selected set of keywords that briefly describe the product and the corresponding need. It has been proposed that each need forms a so-called class of need. Therefore, the product description will either belong to this class or not. In addition, a product can be described by a different set of keywords, which means that different descriptions of the same product or several products, if there are any for sale in the enterprise, will fall into the demand class. As a result, in this work, it was proposed to consider the center of this class as the so-called *K*-candidate. It is the *K*-applicant that will be the semantic core that will be considered at the current iteration of the situational management process. In addition, in order to move from one situation to another, in other words, from one core to another, it is required to have such an alternative core. It can be safely taken either from the neighborhood of the need class center (*K*-applicant), or the center of another class (another *K*-applicant), if the product can cover several needs of a potential buyer. Then the actual task is to classify the classes of needs based on the text corpus in HTML format. Having a text corpus at the first stage, the task of synthesizing semantic cores is realized, and then the classification task itself. This article proposes the formulation of the classification problem, taking into account the features that the Internet technologies contribute to search engine optimization. In particular, it is proposed to use four metrics from the category of WEB statistics. And then it is proposed to use the clustering method to identify classes of needs, taking into account the fact that the *K*-applicant is presented as a semantic network or as a graph.

Keywords: semantic kernel, keyword, Ford – Fulkerson method, *K*-applicant.

С. В. ОРХОВ, Г. В. МАЛИГОН, Н. К. СТРАТИЄНКО

ЗАДАЧА КЛАСИФІКАЦІЇ СЕМАНТИЧНИХ ЯДЕР ВЕБ РЕСУРСУ

У статті представлено нову теоретичну базу для вирішення задачі ситуаційного управління семантичними ядрами, виділеними на основі ВЕБ контенту. Таке завдання виникає у рамках нового феномена під назвою віртуальне просування. Суть його полягає в тому, що реальний товар може існувати у двох реальностях: онлайн та офлайн. Відповідно до теорії маркетингу час життя у двох реальностях одне й теж. Однак у режимі онлайн товар існує самостійно і згідно із законами застосування Інтернет технологій. Тому в роботі на основі концепції маркетингового каналу було запропоновано розглядати повідомлення у такому каналі як семантичне ядро. Ядро є спеціально виділене безліч ключових слів, які коротко описують товар та відповідно йому потребу. Було запропоновано, кожна потреба формує так званий клас потреби. Отже, опис товару або належатиме даному класу чи ні. З іншого боку, товар можна описати іншим набором ключових слів, отже у клас потреби потраплять різні описи однієї й тієї ж товару чи кількох товарів, якщо такі є для підприємства продажу. В результаті в цій роботі було запропоновано вважати центр такого класу так званим *K*-претендентом. Саме *K*-претендент і буде тим семантичним ядром, яке на поточній ітерації процесу ситуаційного управління розглядатиметься. Крім того, для переходу від однієї ситуації до іншої, тобто від одного ядра до іншого, потрібно мати таке альтернативне ядро. Його можна сміливо брати або з околиці центроїду класу потреби (*K*-претендента), або центроїд іншого класу (інший *K*-претендент), якщо товар може покрити кілька потреб потенційного покупця. Тоді актуальне завдання класифікації класів потреб на основі текстового корпусу у форматі HTML. Маючи текстовий корпус першому етапі реалізується завдання синтезу семантичних ядер, та був власне завдання класифікації. У цій статті запропоновано постановку завдання класифікації з урахуванням особливостей, що вносять Інтернет технології, пов'язані з пошуковою оптимізацією. Зокрема, запропоновано використовувати чотири метрики з розряду ВЕБ статистики. І далі запропоновано використовувати метод кластеризації для виділення класів потреб з урахуванням того, що *K*-претендент представлений як семантична мережа або як граф.

Ключові слова: семантичне ядро, ключове слово, метод Форда – Фалкерсона, *K*-претендент.

Introduction. In the paper it is offered to consider a problem of classification of semantic kernels. In general, this problem is formulated as follows [1-2]. There is a set of objects X , and Y is a set of class numbers. Then we create a mapping: $F: X \rightarrow Y$, the value of which is known only on a given set of pairs $X_L = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$. This is a training sample. You need to build an algorithm $A: X \rightarrow Y$ that allows you to classify a new object $x \in X$.

We adapt the classical formulation of this problem to our case, taking into account the already existing problem of situational management [3].

We will call a *K*-applicant such a kernel that launching it in the promotion channel leads to the sale of goods or services over the Internet. We will assume that the *K*-applicant forms the center of the cluster of kernels, i.e. it is a reflection or annotation of the main content of

the text describing the product or service for a potential buyer. Consider the main properties of the K -applicant.

K -applicant is a brief description of the product or the need that the product covers. It describes a product that should be purchased from the perspective of a potential buyer. Taking into account the theory and practice of search engine optimization on the Internet [4–7], K -applicant is a set of keywords that describes the set of keywords and the rules they form. The typical frequency of K -applicant in web content is 5–7%. It must be reflected in the web content header.

In the paper it is considered that the K -applicant is a center of the class of semantic kernel. There can be as many such cluster center as you want, because each product can cover several needs. We will assume that one K -applicant presents one need that closes our product or service to the buyer. It is very important to describe the K -applicant in terms of quantitative indicators. We can generally talk about three main key indicators. The first indicator is the frequency of appearance in web text. The second is the number of keywords that make up the K -applicant. The third is the number of rules from the point of view of the theory of knowledge representation, which are hidden in the body of the K -applicant, if it can be represented as a semantic network.

Then K -applicant will be called an annotation of the description of the need that closes the product that we promote online. This annotation is presented in the form of a semantic network built by an algorithm [8]. Different K -applicants can be compared by the number of rules, the frequency of occurrence in web content, the frequency of occurrence in the search engine database and the number of keywords in its composition. Let's mark these indicators accordingly I_1, I_2, I_3, I_4 . Then schematically the classification process can be depicted as follows – fig. 1.

Problem statement. The process shown in fig. 1 can be described as follows. Let the web content describe several needs that cover the product or service being promoted. Each of these needs is met by a set of keywords and rules that connect them to the appropriate content. This content is presented in the form of a semantic network and is called K -applicant. Variants of semantic networks, which include similar keywords with similar rules, will also be formed around the K -applicant.

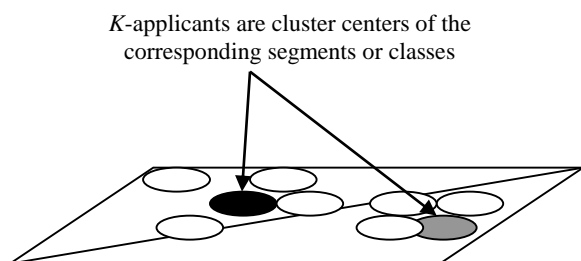


Fig. 1. Classification process based on K -applicants

That is, there are analogies around the K -applicant, other similar versions of semantic networks, which give the same meaning, but with different combinations of

keywords and rules. Such a group of semantic networks (K -applicant and analogies) will be denoted as a class of needs. Then let there be a set of needs classes $Y_N = \{y_1, \dots, y_n\}$ for each product or service being promoted. And the problem of classification is transformed into two problems: self-classification and clustering [9–10]. That is, you must first form a set of classes Y_N , and then assign to the class the existing semantic kernel.

Thus, the problem of classification of the semantic kernel is formulated as follows: having many classes of needs Y_N , we need to build a classifier $A: X \rightarrow Y$ that can assign the semantic kernel to the appropriate class of needs. In general, the classifier can be organized as a linear, DNF (disjunctive normal form) rule or neural network [11–12]. But given the fact of solving the problem of nuclear fusion, we can say that the problem of classification first degenerates into the problem of clustering of semantic kernel. This effect occurs because we synthesize a set of kernels, and then we have to divide this set into classes of need Y_N . If we re-synthesize kernel, the problem of classification is already solved.

The problem of kernel clustering is formulated as follows (fig. 1). We believe that we have many semantic kernels. There is also a function of the distance between two kernels. Then it is necessary to divide the set into subsets that do not intersect and which include nuclei that are close in metric.

Having many problems of the dissertation, we will consider approaches to their solution based on existing methods of artificial intelligence, machine learning, soft computing and data acquisition technology.

Proposed approach. In the paper to solve the clustering problem it is proposed to use the Ford – Fulkerson algorithm [9]. Consider formally its stages.

At the input of the algorithm we submit a semantic network $SN = \{V, E\}$, indicating the source s , the drain t and the bandwidth matrix c . Moreover, the elements of the matrix c will be calculated by formula (1). The result of the algorithm is the maximum possible flow f from s to t .

$$d(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^4 (I_k^i - I_k^j)^2} \quad (1)$$

If there is no connection between the vertices, the distance is considered infinite. In addition, we will introduce a capacity indicator:

$$c(i, j) = \frac{1}{d(i, j)} \quad (2)$$

The algorithm includes the following steps:

Step 1. We believe that $f(i, j) = 0$ for everyone $(i, j) \in E$. The final network coincides with the initial: $N = \bar{N}$.

Step 2. Choose any path $p \in \bar{N}$ from s to t such that $c(i, j) > 0$ for all edges $(i, j) \in p$, and go to step 2. If such a path does not exist, the algorithm ends.

Step 3. In the path found in the first stage p we find the edge with the minimum bandwidth $c_{\min}(i, j)$ and go to the third step.

Step 4. For each edge in the found way we increase a stream on size c_{\min} , that is we consider $f(i, j) = f(i, j) + c_{\min}$ for all $(i, j) \in p$; the flow for the edges of the opposite path is reduced by the value c_{\min} , i.e. for all $f(j, i) = f(j, i) - c_{\min}$. Let us move on to the fourth step.

Step 5. Adjust the final network \bar{N} . For all edges in the found path and for the opposite edges we calculate a new bandwidth. Remove the edge with zero bandwidth, and with non-zero – add to the final network and go to the first step.

For the numerical implementation of the algorithm, we introduce the definition of the stop function of the algorithm as [13]:

$$Q = \frac{r}{R}, \quad (3)$$

$$r = \frac{1}{K} \frac{1}{|P'_K|} \sum_{(i,j) \in P'_K} d(i, j),$$

$$R = \frac{1}{K} \frac{1}{|P'_K|} \sum_{(i,j) \in P'_K} d(i, z_K),$$

where z_K – class center K , P'_K – set of keywords from semantic network which describes the semantic kernels of web content.

Future work. The solution of the problem of classification of semantic kernels is a part of the task of situational management. As it was said, for its solution it is required to allocate classes of needs. Therefore, the directions for further research are alternative methods for separating classes and cluster centers of these classes. Classification methods based on soft computing and graph theory are promising.

Summary. In this article, such new scientific results have been reviewed to complete the task of classification, as well as: 1) the statement of the task of classifying semantic cores on the basis of seeing the classes of needs on the basis of semantic measures was formulated, as it was generated on the basis of web content; 2) got further development the method of solving the problem of classification; 3) previously proposed a change of metrics for visualizing consumer classes based on web content that describes a product for sale on the Internet.

References

1. Aggarwal C. C., Zhai C. X. *A survey of text classification algorithms. Mining Text Data*. Берлин: Springer Science-Business Media LLC, 2012. С. 163–222.
2. Остапец А. А. Решающие правила для ансамбля из цепей вероятностных классификаторов при решении задач классификации с пересекающимися классами. *Машинное*

- обучение и анализ данных. Москва: МФТИ, 2016. Том 2, №3. С. 276–285.
3. Поспелов Д. А. *Ситуационное управление: теория и практика*. Москва: Наука, 1986. 288 с.
4. Нееловой Н. М. *Энциклопедия поискового продвижения Ingate*. Москва: ИП Андросов, 2017. 541 с.
5. Бролина А. М. *Контекстная реклама: профессиональный апгрейд для увеличения продаж. Практикум от экспертов*. Москва: ООО «Ингейт Реклама», 2015. 44 с.
6. Sharma U., Thakur K. S. A Study on Digital Marketing and its Impact on Consumers Purchase. *International Journal of Advanced Science and Technology*. США: TUC, 2020. №29(3). С. 13096 – 13110.
7. García J., Lizcano D., Ramos C., Matos N. Digital Marketing Actions That Achieve a Better Attraction and Loyalty of Users: An Analytical Study. *Future Internet*. Швейцария: MDPI, 2019. №11(130). С. 1–16.
8. Godlevsky M., Orekhov S., Orekhova E. Theoretical Fundamentals of Search Engine Optimization Based on Machine Learning. *CEUR WS*. США, 2017. № 1844. С. 23–32.
9. Коннов И. В., Кашина О. А., Гильманова Э. И. Решение задачи кластеризации методами оптимизации на графах. *Ученые записки казанского университета. Серия физико-математические науки*. Казань: КИФУ, 2019. Т. 161, кн. 3. С. 423–437.
10. Осипенко В. В. Два підходи до розв'язання задачі кластеризації у широкому сенсі з позицій індуктивного моделювання. *Енергетика і автоматика*. Київ: НУБПУ, 2014. №1. С. 83–97.
11. Khan A., Baharudin B., Lee L., Khairullah K. A Review of Machine Learning Algorithms for Text-Documents Classification. *Journal of advances in information technology*. 2010. Том 1, № 1. С. 4–20.
12. Неделько В. М. Исследование эффективности некоторых линейных методов классификации на модельных распределениях. *Машинное обучение и анализ данных*. Москва: МФТИ, 2016. Том 2, №3. С. 305–328.
13. Сивоголовко Е. Методы оценки качества четкой кластеризации. *Компьютерные инструменты в образовании*. Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2011. № 4. С. 14–31.

References (transliterated)

1. Aggarwal C. C., Zhai C. X. *A survey of text classification algorithms. Mining Text Data*. Berlin: Springer Science-Business Media LLC Publ., 2012, pp. 163–222.
2. Ostapez A. A. Reshayuschie pravila dlya ansamblya iz zepov veroyatnostnyh klassifikatorov pri reshenii zadach klasifikazii s peresekayuschimisya klassami. [Decision rules for an ensemble of chains of probabilistic classifiers in solving classification problems with intersecting classes] *Machine learning and data analysis*. Moscow: MFTI Publ., 2016, vol. 2, no. 3, pp. 276–285.
3. Pospelov D. A. *Situatsionnoye upravlenie: teoriya i praktika*. [Situational management: theory and practice]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 288 p.
4. Neelova N. M. *Enziklopaediya poiskovogo prodvizeniya Ingate*. [Encyclopedia of Search Engine Promotion Ingate]. Moscow: IP Androsov Publ., 2017. 541 p.
5. Broolina A. M. *Kontekstnaya reklama: profesionalnyy upgrate dlya uvelicheniya prodaz. Praktikum ot ekspertov*. [Contextual advertising: a professional upgrade to increase sales. Workshop from experts]. Moscow: ООО «Ingate Reklama» Publ., 2015. 44 p.
6. Sharma U., Thakur K. S. A Study on Digital Marketing and its Impact on Consumers Purchase. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020, no. 29(3), pp. 13096–13110.
7. García J., Lizcano D., Ramos C., Matos N. Digital Marketing Actions That Achieve a Better Attraction and Loyalty of Users: An Analytical Study. *Future Internet*. Switzerland: MDPI Publ., 2019, no. 11(130), pp. 1–16.
8. Godlevsky M., Orekhov S., Orekhova E. Theoretical Fundamentals of Search Engine Optimization Based on Machine Learning. *CEUR WS*, USA, 2017, vol. 1844, pp. 23–32.
9. Kononov I. V., Kashina O. A., Gilmanova E. I. Reshenie zadachi klasterizazii metodami optimizazii na grafax. [Solving the clustering problem by optimization methods on graphs]. *Scientific notes of Kazan University. Series of physical and mathematical sciences*. Kazan: KPFU Publ., 2019, vol. 161, book 3, pp. 423–437.

10. Osipenko V. V. Dva pidothu do rozvajannya zadachi klasterizazii u shirokomu sensi z pozuzii induktivnogo modelyuvannya. [Two approaches to solving the problem of clustering in a broad sense from the standpoint of inductive modeling]. *Energy and automation*. Kyiv: NUBPU Publ., 2014, no. 1, pp. 83–97.
11. Khan A., Baharudin B., Lee L., Khairullah K. A Review of Machine Learning Algorithms for Text-Documents Classification. *Journal of advances in information technology*. USA, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 4–20.
12. Nedelko V. M. Issledovaniye effektivnosti nekotorykh lineynuh metodov klassifikazii na modelnuk raspredeleniyah. [Investigation of the efficiency of some linear classification methods on model distributions]. *Machine learning and data analysis*. Moscow: MFTI Publ., 2016, vol. 2, no. 3, pp. 305–328.
13. Sivogolovko E. Metodu ozenki kachestva chetkoy klasterizazii. [Methods for assessing the quality of clear clustering]. *Computer tools in education*. SPb.: LETI Publ., 2011, no. 4, pp. 14–31.

Received 23.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Орехов Сергій Валерійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-5861>; e-mail: sergey.v.orekhov@gmail.com

Малигон Геннадій Васильович – аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-2488>; e-mail: gmalygon@gmail.com

Стратієнко Наталія Костянтинівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7925-6687>; тел. (057)707-64-74, email: strana.snk@gmail.com

Orekhov Sergey Valerievich – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of Software Engineering and Management Intelligent Technologies department; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-5861>; e-mail: sergey.v.orekhov@gmail.com

Malyhon Hennadiy Vasilievich – Postgraduate Student, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Postgraduate Student of Software Engineering and Management Intelligent Technologies department; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-2488>; e-mail: gmalygon@gmail.com

Stratiienko Nataliia Kostiantunivna – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Software Engineering and Management Intelligent Technologies Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7925-6687>; tel. (057)707-64-74, email: strana.snk@gmail.com

A. M. KOPP, D. L. ORLOVSKYI, I. V. LIUTENKO

A SOFTWARE SOLUTION TO WORK WITH A DATABASE OF BUSINESS PROCESS MODELS AND ANALYZE THEIR STRUCTURAL MEASURES

Business process modeling is one of the main tools of the BPM (Business Process Management) concept. With the help of business process modeling, business scenarios can be presented in the form of graphical models that can be easily understood by both information technology (IT) professionals and non-IT professionals – business analysts, software customers, department heads, top managers, and other stakeholders interested in business process improvement. Business process improvement is usually done through the automation of activities, which were identified as “bottlenecks” after analysis. However, it is possible to analyze a business process model only if it is clear and correct in terms of compliance with both the notation used and the real business process it depicts. This paper considers the analysis of BPMN (Business Process Model and Notation) business process model structural measures. It is assumed that business process models, which by their structural features violate rules of business process modeling, are neither understandable nor suitable for further work with them, which also can lead to various errors occurring at the stage of business process analysis, as well as at the stage of its improvement and implementation of proposed changes, i.e., during development, testing and maintenance of distinct software components, information system modules or BPM-system scenarios that ensure business process execution. Therefore, in this paper, we propose to identify the main elements of BPMN business process models and their structural measures that affect models’ understandability and maintainability and could be sources of errors. Considering selected measures, it is proposed to calculate respective values for a large collection of BPMN business process models, and then study compliance with theoretical business process modeling guidelines on practice when real business process models are designed. In order to provide efficient storage and processing of a large collection of BPMN business process models data, there were developed a database, and a software component. Results of analysis of BPMN business process model structural measures obtained using developed database and software component are demonstrated and discussed. The conclusion is made, as well as future research directions in this field are formulated.

Keywords: business process model, modeling notation, structural measures, modeling guidelines.

A. M. КОПП, Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ, І. В. ЛЮТЕНКО

ПРОГРАМНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ РОБОТИ З БАЗОЮ ДАНИХ МОДЕЛЕЙ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ТА АНАЛІЗУ ЇХ СТРУКТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Моделювання бізнес-процесів є одним з основних інструментів концепції управління бізнес-процесами BPM (Business Process Management). За допомогою моделювання бізнес-процесів, сценарії діяльності підприємств та організацій можуть бути подані у формі графічних моделей, які можуть бути достатньо легко зрозумілі як спеціалістами з інформаційних технологій (ІТ), так і не ІТ-спеціалістами – бізнес-аналітиками, замовниками програмного забезпечення, керівниками відділів, топ-менеджерами та іншими стейкхолдерами, зацікавленими в удосконаленні бізнес-процесів. Удосконалення бізнес-процесів зазвичай відбувається за рахунок автоматизації робіт, які в результаті аналізу були визначені як «вузькі місця». Проте, здійснити аналіз моделі бізнес-процесу представляється можливим лише за умови її зрозумілості та коректності з точки зору відповідності як нотації, що використовується, так і реальному бізнес-процесу, який вона зображує. В даній роботі розглядається аналіз структурних характеристик моделей бізнес-процесів, представлених за допомогою нотації BPMN (Business Process Model and Notation). Передбачається, що моделі бізнес-процесів, які за своїми структурними властивостями порушують правила моделювання бізнес-процесів, не є зрозумілими та придатними до подальшої роботи з ними, через що можуть виникати різні помилки як на етапі аналізу бізнес-процесу, так і на етапі його вдосконалення і впровадження запропонованих змін, зокрема, під час розробки, тестування та підтримки окремих програмних компонентів, модулів інформаційних систем або сценаріїв у BPM-системах, що забезпечують виконання бізнес-процесу. Для цього у роботі пропонується визначити основні елементи BPMN-моделей бізнес-процесів та їх структурні характеристики, які впливають на зрозумілість та придатність моделей до використання, та можуть бути джерелами помилок. Зважаючи на визначені характеристики, пропонується виконати розрахунок відповідних значень для великої колекції BPMN-моделей бізнес-процесів, після чого дослідити дотримання теоретичних правил моделювання бізнес-процесів на практиці при побудові моделей реальних бізнес-процесів. Для забезпечення ефективного зберігання та обробки великої колекції даних про BPMN-моделі бізнес-процесів було розроблено базу даних та програмний компонент. Продемонстровано результати аналізу структурних характеристик BPMN-моделей бізнес-процесів, отримані з використанням розробленої бази даних та програмного компонента. Сформульовано висновки, а також визначено подальші напрямки досліджень.

Ключові слова: модель бізнес-процесу, нотація моделювання, структурні характеристики, правила моделювання.

Introduction. Business process management (BPM) and, respectively, business process modeling are used by modern organizations focused on continuous improvement of their performance [1].

Using business process modeling as the core tool of the BPM approach, small and large companies may capture their activities in the form of graphic diagrams that could be later brainstormed by business analysts to find ways for organizational workflows improvement.

Therefore, the understandability and modifiability of business process models are crucial for the success of future business process improvement projects [2]. It is natural, that error-prone business process models that are not clear for their readers could negatively affect the success of BPM projects, causing shortcomings starting from the design stage. Moreover, in the later stages of

information system development or customization projects, business process models of poor quality could lead to literally a hundred times bigger and, therefore, expensive mistakes [3].

Problem statement. Nowadays, a BPMN (Business Process Model and Notation) is the de-facto standard notation for business process modeling [4].

This notation is quite similar to its predecessors EPC (Event-driven Process Chains) and IDEF3 [5], however, it is much more complex, due to the rich set of activities, events, and gateways (logical connectors used to manage process execution scenarios, e.g. “and”, “or”, “xor” etc.) of different types.

Deceptive “simplicity” could make inexperienced business analysts build BPMN models as simple workflow diagrams or vice versa, using complex BPMN constructs

where it is not necessary. Both of these cases may lead to poor-structured business process models understandable only to their authors. It is basically the same as using a fancy text editor to write down a poem, but with a lot of grammar mistakes, or writing an essay or graduation thesis speech, but on a paper note.

Thus, it is relevant to study the main sources of BPMN modeling mistakes to provide recommendations for their efficient detection and elimination.

The research object includes an analysis of BPMN business process models structural measures.

The research subject includes the database and the software component to provide efficient storage and processing of a large collection of BPMN business process models data.

This research aims at the improvement of designed BPMN models by detection and elimination of modeling mistakes.

Proposed approach. In the proposed approach we suggest considering size measures of business process models, formulated at first for EPC models in [6] and later applied to measure BPMN models in [7]:

$$SM_{BPMN} = \langle SM_{OR}, SM_{SE}, SM_{EE}, SM_N \rangle, \quad (1)$$

here SM_{OR} – the number of inclusive gateways (OR logic);

SM_{SE} – the number of start events;

SM_{EE} – the number of end events;

SM_N – the number of all nodes.

As the dataset of sample BPMN models, we propose to use the model collection of BPTMAI (Business Process Management Academic Initiative) [8]. It provides JSON (JavaScript Object Notation) files with business process model metadata, including necessary measures (1).

Hence, the following algorithm (see fig. 1) is suggested to process input JSON files of BPMN models' properties to compare structural measures toward the thresholds defined in [7] and estimate error probabilities for BPMN models.

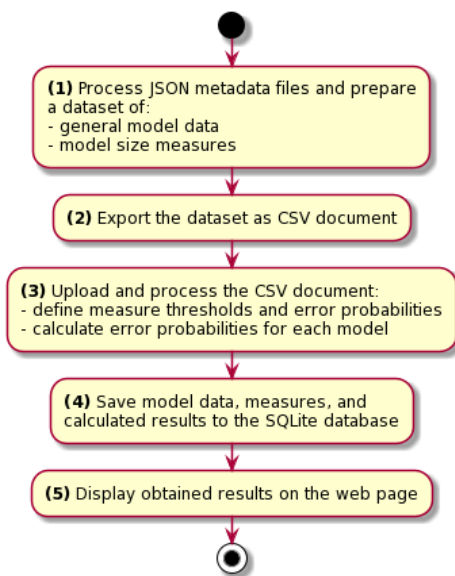


Fig. 1. The algorithm of BPMN models data analysis

Respective thresholds defined by authors of [7] for size measures (1) of business process models are following:

$$TM_{BPMN} = \langle TM_{OR}, TM_{SE}, TM_{EE}, TM_N \rangle, \quad (2)$$

here TM_{OR} – the threshold to evaluate the number of inclusive gateways (OR logic), $TM_{OR} = 0.5$;

TM_{SE} – the threshold to evaluate the number of start events, $TM_{SE} = 2.5$;

TM_{EE} – the threshold to evaluate the number of end events, $TM_{EE} = 2.5$;

TM_N – the threshold to evaluate the number of all nodes, $TM_N = 31.5$.

Therefore, according to [7], there could be defined the following probabilities of finding errors in business process models when thresholds (2) are overcome:

- $P(SM_{OR} > TM_{OR}) = 0.09$;
- $P(SM_{SE} > TM_{SE}) = 0.07$;
- $P(SM_{EE} > TM_{EE}) = 0.05$;
- $P(SM_N > TM_N) = 0.09$.

Considering the multiplication rule [9], we would like to suggest the following equation to calculate the error probability of a BPMN model:

$$hasErrors = 1 - \prod_{i \in M} [1 - P(SM_i > TM_i)], \quad (3)$$

here M – the set of business process model elements used to calculate measures (1), $M = \{OR, SE, EE, N\}$.

Results. Data extracted from JSON files of BPTMAI collection [8] should be stored in the database for better performance and consistency. The suggested data model (see fig. 2) is similar to the “star” schema of data warehouses, suitable for analytical data processing [10].

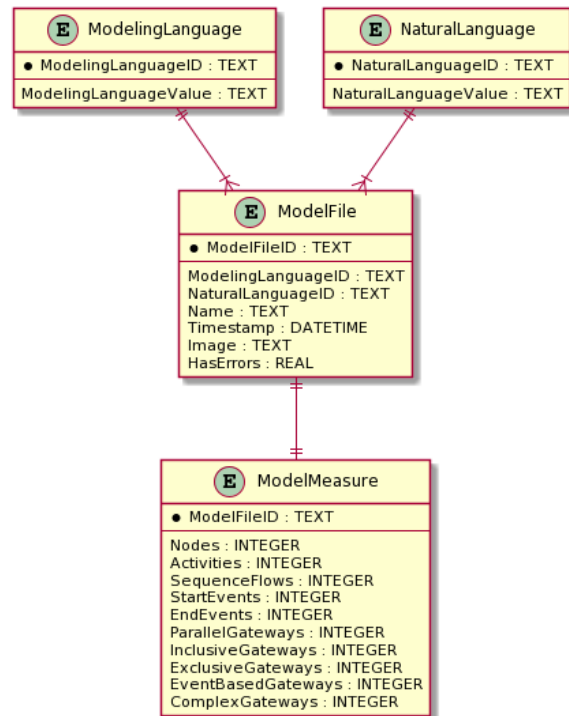


Fig. 2. The schema of the BPMN metadata database

The overall system for BPMN models analysis works as follows (see fig. 3):

- BPMN JSON files are processed using NodeJS script and model names, and calculated measures (1) are stored in the CSV file (Comma-Separated Values);
- the CSV file is then processed using Python script to calculate error probabilities (3) and all obtained results are stored in the SQLite database;
- the Flask web application queries results from the database and transmits them to the web browser, where the JSON viewer plugin can display them (see fig. 4).

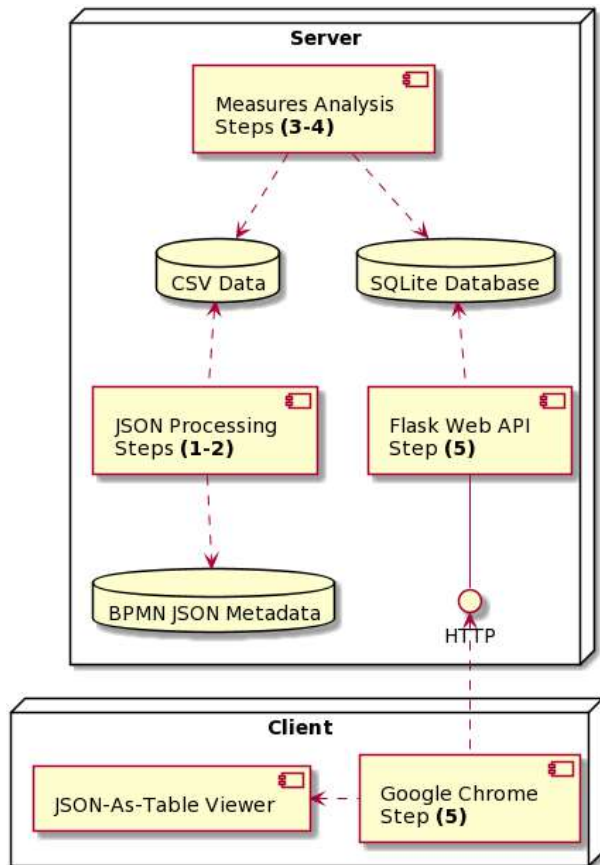


Fig. 3. Experimental system design

The example of obtained results is shown in fig. 4.

Discussion. Obtained statistical results (see fig. 5) demonstrate that redundant end events are the most often sources of errors in BPMN business process models – there are 4463 (23.72%) BPMN models with redundant end events that may mislead readers.

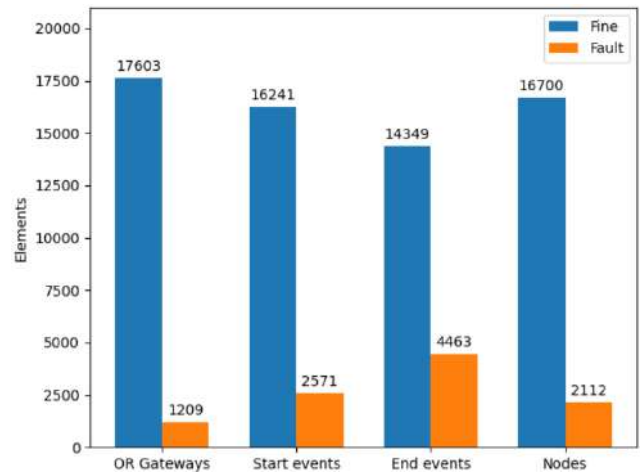


Fig. 5. The most common sources of errors in BPMN models

Other almost equal sources of errors are redundant start events and large models in general:

- 2571 (13.67%) BPMN models contain redundant start events that may mislead readers;
- 2112 (11.23%) BPMN models are considered too large and should be decomposed.

Usage of inclusive (i.e. “or”) gateways is a less popular source of errors in comparison to other size measures – there are 1209 (6.43%) BPMN models with “or” gateways.

Anyway, inclusive gateways are recommended to be avoided because the semantics of these elements produces paradoxes and problems in the implementation of the business process model [11]. It is also stated that BPMN models with the exclusive (XOR) and parallel (AND) gateways tend to have a lower number of mistakes [11].

The results of the statistical analysis of calculated BPMN business process model measures, shown in (1), are demonstrated in Table 1.

Obtained statistical results demonstrate that 75% of analyzed BPMN models (18812 models in total) are well-

Show entries Search:

Model File	Model Name	Start Events	End Events	Or Gateways	Nodes	Has Errors
1408075999.meta.json	AVERS_Supply_Chain_NEW	3	9	0	41	0.21
2019061664.meta.json	AVERS_Supply_Chain	4	10	0	39	0.21
1322223884.meta.json	Supply chain	3	3	0	16	0.12
643475489.meta.json	Customer Data Supply Chain Map	0	0	0	32	0.09
239343585.meta.json	Data Supply Chain	0	0	0	6	0

Showing 1 to 5 of 5 entries (filtered from 18,812 total entries) Previous Next

Fig. 4. The example of results for “supply chain” BPMN models

structured since their measures (1) are not crossing the threshold values (2). Also, we can observe that the average BPMN model consists of around 17 elements in general, among which there is one start event (rarely two), two end events, and the presence of at least one inclusive gateway is highly unlikely.

Table 1 – The statistical analysis of BPMN measures.

Measure	SM_{OR}	SM_{SE}	SM_{EE}	SM_N
Mean	0.13	1.55	2.01	16.77
Std.	0.72	1.85	2.42	16.05
Min.	0.00	0.00	0.00	0.00
25%	0.00	1.00	1.00	7.00
50%	0.00	1.00	1.00	13.00
75%	0.00	2.00	2.00	21.00
Max.	23.00	103.00	49.00	262.00

We also complemented obtained results with the correlation analysis [12] of error probability and other size measures of BPMN models that were not initially included in the tuple (1), as well as ignored by authors of [7]:

- SM_A the number of activities;
- SM_{SF} the number of sequence flows.

Obtained results of the correlation analysis [12] are demonstrated in Table 2.

Table 2 – The correlation analysis results.

Variable	$hasErrors$	SM_A	SM_{SF}
$hasErrors$	1.00	0.62	0.67
SM_A	0.62	1.00	0.90
SM_{SF}	0.67	0.90	1.00

Since correlation coefficients are between 0.5 and 0.7, we may conclude that the error probability and the number of activities (0.62), as well as the error probability and the number of sequence flows (0.67), can be considered as moderately correlated [12].

It can be also noticed that the number of activities and the number of sequence flows are highly correlated (their correlation coefficient is 0.9) [12], however, it does not seem unusual for linked graphs such as BPMN diagrams.

These observations (shown in Table 2) could be used in the future to build a model for the estimation of BPMN business process models using numbers of activities and sequence flows.

Conclusion. In this paper were considered measures of BPMN business process models and their respective thresholds [7]. Using these thresholds [7] it is proposed to calculate error probabilities of analyzed BPMN models. To provide efficient storage and processing of experimental BPMN data, we have developed the database and software component. Using the software component BPMN data is extracted from JSON metadata files, provided in BPAI research collection [8], then data is stored in a CSV file that later is processed by a Python script, and analysis results are stored in the SQLite database. Using the Flask web applications development framework, analysis results of BPMN models are

displayed using the web page with search and pagination possibilities.

Using further statistical analysis of obtained results were defined most common sources of errors in BPMN models. Also, were defined typical measures of average BPMN models and correlations between other BPMN size measures and error probabilities. Future research may include the elaboration of models for early errors detection in BPMN models using essential measures, such as numbers of activities and sequence flows.

References

1. Dumas M. et al. *Fundamentals of Business Process Management*. Springer, 2018. 527 p.
2. Reijers H. A., Mendling J. A study into the factors that influence the understandability of business process models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*. 2010. No. 3 (41). P. 449–462.
3. Ransome J., Misra A. *Core Software Security: Security at the Source*. CRC Press, 2018. 414 p.
4. Allweyer T. *BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modeling*. BoD – Books on Demand, 2016. 172 p.
5. Topi H., Tucker A. *Computing Handbook: Information Systems and Information Technology*. CRC Press, 2014. 1522 p.
6. Mendling J., Neumann G., van der Aalst W. On the correlation between process model metrics and errors. *Australian Computer Society*. 2007. P. 173–178.
7. Mendling J., Sánchez-González L., García F., la Rosa M. Thresholds for error probability measures of business process models. *Journal of Systems and Software*. 2012. No. 5 (85). P. 1188–1197.
8. Weske M., Decker G., Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Model Collection of the Business Process Management Academic Initiative (Version BPMNI-29-10-2019) [Data set]*. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3758705> (accessed: 20.03.2022).
9. Weinberg S. L., Abramowitz S. K. *Statistics Using R: An Integrative Approach*. Cambridge University Press, 2020. 692 p.
10. Nordeen A. *Learn Data Warehousing in 24 Hours*. Guru99, 2020. 380 p.
11. Krogstie J. *Quality in Business Process Modeling*. Springer, 2016. 250 p.
12. *Correlation Coefficients*. URL: <https://www.andrews.edu/~calkins/math/edrm611/edrm05.htm> (accessed: 20.03.2022).

References (transliterated)

1. Dumas M. et al. *Fundamentals of Business Process Management*. Springer, 2018. 527 p.
2. Reijers H. A., Mendling J. A study into the factors that influence the understandability of business process models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*. 2010, no. 3 (41), pp. 449–462.
3. Ransome J., Misra A. *Core Software Security: Security at the Source*. CRC Press, 2018. 414 p.
4. Allweyer T. *BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modeling*. BoD – Books on Demand, 2016. 172 p.
5. Topi H., Tucker A. *Computing Handbook: Information Systems and Information Technology*. CRC Press, 2014. 1522 p.
6. Mendling J., Neumann G., van der Aalst W. On the correlation between process model metrics and errors. *Australian Computer Society*. 2007, pp. 173–178.
7. Mendling J., Sánchez-González L., García F., la Rosa M. Thresholds for error probability measures of business process models. *Journal of Systems and Software*. 2012, no. 5 (85), pp. 1188–1197.
8. Weske M., Decker G., Dumas M., La Rosa M., Mendling J., Reijers H. A. *Model Collection of the Business Process Management Academic Initiative (Version BPMNI-29-10-2019) [Data set]*. Available at: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3758705> (accessed 20.03.2022).
9. Weinberg S. L., Abramowitz S. K. *Statistics Using R: An Integrative Approach*. Cambridge University Press, 2020. 692 p.

10. Nordeen A. *Learn Data Warehousing in 24 Hours*. Guru99, 2020. 380 p.
11. Krogstie J. *Quality in Business Process Modeling*. Springer, 2016. 250 p.
12. *Correlation Coefficients*. Available at: <https://www.andrews.edu/~calkins/math/edrm611/edrm05.htm> (accessed 20.03.2022).

Надійшла (received) 05.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Копп Андрій Михайлович – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: kopp93@gmail.com

Орловський Дмитро Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: orlovskiy.dm@gmail.com

Лютенко Ірина Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4357-1826>; e-mail: Iryna.Liutenko@kphi.edu.ua

Kopp Andrii Mykhailovych – PhD in Computer Sciences, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: kopp93@gmail.com

Orlovskiy Dmytro Leonidovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>

Liutenko Iryna Viktorivna – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4357-1826>; e-mail: Iryna.Liutenko@kphi.edu.ua

A. M. KOPP, D. L. ORLOVSKIY

THE APPROACH AND THE SOFTWARE TOOL TO CALCULATE SEMANTIC QUALITY MEASURES OF BUSINESS PROCESS MODELS

Business process models are essential business process management artifacts that help describe visually ongoing business activities to facilitate communication between information technology and business stakeholders. Business process models are used to find inefficient spots within described workflows and resolve detected shortcomings by automation via configurable software solutions or unified workflow engines. However, this is impossible when using syntactically or semantically poor business process models. It is the same as building a house using the blueprint with windows on the floor and typos in text labels. Therefore, it is extremely important to keep created business process models clear and relevant to the actual workflows they describe. Hence, in this paper, we propose the approach and the software tool to calculate semantic quality measures of business process models. The proposed approach uses a special procedure to extract the modeling domain statements using natural language processing techniques. According to the proposed approach, the initial textual descriptions of business process models should be tokenized. Then obtained tokens should be turned to the lower case style and cleansed to remove non-alphabetic tokens and stop words. Finally, the remaining tokens should be stemmed and the existing duplicates should be removed. The same procedure is then repeated for text labels attached to the business process model activities. Then, tokens present in the result of textual description's processing but missing in the result of labels' processing are considered incomplete (i.e. incorrect in the modeling domain). Similarly, tokens present in the result of labels' processing but missing in the result of textual description's processing are considered invalid (i.e. irrelevant to the modeling domain). Therefore, respective semantic quality measures can be calculated. The software tool is created using the Python programming language because of its powerful natural language processing packages.

Keywords: business process modeling, semantic quality, quality measure, natural language processing, software tool.

A. M. КОПП, Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ

ПІДХІД ТА ПРОГРАМНИЙ ЗАСІБ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ СЕМАНТИЧНИХ МІР ЯКОСТІ МОДЕЛЕЙ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ

Моделі бізнес-процесів є важливими артефактами управління бізнес-процесами, які допомагають візуально описати поточну бізнес-діяльність, щоб полегшити взаємодію зацікавлених сторін бізнесу з інформаційними технологіями. Моделі бізнес-процесів використовуються для пошуку неефективних місць в описаних робочих процесах та усунення виявлених недоліків шляхом автоматизації за допомогою програмних рішень, що налаштовуються, або уніфікованих середовищ виконання робочих процесів. Однак це неможливо при використанні синтаксично або семантично некоректних моделей бізнес-процесів. Це те саме, що будувати будинок за кресленням із вікнами на підлозі та помилками в текстових написах. Тому надзвичайно важливо зберігати створені моделі бізнес-процесів чіткими та відповідними фактичним робочим процесам, які вони описують. Тому в цій роботі ми пропонуємо підхід та програмний інструмент для розрахунку семантичних показників якості моделей бізнес-процесів. Запропонований підхід використовує спеціальну процедуру для вилучення тверджень про предметну область з використанням методів обробки природної мови. Відповідно до запропонованого підходу початкові текстові описи моделей бізнес-процесів мають бути токенованими. Потім отримані токени слід подати у нижньому регістрі та очистити, щоб видалити неалфавітні токени та стоп-слова. Нарешті, решту токенів слід стематизувати, а наявні дублікати слід видалити. Потім ця ж процедура повторюється для текстових міток, доданих до робіт моделі бізнес-процесу. Тоді лексеми, присутні в результаті обробки текстового опису, але відсутні в результаті обробки текстових міток, вважаються неповними (тобто неправильними щодо предметної області моделювання). Аналогічно, лексеми, присутні в результаті обробки текстових міток, але відсутні в результаті обробки текстового опису, вважаються недійсними (тобто не мають відношення до предметної області моделювання). Таким чином, можна розрахувати відповідні показники семантичної якості. Програмний засіб був створений за допомогою мови програмування Python завдяки її потужним пакетам обробки природної мови.

Ключові слова: моделювання бізнес-процесів, семантична якість, міра якості, обробка природної мови, програмний засіб.

Introduction. Today digital transformation is a trend in the enterprise management field. First of all, it considers Business Process Management (BPM) methodology and its main techniques, including business process modeling and workflow automation. These approaches rely on special BPM diagramming software or even complex business process automation suites. While workflow automation takes into account mostly routine documents and information flows, business process modeling, in general, allows representation of business activities visually as diagrams. Graphical business process models serve for identification and deeper understanding of organizational activities. They also help to find workflow shortcomings and facilitate interaction between Information Technology (IT) engineering experts and business stakeholders [1].

A business process is the sequence of manual or automated activities that aims at achieving organizational goals and providing products or services valuable for business users. Automated activities use specialized IT

systems that implement required workflows fully or partially. These are BPM suites, Customer Relationship Management (CRM), Enterprise Resource Planning (ERP), and other IT solutions. The BPM methodology assumes workflow automation to improve the communication of business users with IT systems. In general, the business process management lifecycle includes the following repeated stages [2]:

- business process analysis;
- business process modeling;
- business process implementation (or deployment to the execution environment if the workflow is completely automated);
- business process monitoring;
- business process evaluation.

Graphical business process models are the most efficient in comparison to textual business process descriptions. They visually describe business process tasks, events that trigger process scenarios, transmitted data objects, organizational units or single persons

involved into the business process execution, and provided outcomes [3].

Business process modeling is the technique of visual representation of ongoing or planned business activities. Usually, business process models contain events that trigger various workflow scenarios while being driven by the control flow logic of parallel, exclusive, or inclusive branches. Business processes are pillars of process-centric IT solutions since they help understand and improve enterprise performance through re-engineering activities. Business processes are also subject to the service-oriented design in software engineering. Business process models are also knowledge-sharing assets. They help transfer best practices across organizations to improve industry standards and achieve better business performance [4].

In [5] author proposed the following classification of business process modeling aspects, including object-based, communication-based, role-based, topological, functional, and behavioral. The most popular business process modeling notations and languages that belong to the proposed taxonomy are the following [5]:

- Unified Modeling Language (UML);
- Integrated Definition Standards (IDEF0 and IDEF3);
- Data Flow Diagrams (DFD);
- Event-driven Process Chains (EPC);
- Business Process Modeling and Notation (BPMN).

The BPMN notation nowadays is the most popular and de-facto standard of business process modeling and workflow automation using BPM suites. BPMN combines behavioral and functional approaches [5].

Besides the BPMN which is a leader in the business process modeling field, the EPC notation is widely used. However, recently EPC is being replaced by BPMN [6].

Many EPC modeling software tools now support also the BPMN as an alternative business process diagramming approach [6]. For example, the “ARIS Express” application supports the BPMN notation as the supplementary business process diagramming capability.

Other standards (i.e. UML, IDEF, and DFD) are not such popular in today’s BPM industry [6]. However, IDEF and DFD standards were widely used in the nineties by the U.S. Department of Defense (DoD) as the business process re-engineering methodology [7].

Currently, there are about 70 software tools that allow the building of BPMN diagrams [8]. Also, about 50 open-source tools are listed on the SourceForge [9].

Problem statement. Business process models are essential BPM artifacts that help describe visually ongoing business activities to facilitate communication between IT and business stakeholders.

Business process models are used to find inefficient spots within described workflows and resolve detected shortcomings by automation via configurable IT solutions or unified BPM engines. However, this is impossible when using syntactically or semantically poor business process models. Literally, it is the same as building a house using the blueprint with windows on the floor and typos in text labels.

Therefore, it is extremely important to keep created business process models clear and relevant to the actual workflows they describe. Hence, in this paper, we propose the approach and the software tool to calculate semantic quality measures of business process models.

Semantic quality measures of business process models. In [5] the author proposes the following definitions of syntactic and semantic qualities according to the “Semiotic Quality” (SEQUAL) approach application to the business process modeling domain:

- syntactic quality is the degree of correspondence between elements of a business process model and the syntax of the modeling notation;
- semantic quality is the degree of correspondence between elements of a business process model and the actual business process it describes.

Moreover, in [5] the author proposes the following phenomena, such as validity and completeness. Therefore, there could be defined semantic and syntactic validity and completeness degrees respectively [5]:

- a business process model is syntactically valid when all of its elements belong to the modeling notation;
- a business process model is syntactically complete when all of its elements obey the syntax of the modeling notation;
- a business process model is semantically valid when all of its elements belong to the modeling domain (i.e. the actual business process);
- a business process model is semantically complete when all of its elements are correct in the modeling domain.

While the syntactic quality was extensively studied in previous papers [10] and [11], let us now concentrate on the semantic quality. Formally, the semantic quality measures validity and completeness can be given using the following equations:

$$\text{Semantic validity} = 1 - \frac{\#M \setminus D}{\#M}, \quad (1)$$

$$\text{Semantic completeness} = 1 - \frac{\#D \setminus M}{\#D}. \quad (2)$$

Here in (1) and (2):

- $\#M \setminus D$ is the number of business process model M elements that do not belong to the modeling domain D (i.e. not relevant to the actual business process);
- $\#D \setminus M$ is the number of business process model M elements that are incorrect in the modeling domain D (i.e. poorly describing the actual business process);
- $\#M$ is the total number of business process model elements;
- $\#D$ is the total number of the modeling domain statements.

Calculation of the semantic quality measures. The proposed approach uses the following procedure to extract the modeling domain statements using Natural Language Processing (NLP) techniques.

According to this procedure:

- the textual description of a business process S is tokenized and the bag of tokens T is obtained:

$$T = \{t_i | i = \overline{1, n}\}; \quad (3)$$

- the obtained tokens are turned into the lower case style and the bag L is obtained:

$$lower: T \rightarrow L; \quad (4)$$

- non-alphabetic tokens are removed and the bag of alphabetic tokens A remains:

$$alpha: L \rightarrow A; \quad (5)$$

- stop words are removed and the bag of meaningful tokens W remains:

$$stop: A \rightarrow W; \quad (6)$$

- tokens are stemmed and the bag of reduced tokens R remains:

$$stem: W \rightarrow R; \quad (7)$$

- finally, all possible duplicates are removed from the bag of tokens and the set U is obtained:

$$unique: R \rightarrow U; \quad (8)$$

The sequence of the procedure's steps is demonstrated in fig. 1 below.

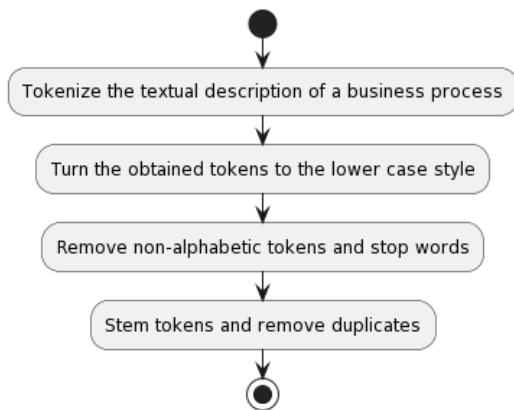


Fig. 1. The procedure for extraction of the modeling domain statements

This procedure (see fig. 1) can be applied not only to the textual description of a considered business process but also to text labels of the respective business process model activities.

Hence, using the tokens (3) transformed according to equations (4) – (8), two sets will be obtained:

- U_1 – the set of modeling domain tokens extracted from the textual description of a business process;
- U_2 – the set of tokens extracted from business process model element labels.

Therefore, we consider tokens that are present in U_2 but missing in the $U_1 \cap U_2$ as invalid – they do not belong to the modeling domain:

$$\#M \setminus D = \#U_2 - \#U_1 \cap U_2, \#M = \#U_2. \quad (9)$$

Similarly, we consider tokens that are present in U_1 but missing in the $U_1 \cap U_2$ as incorrect – they are incorrect in the modeling domain:

$$\#D \setminus M = \#U_1 - \#U_1 \cap U_2, \#D = \#U_1. \quad (10)$$

Finally, respective semantic quality measures can be calculated using equations (1) and (2).

The semantic quality measurement example. Let us consider the sample goods dispatch business process [12]. Its description in a text form is given in table 1 below, as well as the set of activity labels taken from its business process model given in the BPMN notation [12].

Table 1 – The input data for semantic quality measurement.

Business process description	If goods shall be shipped, the secretary clarifies who will do the shipping. If you have large amounts, special shipping will be necessary. In these cases the secretary invites three logistic companies to make offers and she selects one of them. In case of small amounts, normal post shipment is used. Therefore a package label is written by the secretary and a parcel insurance taken by the logistics department head if necessary. In the meantime the goods can be already packaged by the warehousemen. If everything is ready, the packaged goods are prepared for being picked up by the logistic company.
BPMN model's activity labels	Insure parcel Write package label Clarify shipment method Get 3 offers from logistic companies Select logistic company and place order Package goods Prepare for picking up goods

Using the developed Python software tool, we got the following sets (see table 2).

Table 2 – The obtained sets U_1 and U_2 .

U_1	[good, shall, ship, secretari, clarifi, larg, amount, special, necessari, case, invit, three, logist, compani, make, offer, select, one, small, normal, post, shipment, use, therefor, packag, label, written, parcel, insur, taken, depart, head, meantim, alreadi, warehousemen, everyth, readi, prepar, pick]
U_2	[insur, parcel, write, packag, label, clarifi, shipment, method, get, offer, logist, compani, select, place, order, good, prepar, pick]

Using the obtained sets demonstrated in table 2 we can calculate the semantic quality measures demonstrated in (1) and (2) using assumptions made in (9) and (10):

$$Semantic\ validity = 1 - \frac{5}{18} = 0.72, \quad (11)$$

$$Semantic\ completeness = 1 - \frac{26}{39} = 0.33. \quad (12)$$

The obtained results are shown in (11) and (12) above can be interpreted as follows:

• the analyzed business process model [12] is rather semantically valid since 72% of its activities belong to the modeling domain;

• the analyzed business process model [12] is rather semantically incomplete since only 33% of its activities reflect the actual business process.

Using the semantic quality measures (11) and (12), the analyzed BPMN model can be improved by replacing activities that are not relevant to the modeling domain and adding activities that reflect the actual business process.

Conclusion. In this paper, we proposed the approach and the software tool to find semantic quality measures of business process models. This approach is based on the procedure driven by NLP techniques. It considers textual descriptions of business processes as reference domain descriptions and text labels of business process model activities as evaluation subjects. Thus, using the Python Natural Language Toolkit (NLTK), the sets of lexemes that describe the modeling domain and the analyzed business process model were obtained and used to find semantic quality measures. In the future, the software tool should be improved to automatically “read” business process models, i.e. using optical character recognition or other techniques, and calculate their semantic quality measures.

References

- Kopp A., Orlovskiy D. Towards the Tokenization of Business Process Models using the Blockchain Technology and Smart Contracts. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022. Vol. 3137. P. 274–287.
- Gerth C. Business Process Modeling. *Business Process Models: Change Management. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2013. P. 14–23.
- Scheer A.-W. Strategic Business Process Analysis. *ARIS – Business Process Modeling*. Springer, 2013. P. 7–20.
- Bitkowska A. The relationship between Business Process Management and Knowledge Management – selected aspects from a study of companies in Poland. *Business Process Management: Current Applications and the Challenges of Adoption*. Cognitione Foundation for Dissemination of Knowledge and Science, 2020. P. 169–193.
- Krogstie J. *Quality in Business Process Modeling*. Springer, 2016. 250 p.
- Allweyer T. BPMN – A Standard from Business Process Modeling. *BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modeling*. BoD – Books on Demand, 2016. P. 9–14.
- Deming, IT, and BPM IDEF0 Diagrams. Available at: <https://www.bptrends.com/deming-it-and-bpm-idef0-diagrams/> (accessed: 25.03.2022).
- BPMN Tool Matrix*. URL: <https://bpmnmatrix.github.io/> (accessed: 25.03.2022).
- SourceForge – Search results for “bpmn”. URL: <https://sourceforge.net/directory/?q=bpmn> (accessed: 25.03.2022).
- Kopp A., Orlovskiy D. A Method for Business Process Model Analysis and Improvement. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2403. P. 1–10.
- Kopp A., Orlovskiy D. Intelligent Support of the Business Process Model Analysis and Improvement Method. *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications*. Springer, 2020. P. 111–135.
- BPMN for research*. URL: <https://github.com/camunda/bpmn-for-research> (accessed: 25.03.2022).

References (transliterated)

- Kopp A., Orlovskiy D. Towards the Tokenization of Business Process Models using the Blockchain Technology and Smart Contracts. *CEUR Workshop Proceedings*. 2022, vol. 3137, pp. 274–287.
- Gerth C. Business Process Modeling. *Business Process Models: Change Management. Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2013, pp. 14–23.
- Scheer A.-W. Strategic Business Process Analysis. *ARIS – Business Process Modeling*. Springer, 2013, pp. 7–20.
- Bitkowska A. The relationship between Business Process Management and Knowledge Management – selected aspects from a study of companies in Poland. *Business Process Management: Current Applications and the Challenges of Adoption*. Cognitione Foundation for Dissemination of Knowledge and Science, 2020, pp. 169–193.
- Krogstie J. *Quality in Business Process Modeling*. Springer, 2016. 250 p.
- Allweyer T. BPMN – A Standard from Business Process Modeling. *BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modeling*. BoD – Books on Demand, 2016, pp. 9–14.
- Deming, IT, and BPM IDEF0 Diagrams. Available at: <https://www.bptrends.com/deming-it-and-bpm-idef0-diagrams/> (accessed 25.03.2022).
- BPMN Tool Matrix*. Available at: <https://bpmnmatrix.github.io/> (accessed 25.03.2022).
- SourceForge – Search results for “bpmn”. Available at: <https://sourceforge.net/directory/?q=bpmn> (accessed 25.03.2022).
- Kopp A., Orlovskiy D. A Method for Business Process Model Analysis and Improvement. *CEUR Workshop Proceedings*. 2019, vol. 2403, pp. 1–10.
- Kopp A., Orlovskiy D. Intelligent Support of the Business Process Model Analysis and Improvement Method. *Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications*. Springer, 2020, pp. 111–135.
- BPMN for research*. Available at: <https://github.com/camunda/bpmn-for-research> (accessed 25.03.2022).

Надійшло (received) 05.04.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Копп Андрій Михайлович – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: kopp93@gmail.com

Орловський Дмитро Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: orlovskiy.dm@gmail.com

Kopp Andrii Mykhailovych – PhD in Computer Sciences, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: kopp93@gmail.com

Orlovskiy Dmytro Leonidovych – PhD in Technical Sciences, Docent, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Intelligent Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: orlovskiy.dm@gmail.com

О. Ю. МЕЛЬНИКОВ, В. Б. ГІТІС

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ЗАСВОЄННЯ ПОПЕРЕДНЬОГО МАТЕРІАЛУ НА УСПІШНІСТЬ ЗДОБУВАЧІВ ОСВІТИ З ОКРЕМОЇ ДИСЦИПЛІНИ

У роботі розглянуто основні поняття, пов'язані з якістю освіти у цілому та засвоєнням студентами навчального матеріалу. Сформульовано задачу прогнозування оцінки студента з будь-якої дисципліни, маючи дані щодо оцінок з «забезпечуючих» дисциплін. Наведено перелік методів, які можуть бути застосовані для розв'язання задачі (метод багатомірної регресії, метод штучних нейронних мереж, метод k найближчих сусідів), зроблено висновок щодо доцільності використання методу штучних нейронних мереж. Описано постановку задачі прогнозування засвоєння знань та навичок програмування; використана архітектура – перцептрон з чотирма вхідними нейронами, одним вихідним і 10 нейронами прихованого шару. Шляхом проведення низки числових експериментів підбрано оптимальну архітектуру нейронної мережі. У якості прикладу використано навчальний план та структурно-логічну схему освітньо-професійної програми «Інтелектуальні системи прийняття рішень» спеціальності 124 «Системний аналіз». Описано створену інформаційну модель проєктованої системи мовою візуального моделювання UML (діаграми варіантів використання, класів, кооперації, послідовності, станів, діяльності та компонентів). Описано можливості системи для дослідження впливу якості засвоєння попереднього матеріалу на прогнозування оцінок студентів з окремої дисципліни, наведено приклад функціонування цієї системи та проведено аналіз результатів розрахунків. Зазначено, що система дозволяє проведення аналізу результатів розрахунків для подальшого вибору найкращого методу для прогнозування.

Ключові слова: освітньо-професійна програма, структурно-логічна схема, прогнозування, штучна нейронна мережа, перцептрон, сигмоїда, навчання нейромережі, уніфікована мова моделювання, інформаційна модель, система підтримки прийняття рішень.

O. YU. MELNYKOV, V. B. GITIS

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE QUALITY OF ASSIMILATION OF THE PREVIOUS MATERIAL ON THE PREDICTION OF STUDENT GRADES IN A PARTICULAR DISCIPLINE

The paper considers the basic concepts related to the quality of education in general and the assimilation of students of educational material. The problem of predicting a student's grade in any discipline is formulated, having grades in "providing" disciplines. A list of methods that can be applied to solve the problem (multivariate regression analysis method, artificial neural networks method, k nearest neighbors method) is presented, a conclusion is made about the expediency of using the artificial neural networks method. The formulation of the problem of predicting the assimilation of knowledge and programming skills is described. The architecture used was a perceptron with four input neurons, one output neuron, and 10 hidden layer neurons. By conducting a series of numerical experiments, the optimal architecture of the neural network was selected. As an example, the curriculum and the structural and logical scheme of the educational and professional program "Intelligent Decision Making Systems" of the specialty 124 "System Analysis" were used. The created information model of the designed system is described in the visual modeling language UML (diagrams of use cases, classes, cooperation, sequence, states, activities and components). The possibilities of the system for studying the influence of the assimilation of the previous material on the prediction of students' grades in a particular discipline are described, an example of the functioning of this system is given, and an analysis of the results of calculations is carried out. It is indicated that the system allows analysis of the results of calculations for further selection of the best method for forecasting.

Keywords: educational and professional program, structural logic diagram, forecasting, artificial neural network, perceptron, sigmoid, neural network training, unified modeling language, information model, decision support system.

Вступ. Оцінка засвоєного студентами у межах навчальної дисципліни матеріалу, а також об'єктивність проведення цього контролю знань є одними з основних елементів визначення якості освіти [1]. Відомо, що рівень засвоєння індивідуумом нових знань залежить насамперед від його старанності та базового рівня знань, що є майже постійним за період навчання, тому різке відхилення у процесі оцінювання може свідчити про наявність проблем, об'єктивних і суб'єктивних факторів, які здійснюють вплив на освітній процес. Усі освітні компоненти на відповідному рівні вищої освіти, перелік навчальних дисциплін і логічну послідовність їх вивчення, кількість кредитів ЄКТС, а також очікувані результати навчання та компетентності, які повинен опанувати здобувач відповідного рівня вищої освіти, містяться в освітній програмі [2]. Структурно-логічна схема підготовки надається у вигляді мережі міждисциплінарних зв'язків і діє протягом всього строку реалізації відповідної програми підготовки. Отже, одним з чинників, що впливають на оцінку, яку отримує здобувач освіти (студент) з окремої дисципліни, є оцінки з «забезпечуючих» дисциплін, тобто тих, що передують цій.

Постановка задачі та вхідні фактори. Для

удосконалення керівництва навчальним процесом на випусковій кафедрі закладу вищої освіти вельми доцільним може бути прогнозування оцінок студентів за допомогою спеціалізованої інформаційної системи власної розробки. У зв'язку з тим, що існує достатня кількість методів для розв'язання задачі прогнозування, стає актуальним вибір такого методу, який буде максимально ефективними для аналізу конкретних даних.

Сформулюємо задачу таким чином. Нам потрібно спрогнозувати оцінку студента з будь-якої дисципліни, маючи дані щодо оцінок з «забезпечуючих» дисциплін:

$$y = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (1)$$

де y – оцінка з дисципліни, що прогнозується;

$x_i, i = 1 \dots n$ – оцінка з i -ї «забезпечуючої» дисципліни;

n – кількість «забезпечуючих» дисциплін.

У кожному випадку може бути застосовано окремий метод розв'язання задачі: багатофакторної лінійної регресії, штучних нейронних мереж, k найближчих сусідів. Слід провести дослідження, яке

дозволить визначити переваги та недоліки кожного з методів.

У [3] наведено алгоритм розв'язання поставленої задачі. Спочатку дослідник задає граничні значення параметрів для кожного методу (наприклад, мінімальну та максимальну кількість прихованих шарів штучних нейронних мереж тощо). Далі програмна система виконує розрахунок за кожним із методів, результати додаються до таблиці. Дослідник обирає найкращий, на його погляд, метод (як правило, за мінімальною сумарною помилкою, але можливі й інші критерії вибору). Обраний метод застосовується для прогнозування оцінок того ж предмета для нової групи. Вибір дисциплін, що забезпечують, не є явно пунктом наведеного алгоритму, оскільки здійснюється або безпосередньо з освітньої програми (її структурно-логічної схеми), або в результаті якихось попередніх досліджень.

Далі потрібно здійснити проектування інформаційної моделі системи [4] та її програмну реалізацію, але можна здійснити попередні розрахунки у середовищі Deductor Lite [5]. На прикладі даних щодо студентів спеціальності «Системний аналіз» [2] та предмета – засвоєння знань та навичок програмування – вже було здійснено розрахунки [6]. Було визначено чотири вхідних та один вихідний фактори:

x_1 – оцінка з дисципліни «Програмування та алгоритмічні мови»;

x_2 – оцінка з дисципліни «Алгоритми і структури даних»;

x_3 – оцінка з дисципліни «Математична логіка і теорія алгоритмів»;

x_4 – оцінка з дисципліни «Методи оптимізації та дослідження операцій»;

y – оцінка з дисципліни «Технологія створення програмних продуктів».

Назви груп та прізвища студентів є інформаційними факторами.

Рішення задачі методом штучних нейронних мереж. У якості даних були використані оцінки 77 студентів груп спеціальності «Системний аналіз» ДДМА – СМ-13-1, СМ-14-1, СМ-15-1, СМ-16-1 (змістовні наповнення навчальних курсів та викладачі за чотири роки не змінювалися). Спочатку здійснено розрахунок методом багатofакторної лінійної регресії, до таблиці результатів додано стовпці з перекладом результатів розрахунків зі 100-бальної системи до «національної» та співвідношення розрахункових результатів та наявних за «національною» шкалою («Помилка за балами»). Зроблено висновок, що багатofакторна лінійна регресія не може забезпечувати точності розв'язання задачі: 19 % даних мають відхилення за відносною помилкою більш ніж 10 %; 43 % даних мають невірне визначення балів.

Далі було здійснено рішення методом нейронних мереж. Спочатку для розрахунків використано мережу з чотирьох вхідних нейронів, одного вихідного і 10 нейронів прихованого шару (рис. 1). Різновид нейронної мережі – багатoshаровий перцептрон, метод на-

вчання мережі – зворотного поширення помилок, функція активації – експоненційна сигмоїда. Результати свідчать, що цей метод забезпечує більш адекватні результати: тільки 3 % даних мають відхилення за відносною помилкою більш ніж 10 %; тільки 16 % даних мають невірне визначення балів. Тому для побудови інформаційної системи було прийнято рішення про використання у якості модуля прогнозування багатoshарового перцептрон.

Проте для подальшої побудови перцептрон для розв'язання поставленої задачі потрібно визначити оптимальну кількість нейронів у прихованому шарі за заданою навчальною вибіркою. Ця задача нині не має суворого математичного рішення (під оптимальною тут розуміється мінімально необхідна для вирішення задачі кількість нейронів). Експериментально доведено, що якість роботи нейронної мережі з прямими зв'язками монотонно зростає при збільшенні кількості шарів і кількості нейронів у кожному шарі [7].

Кількість нейронів прихованого шару пов'язана з кількістю даних для навчання та необхідною кількістю входів і виходів мережі. Оцінити кількість нейронів у прихованих шарах можна за допомогою нерівності для оцінки кількості вагових коефіцієнтів необхідної для освоєння заданої кількості прикладів у навчальній вибірці [8]:

$$\frac{N_y N_p}{1 + \log_2 N_p} \leq N_w \leq N_y \left(1 + \frac{N_w}{N_x} \right) \times (N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (2)$$

де N_w – кількість ваг у мережі;

N_p – кількість елементів навчальної вибірки;

N_x і N_y – розмірність вхідного й вихідного сигналу відповідно.

Тоді кількість нейронів (N_n) у двoshаровій мережі можна визначити за формулою:

$$N_n = \frac{N_w}{N_x + N_y}. \quad (3)$$

Підставляючи у формулу (3) граничні значення N_w , розраховані за формулою (2), отримуємо мінімальну ($N_{H_{\min}}^w$) і максимальну ($N_{H_{\max}}^w$) кількість нейронів у прихованому шарі мережі. Усі значення округлюються до найближчого більшого цілого.

Для задачі, що вирішується, $N_x = 4$, а $N_y = 1$. Кількість прикладів у навчальній вибірці – $N_p = 78$. Підставляючи ці значення у формули (2) і (3), отримуємо наступні параметри нейромережі: $N_{H_{\min}}^w = 11$, $N_{H_{\max}}^w = 124$, $N_{H_{\min}}^w = 3$, $N_{H_{\max}}^w = 25$.

Окрім обсягу навчальної вибірки, на розмір мережі також впливає складність вирішуваної задачі. Складність задачі відповідає складності апроксимації вихідної функції нейронною мережею і визначається структурою і значеннями вихідних даних. Оцінити

складність апроксимації таблично заданої функції (навчальної вибірки) можна за допомогою вибіркової оцінки константи Ліпшица, що обчислюється за наступною формулою:

$$L_{\{x,y\}} = \max_{i \neq j} \frac{d_E(\bar{y}^i, \bar{y}^j)}{d_E(\bar{x}^i, \bar{x}^j)} = \max_{i \neq j} \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^K (y_k^i - y_k^j)^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^K (x_k^i - x_k^j)^2}}, \quad (4)$$

де $i, j = 1 \dots n$ – індекси прикладів у масиві початкових даних;

n – кількість прикладів у початкових даних;

\bar{x}^i – вектори вхідних сигналів нейромережі;

\bar{y}^i – вектори необхідних вихідних сигналів нейромережі;

$d_E(\bar{y}^i, \bar{y}^j)$ – відстань Евкліда між векторами вихідних сигналів;

$d_E(\bar{x}^i, \bar{x}^j)$ – відстань Евкліда між векторами вхідних сигналів.

$k = 1 \dots K$ – індекс компоненти вхідного вектору;

K – кількість компонент вхідного вектору.

Обчислюючи константу Ліпшица для наявної навчальної вибірки, отримано: $L_{\{x,y\}} = 15,11$.

Визначивши вибірку оцінку константи Ліпшица, можна перевірити можливість нейронної мережі заданої архітектури апроксимувати запропоновану навчальну вибірку. Для цього необхідно оцінити константу Ліпшица нейромережі й порівняти її з вибірковою оцінкою константи Ліпшица.

Константа Ліпшица для гомогенної прямої спрямованої нейронної мережі з функціями активації виду «експоненціальна сигмоїда» визначається за формулою [9, 10]

$$L_s \leq c^k \sqrt{N_x N_y} \prod_{i=1}^{k-1} N_{ni}, \quad (5)$$

де c – параметр активаційної функції (для експоненційної сигмоїди звичайно $c = 1$);

k – кількість шарів мережі (без урахування вхідного шару);

N_x – розмірність вхідного сигналу;

N_y – розмірність вихідного сигналу;

N_{ni} – кількість нейронів у i -му шарі.

Щоб нейронна мережа змогла апроксимувати вихідну функцію, необхідне виконання умови $L_{\{x,y\}} \leq L_s$. Тоді для двошарової мережі, виходячи з формул (4) і (5), кількість прихованих нейронів $N_{\text{нmin}}^L$ не має бути менше [11]

$$N_{\text{нmin}}^L = \frac{L_{\{x,y\}}}{c^k \sqrt{N_x N_y}}. \quad (6)$$

Підставляючи у формулу (5) обчислені вище параметри, отримуємо: $N_{\text{нmin}}^L = 8$.

Таким чином, з урахуванням формул (3) і (6) мінімальна кількість нейронів прихованого шару двошарової гомогенної прямої спрямованої нейронної мережі з функціями активації виду «експоненціальна сигмоїда» складе [11]

$$N_{\text{нmin}} = \max \{ N_{\text{нmin}}^w, N_{\text{нmin}}^L \}. \quad (7)$$

Таким чином, для вирішуваної задачі $N_{\text{нmin}} = 8$.

Уточнити кількість нейронів у прихованому шарі можна в процесі налаштування нейронної мережі за допомогою конструктивного алгоритму [12]. Відповідно до нього первинна кількість нейронів приймається рівною мінімальній кількості (розрахованої за формулою (7)). У разі невдалого навчання в прихований шар додається один нейрон, ваговим коефіцієнтам якого привласнюються випадкові значення. Додавання нейронів триває до тих пір, поки якість роботи нейромережі не досягне необхідного значення.

Далі було здійснено дослідження щодо підбору оптимальної архітектури нейронної мережі. При цьому кількість прихованих нейронів у експериментах починалась нарощуватися із значень, отриманих тільки за формулою (3). Результати зведено до таблиці (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати розрахунків з використанням різних архітектур нейронної мережі

Кількість шарів	Кількість нейронів	Середня відносна помилка	Середня помилка за балами	Середнє
1	3	12 %	19 %	15,5 %
1	4	5 %	27 %	16,0 %
1	5	4 %	8 %	6,0 %
1	6	5 %	13 %	9,0 %
1	7	4 %	13 %	8,5 %
1	8	4 %	17 %	10,5 %
1	9	1 %	10 %	5,5 %
1	10	3 %	16 %	9,5 %
2	2 + 2	9 %	19 %	14,0 %
2	3 + 3	8 %	17 %	12,5 %
2	4 + 4	3 %	13 %	8,0 %
2	5 + 5	3 %	10 %	6,5 %
2	6 + 6	3 %	8 %	5,5 %
3	2 + 2 + 2	26 %	22 %	24,0 %
3	3 + 3 + 3	4 %	14 %	9,0 %
3	4 + 4 + 4	4 %	9 %	6,5 %
3	5 + 5 + 5	1 %	8 %	4,5 %
3	6 + 6 + 6	3 %	8 %	5,5 %

Як можна побачити, кращий результат забезпечують такі архітектури:

– за середньою похибкою: MLP 4x5x5x5x1 (4,5 %);

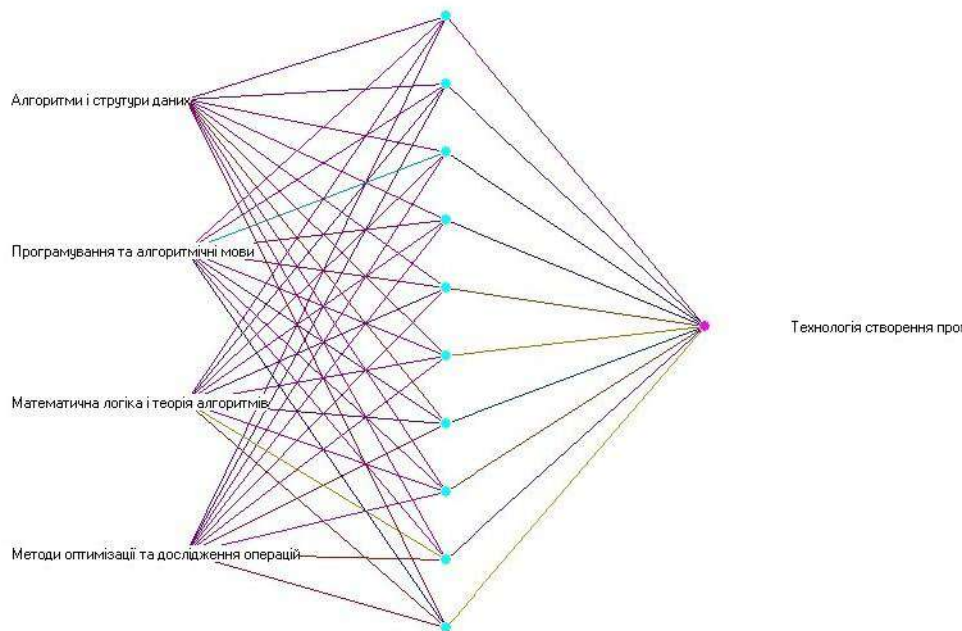


Рис. 1. Архітектура нейронної мережі MLP 4x10x1

– тільки за середньою відносною похибкою: MLP 4x9x1 або MLP 4x5x5x5x1 (1 %);

– тільки за середньою похибкою за балами: MLP 4x5x1, MLP 4x6x6x1, MLP 4x5x5x5x1 або MLP 4x6x6x6x1 (8 %).

Вочевидь, кращим будемо вважати архітектуру з трьома прихованими шарами з п'ятьма нейронами у кожному.

Формулювання алгоритму рішення. Оскільки для кожного конкретного набору даних співвідношення похибок прогнозування різних методів може відрізнятися від отриманих вище результатів, доцільно надати змогу користувачеві самостійно визначити переваги та недоліки кожного з методів (багатофакторної лінійної регресії, штучних нейронних мереж, k найближчих сусідів) для поточної задачі.

Алгоритм розв'язання поставленої задачі сформулюємо так.

1. Дослідник, спираючись на формули (2) – (7), задає граничні значення (параметри) для методу штучних нейронних мереж (мінімальну $N_{\text{нmin}}^L$ та максимальну $N_{\text{нmax}}^L$ кількість прихованих шарів, мінімальну $N_{\text{нmin}}$ та максимальну $N_{\text{нmax}}$ кількість нейронів у кожному прихованому шарі) та методу k найближчих сусідів (саме число k – діапазон значень від мінімального K_{min} до максимального K_{max}). Метод багатофакторної лінійної регресії зміни параметрів не передбачає.

2. Програмна система виконує розрахунок за кожним із методів, причому у кожному випадку повторює його задане число разів, вибираючи найкращий за сумарною помилкою (тобто де сумарна помилка мінімальна). Результати зводяться до таблиці з числом рядків N_s :

$$N_s = 1 + (N_{\text{нmax}}^L - N_{\text{нmin}}^L + 1) \cdot (N_{\text{нmax}} - N_{\text{нmin}} + 1) + (K_{\text{max}} - K_{\text{min}} + 1). \quad (8)$$

Число 1 на початку формули означає, що розрахунок за методом багатофакторної лінійної регресії проводиться рівно 1 раз.

3. Дослідник обирає найкращий, на його погляд, метод (як правило, за мінімальною сумарною помилкою, але можливі й інші критерії вибору).

4. Обраний метод (а у випадку вибору методу штучних нейронних мереж – обрана архітектура нейронної мережі) використовується для прогнозування оцінок того ж предмета для нової групи.

Вибір дисциплін, що забезпечують, не є явно пунктом наведеного алгоритму, оскільки здійснюється або безпосередньо з освітньої програми (її структурно-логічної схеми), або в результаті якихось попередніх досліджень. Дослідник повинен мати можливість обирати відсоток «навчаючої множини» для методів штучних нейронних мереж та k найближчих сусідів, тобто визначити, яка частка даних буде використана для навчання нейронної мережі та розрахунку помилок відповідно. Власне різновид нейронної мережі не обирається – це буде завжди перцептрон. Також не будуть обиратися метод навчання мережі (метод зворотного поширення помилок) та функція активації (експоненційна сигмоїда).

Отримані результати можна буде застосувати у роботі кафедри під час аналізу успішності студентів тощо.

Розробка спеціального застосунку. У процесі проектування інформаційної моделі системи мовою моделювання UML [4] створюються діаграми варіантів використання (рис. 2), класів (рис. 3), кооперації, послідовності, станів (рис. 4), діяльності та компонентів.

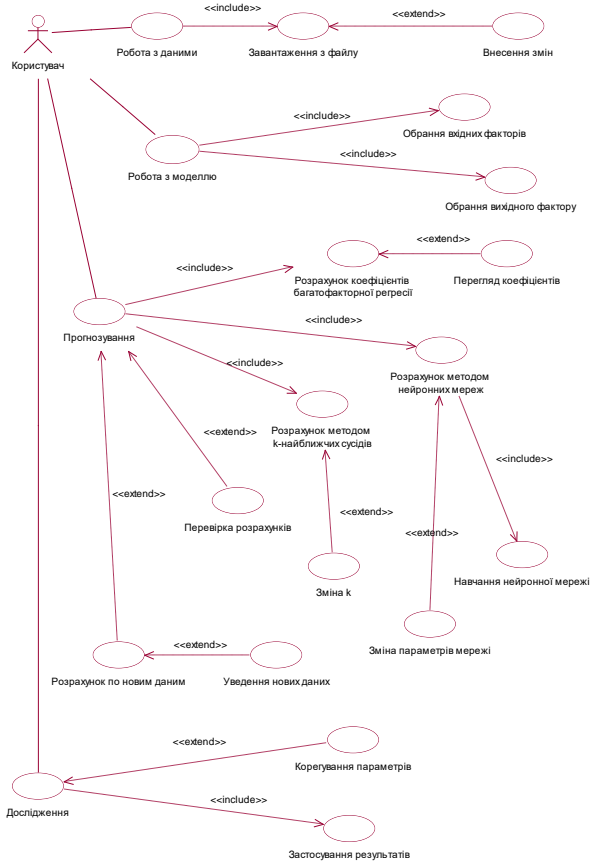


Рис. 2. Діаграма варіантів використання

«control», «CalcModule») і чотирьох допоміжних (з умовними іменами «LMFR», «MLP», «KNN» та «Data») [13].

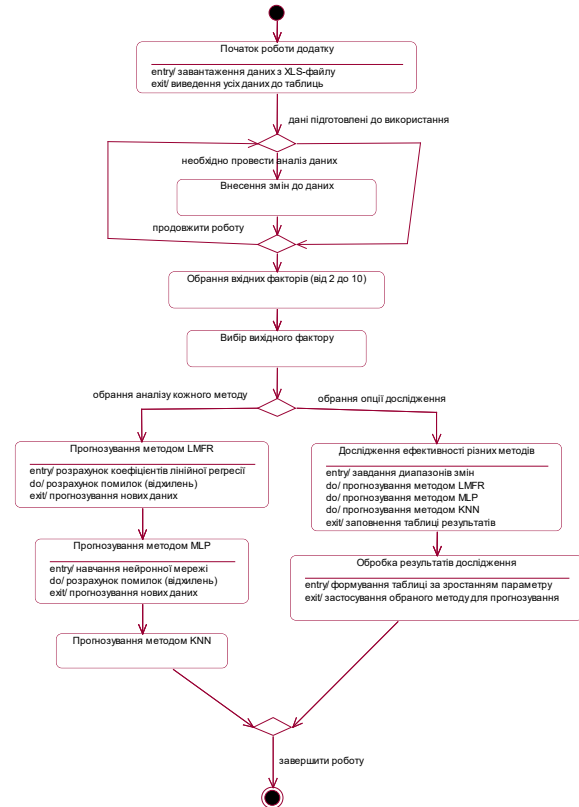


Рис. 4. Діаграма станів

У середовищі візуального програмування було розроблено додаток – систему підтримки прийняття рішень (рис. 5), що дозволяє здійснювати усі наведені раніше дії.

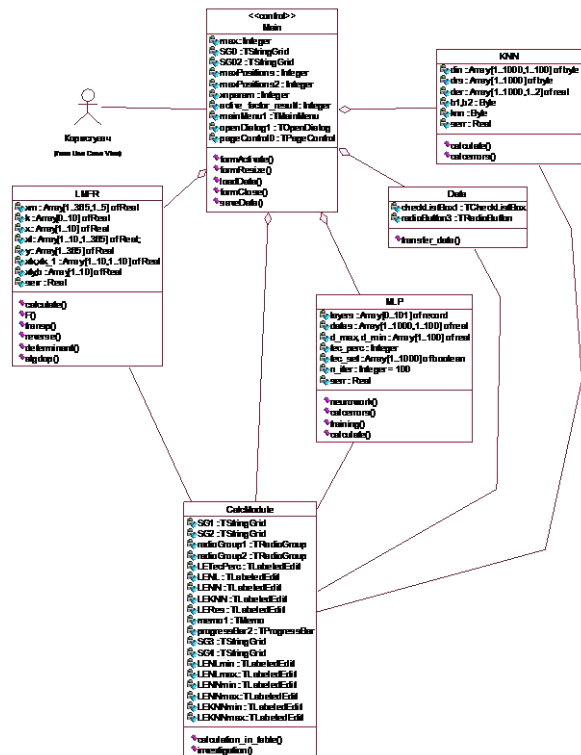


Рис. 3. Діаграма класів

Передбачається робота шести класів: двох основних («Main», керуючий клас – з атрибутом

Рис. 5 Завантажені таблиці даних

Результати розрахунків. Після завантаження усіх даних треба обрати перелік дисциплін, які впливають на результат, та власне дисципліну, оцінки з якої маємо спрогнозувати (рис. 6).

Після переходу до третьої вкладки усі вхідні дані автоматично будуть перероблені (рис. 7).

Стовпець 7 – вихідний фактор (оцінка з обраного предмета), стовпець 8 – результати розрахунків вихідного фактору, стовпець 9 – відносна різниця між наявними та розрахунковими (прогнозними) значеннями,

стовпець 10 – довідкова інформація про належність запису до навчальної («Teach») або тестувальної («Test») множини.

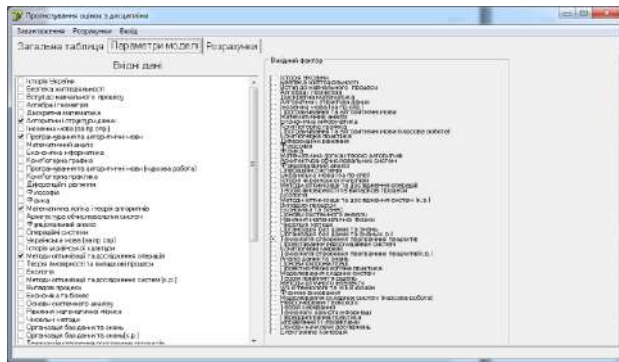


Рис. 6. Визначення факторів

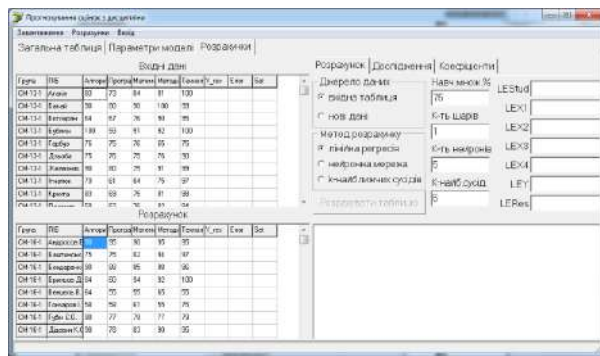


Рис. 7. Визначення факторів

Далі починаємо розрахунки усіма методами. По-перше, це метод багатofакторної лінійної регресії (рис. 8), який майже миттєво забезпечує користувача результатами (рис. 9).

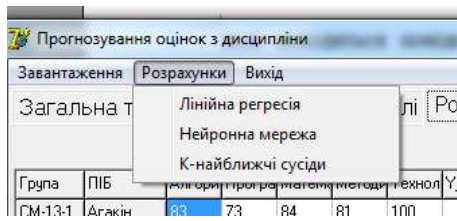


Рис. 8. Головне меню застосунку

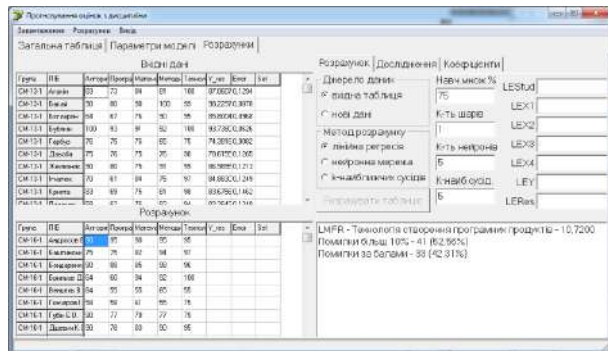


Рис. 9. Результати методу LMFR

Як можна побачити, цей метод створює значні помилки – близько 50 % за вхідною таблицею. Застосуємо цей же метод до нових даних шляхом вибору «Нові дані» та натискання кнопки «Розрахувати таблицю» (рис. 10). Помилки тут значно нижчі – 25 % за балами, але 40 % за відхиленням.

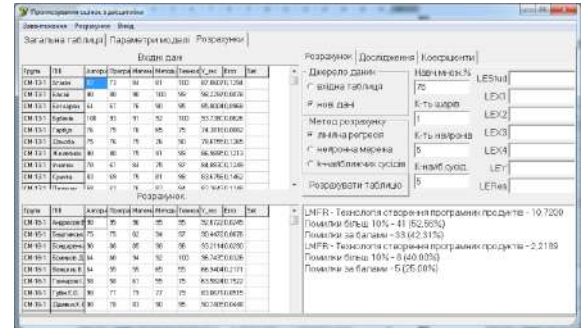


Рис. 10. Застосування методу LMFR до нових даних

Метод штучних нейронних мереж для одного прихованого шару з 5 нейронами (рис. 11) показує помилки близько 35 %. Застосування цього методу до нових даних видає 15 % (рис. 12).

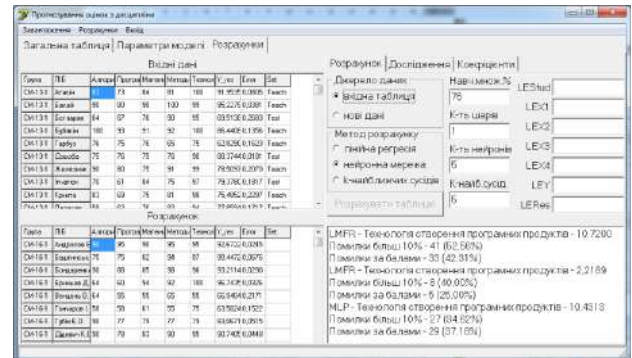


Рис. 11. Результати методу MLP

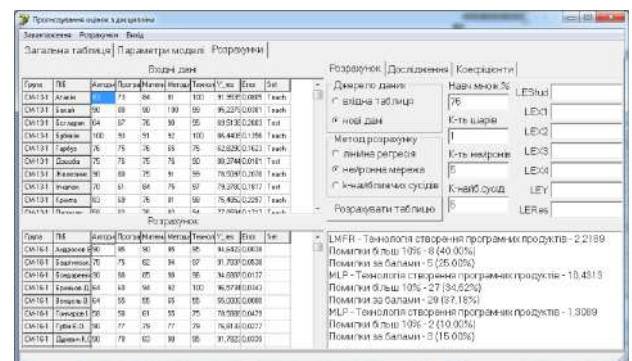


Рис. 12. Застосування методу MLP до нових даних

Зміна архітектури нейронної мережі шляхом збільшення кількості шарів до двох, а кількості нейронів до десяти майже не впливає на результат: – на вхідних даних (рис. 13) маємо 35 %; – на нових даних (рис. 14) маємо 20 %.

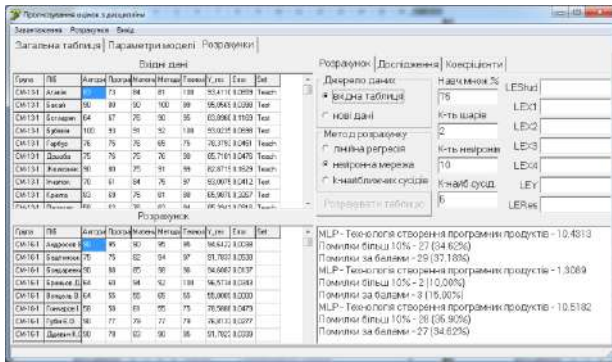


Рис. 13. Застосування методу MLP-2 до нових даних

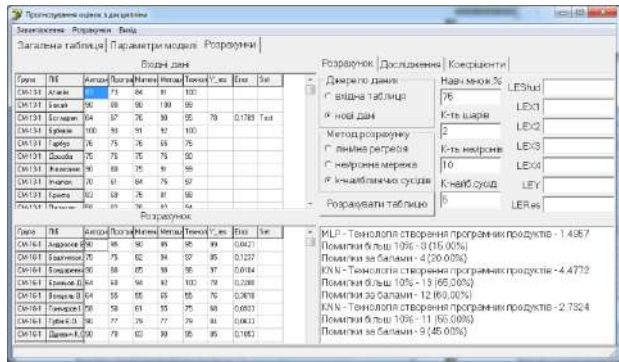


Рис. 16. Застосування методу KNN-5 до нових даних

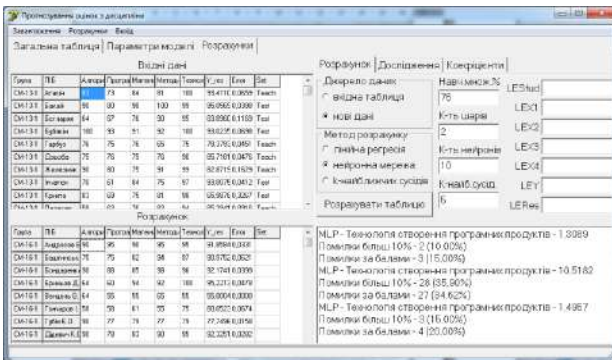


Рис. 14. Застосування методу MLP-2 до нових даних

Результат дослідження отримаємо на рис. 17 у таблицях «Результати розрахунку». Таблиця ліворуч зображає дані за порядком розрахунку, а праворуч – з упорядкуванням за зростанням обраного поля. Як правило, це середня похибка (останній стовпець). Мінімальне значення середньої похибки – 31 % (для архітектури з трьома нейронами у прихованому шарі).

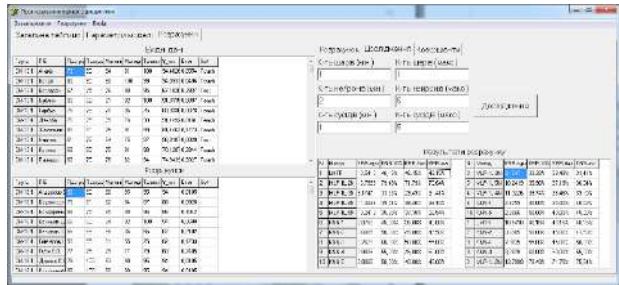


Рис. 17. Дослідження методів з MLP 4-1(2..5)

Метод k найближчих сусідів при заданні числа k рівним п'яти показує такі результати:

- на вхідних даних (рис. 15) маємо 60 %;
- на нових даних (рис. 16) маємо 45 %.

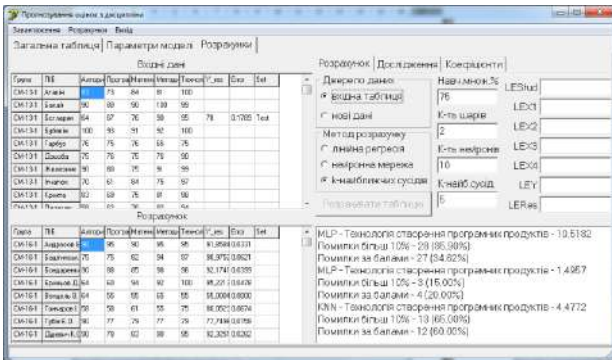


Рис. 15. Результати методу KNN-5

- Потім змінимо параметри дослідження:
- мінімальна кількість шарів мережі: 1;
 - максимальна кількість шарів мережі: 2;
 - мінімальна кількість нейронів у кожному шарі мережі: 2;
 - максимальна кількість нейронів у кожному шарі мережі: 5;
 - мінімальне значення k у методі «сусідів»: 2;
 - максимальне значення k у методі «сусідів»: 5.

Далі розглянемо роботу розділу «Дослідження». Спочатку залишимо параметри дослідження такими, як пропонується за замовчуванням:

- мінімальна кількість шарів мережі: 1;
- максимальна кількість шарів мережі: 1;
- мінімальна кількість нейронів у кожному шарі мережі: 2;
- максимальна кількість нейронів у кожному шарі мережі: 5;
- мінімальне значення k у методі «сусідів»: 2;
- максимальне значення k у методі «сусідів»: 5.

Результат дослідження отримаємо на рис. 18. Мінімальне значення середньої похибки також майже 31 % (для архітектури з п'ятьма нейронами у прихованому шарі).

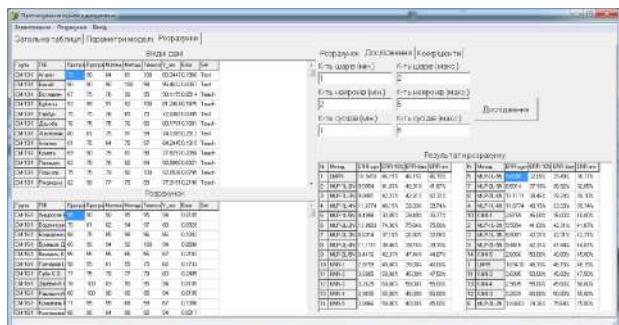


Рис. 18. Дослідження методів з MLP 4-(1..2)(2..5)

13. Мельников А. Ю. Прогнозирование изменения вклада преподавателя в работу кафедры и использованием методов интеллектуального анализа данных. *Информационные технологии и средства обучения*. 2018. № 1 (63). С. 266–287.

References (transliterated)

1. *Polozhennja pro vnutrishnju systemu zabezpečennja jakosti osvity* [Regulations on the internal system for ensuring the quality of education]. URL: http://www.dgma.donetsk.ua/docs/acts/Положення_про_внутр_сист_заб_якості_ДДМА_2020_Сайт.pdf. (accessed 21.11.2021).
2. *Osvitin'o-profesijna programa «Intelektual'ni systemy pryjnattja rishen'» pershogo rivnja vyshhoi' osvity za special'nistju № 124 «Systemnyj analiz» galuzi znan' № 12 «Informacijni tehnologii'»*. [Educational and professional program "Intelligent Decision Making Systems" of the first level of higher education in the specialty No. 124 "System Analysis" of the branch of knowledge No. 12 "Information Technologies"]. URL: http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/ispr/opp/Системний_аналіз_бакалавр.pdf (accessed 21.11.2021).
3. Melnykov O. Ju., Bobryk A. V. Postanovka zadachi doslidzhennja vplyvu jakosti zasvojennja poperedn'ogo materialu na prognozuvannja ocinok studentiv z okremoi' dyscypliny. [Statement of the problem of studying the influence of the quality of assimilation of the previous material on the prediction of students' grades in a particular discipline]. *Suchasna osvita – dostupnist', jakist', vyznannja: zbirnyk naukovyh prac' XIII Mizhnarodnoi' naukovo-metodychnoi' konferencii', 16–18 lystopada 2021 roku*. [Proc. of the Int. Conf. "Modern education - accessibility, quality, recognition"]. Kramators'k, DDMA Publ., 2021, pp. 199–201.
4. Melnykov O. Ju. *Ob'jektno-orijentovanyj analiz i projektuvannja informacijnyh system: posibnyk dlja studentiv special'nostej «Systemnyj analiz» ta «Informacijni systemy ta tehnologii'»*. Vyd. 3-je, pererob. ta dop. [Object-oriented analysis and design of information systems: a manual for students of the specialties "System Analysis" and "Information Systems and Technologies"]. Kramators'k, DDMA Publ., 2020. 208 p.
5. *Deductor – prodivnutaja analitika bez programmirovannja* [Deductor – advanced analytics without programming]. URL: <https://basegroup.ru/deductor/description> (accessed 21.11.2021).
6. Melnykov O. Ju. Prognozuvannja ocinok studentiv z okremoi' dyscypliny zalezho vid jakosti zasvojennja poperedn'ogo materialu. [Prediction of students' grades in a separate discipline, depending on the quality of mastering the previous material]. *Suchasni informacijni tehnologii', zasoby avtomatyzacii' ta elektropyvod: materialy V Vseukrai'ns'koi' naukovo-tehnicnoi' konferencii'*. [Proc. of the Int. Conf. "Modern information technologies, automation equipment and electric drive"]. Kramators'k, DDMA Publ., 2021, pp. 297–300. <http://dSPACE.dgma.donetsk.ua/handle/DSEA/802> (accessed 21.11.2021).
7. Galushkyn A. Y. *Nejrokomputeri. Kn.3: Uchebnoe posobie dlja vuzov*. [Neurocomputers]. Moscow, YPRZhR Publ., 2000. 528 p.
8. Widrow B., Lehr M. A. 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline and backpropagation. *Proceedings of the IEEE*. 1990, vol. 78, №. 9, pp. 1415–1442.
9. Gorban' A. N. at al. *Nejroinformatika*. [Neuroinformatics]. Novosibirsk, Nauka, Sibirskaja izdatel'skaja firma RAN Publ., 1998. 296 p.
10. Mirkes E. M. *Nejroinformatika: ucheb. posob.* [Neuroinformatics]. Krasnojarsk, KGTU Publ., 2002. 120 p.
11. Gitis V. B. *Nejromerezhni tehnologii': navchal'nyj posibnyk*. [Neural network technologies]. Kramators'k, DDMA Publ., 2021. 248 p.
12. Wynne-Jones M. Node splitting: A constructive algorithm for feed-forward neural networks. *Neural Computing and Applications*. 1993, vol. 1, №. 1, pp. 17–22.
13. Melnikov A. Ju. Prognozirovanie izmenenija vклада преподавателя в работу кафедры и использованием методов интеллектуального анализа данных. [Predicting the change in the teacher's contribution to the work of the department and the use of data mining methods]. *Informacijnye tehnologii i sredstva obuchenija*. [Information technology and learning tools]. 2018, № 1 (63), pp. 266–287.

Надійшла (received) 05.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Мельников Александр Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>; e-mail: alexandr@melnikov.in.ua

Гітис Веніамін Борисович – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7434-8259>; e-mail: veniamin.gitis@gmail.com

Melnykov Oleksandr Yuriyovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), docent, Donbas State Engineering Academy, Associate Professor of the Department of Intelligent Decision Making Systems; Kramatorsk, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>; e-mail: alexandr@melnikov.in.ua

Gitis Veniamin Borisovych – Candidate of Technical Sciences (PhD), docent, Donbas State Engineering Academy, Associate Professor of the Department of Intelligent Decision Making Systems; Kramatorsk, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7434-8259>; e-mail: veniamin.gitis@gmail.com

N. V. GOLIAN, V. V. GOLIAN, I. V. AFANASIEVA

BLACK AND WHITE-BOX UNIT TESTING FOR WEB APPLICATIONS

The types of the testing methods were analyzed from the side of development. If changes are made to the code, even minor ones, bugs can appear anywhere in the system. The cost of fixing bugs increases with the time they are discovered. Using effective web testing can prevent unexpected costs. Modern web applications are indeed a place where all the type of the testing is vital for the high-quality product. At the moment, traditional front and back office applications are increasingly moving from desktop computers to web interfaces, so testing web applications is becoming extremely relevant. Thus, learning what to automate and how is an important component of successful web application testing. Web application testing is a software practice that is designed to ensure quality by verifying that the functionality of a particular web application works correctly or according to fixed requirements. Web testing makes it possible to find bugs at any point in time, before release or on a daily basis. On the one hand there are wide range of tools that could be used to pursue this goal by means of using best decisions present for now but on the other hand there are essential advantages and disadvantages present in these tools, which are all in the approach to it, so there are always cons and pros of using one or another. For now, despite on having the ability to test using both black and white box testing it looks like the second one is not the best choice. There are several points on each board for both of them, but black box approach that is being represented with react testing library is more successful and efficient way to cover and application with high- and low-level tests, that could be easily maintained and understood. But white box testing is now the most used decision due to the historic development of the industry. So, it also has some great features and could be chosen to be used on the project, but it should be precise choice with the understanding of all the consequences standing behind.

Keywords: manual testing, automated testing, black-box testing, white-box testing, enzyme library, react testing library.

Н. В. ГОЛЯН, В. В. ГОЛЯН, І. В. АФАНАСЬЄВА

МОДУЛЬНЕ ТЕСТУВАННЯ БІЛОЇ ТА ЧОРНОЇ СКРИНЬКИ ДЛЯ ВЕБ ЗАСТОСУВАНЬ

Види методів тестування були проаналізовані з боку розробки. Якщо в код вносяться зміни, навіть незначні, помилки можуть виникнути будь-де системі. Вартість виправлення помилок зростає з часом їх виявлення. Використання ефективного веб тестування може запобігти непередбаченим витратам. Сучасні веб застосування дійсно є місцем, де весь тип тестування є життєво важливим для якісного продукту. На даний момент традиційні фронт та бек-офісні програми все частіше переходять з настільних комп'ютерів на веб інтерфейси, тому тестування веб застосувань стає вкрай актуальним. Таким чином, вивчення того, що і як автоматизувати, є важливим компонентом успішного тестування веб застосувань. Тестування веб застосувань є практикою програмного забезпечення, яка призначена для забезпечення якості за рахунок перевірки того, що функціональні можливості певного веб програми працюють правильним чином або відповідно до зафіксованих вимог. Веб тестування дає можливість знаходити помилки в будь-який час, до релізу або щодня. З одного боку, є широкий спектр інструментів, які можна було б використовувати для досягнення цієї мети за допомогою використання найкращих рішень, присутніх на даний момент, але з іншого боку, є суттєві переваги і недоліки, присутні в цих інструментах, які всі в підході до нього, тому завжди є мінуси і плюси використання того чи іншого. Поки що, незважаючи на можливість тестування з використанням як чорної, так і білої скриньки, останній метод має багато недоліків та не рекомендується до використання. Ці два методи мають місце бути у окремих проєктах, але підхід чорної скриньки, який представлений бібліотекою тестування React є найбільш успішним і ефективним способом покрити і застосування з високими і низькими тестами, які можна легко підтримувати і розуміти. Але тестування білої скриньки в даний час є найбільш вживаним рішенням у зв'язку з історичним розвитком галузі. Отже, воно також має деякі позитивні риси і може бути обрано, щоб бути використаним на проєкті, але повинно бути точним вибором з розумінням всіх наслідків, що за ним слідують.

Ключові слова: ручне тестування, автоматизоване тестування, метод чорної скриньки, метод білої скриньки, бібліотека enzyme, бібліотека тестування react.

Introduction. Since the very beginning of the development process the ability to tests your application is one of the edge things one would like to have to be sure that high quality product is being provided. The main reason for this is to assure the developer that the application works as expected, but also it does a lot of other aspects of work.

Namely finding defects that could appear while development process of the software, keep the level of quality of the product that may be documented, also being able to prevent the defects, test that the final result corresponds to the business requirements as well as System Requirements Specification and Business Requirement Specification, and less but not the least is to assure product owner and stake holders that the product is good enough to be driven in production mode [1].

Types of testing. So it came to the question of what and how should be tested. The main very abstract division between two types is automated and manual testing [2].

Manual testing. Manual testing is done by some real person that tries to interact with the application by means of clicking it or using some special tools for the tests that

makes it way easier to find some inappropriate in terms of the quality parts out. As it is for now this type of testing is the most expensive for now.

Manual Testing is part of the testing process at the quality control stage in the software development process [3]. Testers or ordinary users carry it out by simulating possible user action scenarios.

Manual testing is to perform a documented procedure, where the method of performing the dough is described. The technique sets the test order and for each test – a list of parameter values that is fed to enter the list of results at the output. Since the procedure is intended for a person performing, in its description, some default values can be used for brevity, or references to information stored in another document.

The task of the tester is to find the largest number of errors. It should be good to know the most frequently allowed errors and be able to find them for the lowest time. The remaining errors that are not typical are detected only by carefully created test sets. However, it does not follow from this that for typical errors it is not necessary to make tests.

Automated testing. As a completely another approach to testing the automated tests are done with the machine, that goes through the product using some scripts that test it. Here it comes the main necessity of this type of tests which is the ability to test way more parts, as automated tests could have different level of the complexity. The complexity itself differs basing on the aim of it which are the different approach of it. So, by means of the automated tests we can cover almost everything starting with the class method or a whole flow of the user.

But the main problem here is that this type of tests is deeply depended on the quality of them that means that the higher quality of test's script the higher quality the coverage is at the end.

Types of automated tests. Continuous testing accelerates the supply of software, making the entire testing process faster. And thanks to the immediate feedback, which helps in the earliest stages to identify errors and other problems in the application, ensures that development teams will create high-quality and reliable applications. In addition, the ability to organize and conduct effective testing can significantly reduce the costs of the company, both by saving the time of developers and due to the creation of a qualifying supply conveyor in which they can quickly make changes to the code with minimal risks of impaired application performance in the productive environment.

There are some types of automated test should be mentioned to be understood the final goal of the unit ones.

Functional testing. Functional testing is the one of the most popular types of them being used to test the main functions of the system its usability, the ability for the different types of users to use the application and so on. This type of test it is the most abstract one and it includes unit testing, integration testing, smoke testing, and user acceptance testing.

Unit tests. Unit tests is the cheapest type of the tests, as it is being run over individual parts of the application that are called components in isolation [4]. For example, the application that is calculator could have the division operation F, that consists of some function A and B. It means that one should test F, A, B separately without trying to depend one on another.

This type of tests bring tons of the benefits to the quality of the application because it says one the parts the risky as the bugs may appear on the spots that are detected by them on the deepest level possible.

It also gives one the ability to understand the logic of application or its parts without digging to deep in it, so developer or another stakeholder person could not even have no idea of what is going on in the code but can easily understand what this part does.

Integrational testing. The third one is integrational testing which is on another level of the testing pyramid, which is a fundamental in understanding of how and what should be tested [5].

Testing Pyramid – Concept, according to which there are several levels, on which test automation is possible: module level, service level, E2E (system level) [6].

As it is shown on the fig. 1 the higher, we get from the unit testing the more interactions are being done to test

it, this is actually the main purpose of such a testing. One is trying to go higher and connect different isolated parts of the application to the more complex one and test it, not relying on the unit cases.

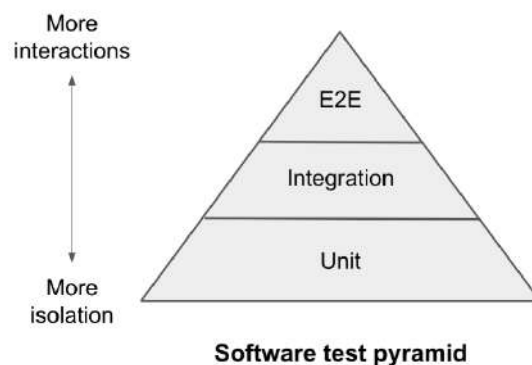


Fig. 1. Testing pyramid

This type of tests is more expensive than the previous one, but on the other hand it brings a developer the ability to understand what happens in more precise way which means that the developer could build essential part of the application and test is isolated.

End-to-end testing. This is the last but not the least type of testing used to verify whether the application works as expected and matches business requirements. Also, to be mentioned that this testing is the most expensive among all the automated tests.

It is as it is due to the number of resources being involved to test one essential part of the product because end-to-end tests scripts requires the high-level understanding of the application logic and also the higher level of the person that writes it. The script itself tests some whole flow of the user, for example it could go through a page and interact with the interface trying to pretend user's behavior.

So, it makes one to think about the flow and script as a user which involves way more resources makes it way more expensive than mentioned above types.

Root problem. So, it gives a developer a space to do a lot with tests, starting with the way an application could be testing and ending with the level of the tests, it also should be considered that the type itself requires different level of the expenses and skills of the one developing tests.

So, the main aim of the automated testing is to be written in the most effective and cheapest way as it should cover as much as possible and also cost the better the less.

Good thing is that any developer of the modern user web-application could use wide range of tools to do that. There are several approaches in testing that are widely used and the main two are black and white-box testing.

The most important and useful for now actually basic one is unit testing where it is always the widest range of how and by means of what it could be done.

Black-box testing. Black box testing is a technique of checking out software program wherein the inner workings (code, architecture, design, etc.) are not known by the tester. Black container checking out makes a

specialty of the conduct of the software program and includes checking out from an outside or end-person perspective. With black container checking out, the tester examines the software program's capability without searching on the code or having any understanding of the application's inner flows. Inputs and outputs are examined with the aid of using being as compared to the predicted output. If the output does not in shape the predicted output, a Trojan horse has been found.

The term "black box" is used due to the fact you do not dig into the application. For this reason, non-technical specialists regularly use black box tests. Types of black field trying out consist of purposeful trying out, gadget trying out, usability trying out, and regression trying out.

Advantages: allows you to quickly find bugs in the developed functionality of software: the tester does not have to have a narrow-profile specialty, check runs from the end of the end user, you can develop test cases immediately after completion with the specification.

With this test method, you can perform the following checks: functional verification software, regression inspections, usability testing, smoke testing, check the graphical user interface.

White-box testing. White box testing is a way of trying out software program wherein the inner state (code, architecture, design, etc.) are recognized to the tester [7]. Therefore, it validates the inner shape and frequently specializes in enhancing safety and making the waft of inputs and outputs greater green and optimized. In this type of trying out, the tester appears for inner safety holes and damaged or poorly based coding paths. The term "white field" refers to having visibility into the inner workings. Because of this, a greater technically professional individual conducts the tests. Different forms of this manner consist of unit trying out and integration trying out.

So, it was just some terms to understand what we are going to go through next. The issue that is going to be used to cover the main problem of a discussion for this theme is black and white box testing approaches in modern web applications, where as an example we are going to use the most popular library for that which is namely ReactJS and the most popular framework for testing Jest and React Testing Library and Enzyme libraries for black and white box testing respectively [8].

As was already described above white box testing is a testing that requires the knowledge of the internal implementation of your component, which is being tested. This leads us to some issues. First of them is over specification, which means the when writing test one is being concentrated on how the component is constructed the details of the implementation actually, when the main purpose of testing itself is to test component behavior. This leads to construction of the application that is fragile and is hard to change. In addition, this gives us a space to use code smells i.e., calling some method of the component directly, which means that you are not testing component and its behavior it means that one is testing inner parts of the component.

So to sum up, testing a white box is a special method of checking the software that implies that the internal

structure and technical features are thoroughly known to be checked.

Checking the white box consists of several complementary test types used to assess the ease of use of the web product, part of the code or special software functional.

Based on such testing, you can perform the following checks: unit tests, integration checks, system test components, checking the security architecture of software [9].

Traditionally, programmers are engaged in a similar type of testing, since for such inspections the specialist must have a high technical qualification.

Basic advantages of such a test method: optimization of the program code by searching for hidden bugs, creation of automated test cases, using the most suitable type of input data used for a qualitative testing process.

Grey-box testing. Grey-box testing – a special method of testing software with incomplete knowledge of its internal device. To perform a similar type of test, you do not need to have access to the source code of the software.

All tests are created based on simple knowledge of algorithms, architectures, and other high-level characteristics of the behavior of the product.

Types of grey box tests: regression inspections, matrix checks, template testing, check on using an orthogonal array, the main advantages of the method:

It has some features of the black and white box. In other words, the tester looks at the object of checking from the position of the black box, but analyzes the system with an accurate calculation of the data that it is pre-known (white box).

The QA specialist can create and apply more complex test scenarios.

This check allows the programmer to enlist sufficient time to correct bugs.

The programmer interacts with the tester at the initial level, which makes it possible to immediately remove unnecessary and excess test cases.

Disadvantages: analysis of the program code is limited since there is no access to the source code at the test, there is no time to test all the flows of input and output information, as it will take a lot of time., a situation is possible when testers can be superfluous (when not only the QA specialist but also the programmer checks its code with the help of unit tests).

Enzyme testing. So, for example using white box approach pushes us having Enzyme library in React JS application makes us think about the component meant to be tested as some ready isolated part of the application could be also called class or method. The library itself in connection with Jest framework knows about the component internals and could easily interact with the API of the component, so almost all convectional tests written with Enzyme considered black-box tests [10].

On the one hand it brings a lot of benefits to the platform and also essential ones covering all the main aims of the testing itself which are prevention of the bugs in code, unexpected behavior of the component, the ability to verify production code vulnerabilities, saves developer

time by means of making one not bothering about the impact of the previous task and concentrate on the current one, also reduces the amount of work for the manual testers if present.

On the other hand, platform pushes the developer to write white-box tests, it also consumes a lot of resources involved into the testing process which leads us to the next issues that is performance.

One of the main issues is the maintainability as it was mentioned because platform problem is that the written test script for the component more than two or three functions influences the amount of script code and it grows exponentially.

Another issue present is that with the time it takes more and more time and money to maintain the tests which bounds developers from being rotated to another position, so it increases the cost of the project.

The one issue that is not being mentioned consists of two parameters which are the complexity of the tests as a separate module and inability to get deep into them if it wasn't written by the developer that investigates one. This is vital issue for newcomers that spend a lot of time just to understand what is going on with the code.

Also, it brings here another point which is immersive tools variety present in the library that requires high level of the writer of the code, so the person that develops scripts for this type of tests should have impressive understanding of the script writing techniques.

This leads us to the problem of the lack of the resources of the project because it starts to consume more and more resources being introduced into the testing process. It also exponentially increases the amount of money being spent so this type of testing is not the best decision despite on being black-box approach testing.

React testing library. There is present another choice for testing of the modern user web-application that is more effective and uses the whole another approach in testing.

This type of testing is meant to be black-box testing and gives a developer limited but wide range of the tools that could be used to write tests.

The main advantages of the react testing library despite being white-box testing library is that it is the fastest and the most maintainable way to write test scripts for now in the web-applications.

So black-box approach present in this type of tests pushes a developer to think about component from user perspective it means that it should be thought as what is done but not how.

Also, it gives tons of advantages in comparison to black-box testing present for now in React [11]. Namely, it has limited tools to be able to test with, so it is fully backward compatible, it takes away excessive work required to cover a component with tests, it is not meant to use only for React applications, that brings here one more advantage which is the most flexible approach to testing.

As well as mentioned above it is a good way to keep high level of the accessibility of the application, because if react testing library used tests of that could not be written in case of the bad code quality, so it also controls the code quality subconsciously. Here is one from the other

consequences of using this approach is that a developer should not think about implementation details [12].

For example, the one trying to extract some component and test it this should be done by means of using some unique identifier but not text or styles as it is done in white-box approach. It makes tests way more flexible and maintainable because code could change and inner implementation of it as well, but the tests are going to still be valid. So it saves essential amount of time and resources including project budget in perspective.

Black-box testing uses whole different approach in tests implementation, and there are main ones: it deals with directly DOM nodes, and not platform specific components that are rendered into DOM node, increases the level of testing pyramid from only unit tests written with Enzyme.

So, to be mentioned one of the best advantages of this library which is easy to start and easy to dig into tests, so a developer with a superficially understanding of the code and tests could understand them without spending too much time on the investigation.

It makes it easier to write and maintain code, also saves vital amount of time and expenses that grow with the time as project expands.

Conclusions. Modern web-applications are indeed a place where all the type of the testing is vital for the high-quality product. On the one hand there are wide range of tools that could be used to pursue this goal by means of using best decisions present for now but on the other hand there are essential advantages and disadvantages present in these tools, which are all in the approach to it, so there are always cons and pros of using one or another.

For now, despite on having the ability to test using both black and white box testing it looks like the second one is not the best choice. There are several points on each board for both of them, but black box approach that is being represented with react testing library is more successful and efficient way to cover and application with high-level and low-level tests, that could be easily maintained and understood.

But white box testing is now the most used decision due to the historic development of the industry. So, it also has some great features and could be chosen to be used on the project, but it should be precise choice with the understanding of all the consequences standing behind.

References

1. Bentley J., Bank W., Charlotte N. C. *Software Testing Fundamentals – Concepts, Roles, and Terminology. Planning, Development and Support*. URL: <https://support.sas.com/resources/papers/proceedings/proceedings/sugi30/141-30.pdf> (accessed: 10.05.2022).
2. Jenkins N. A. *Software Testing Primer v.2*. OPENLIBRA, 2017. 55 p.
3. Myers G. J. *The art of software testing*. New York: Wiley, 2011. 256 p.
4. Gotel O., Cleland-Huang J., Hayes J., Zisman A., Egyed A. *Software and Systems Traceability*. London: Springer, 2012. 152 p.
5. Rubin K. S. *Essential Scrum: A Practical Guide to the Most Popular Agile Process*. Addison-Wesley Professional, 2012. 452 p.
6. Mike Cohn. *Succeeding with Agile: Software Development Using Scrum 1st Edition*. Addison-Wesley Professional, 2009. 512 p.

7. *Important Software Test Metrics and Measurements*. URL: <http://www.softwaretestinghelp.com/software-test-metrics-and-measurements> (accessed: 10.05.2022).
8. Crump, S. C. *Simplify Testing with React Testing Library: Create maintainable tests using RTL that do not break with changes*. London: Packt Publishing, 2021. 246 p.
8. Daniel Irvine. *Mastering React Test-Driven Development: Build rock-solid, well-tested web apps with React, Redux and GraphQL*. London: Packt Publishing, 2019. 496 p.
10. David Flanagan. *JavaScript: The Definitive Guide: Master the World's Most-Used Programming Language 7th Edition*. London: O'Reilly Media, 2020. 706 p.
11. Carlos Santana Roldán. *React Design Patterns and Best Practices: Design, build and deploy production-ready web applications using standard industry practices 2nd Edition*. London: Packt Publishing, 2019. 350 p.
12. Trevor Burnham. *Test-Driven React: Find Problems Early, Fix Them Quickly, Code with Confidence 1st Edition*. London: Pragmatic Bookshelf, 2019. 192 p.
3. Myers G. J. *The art of software testing*. New York: Wiley, 2011. 256 p.
4. Gotel O., Cleland-Huang J., Hayes J., Zisman A., Egyed A. *Software and Systems Traceability*. London: Springer, 2012. 152 p.
5. Rubin K. S. *Essential Scrum: A Practical Guide to the Most Popular Agile Process*. Addison-Wesley Professional, 2012. 452 p.
6. Mike Cohn. *Succeeding with Agile: Software Development Using Scrum 1st Edition*. Addison-Wesley Professional, 2009. 512 p.
7. *Important Software Test Metrics and Measurements*. Available at: <http://www.softwaretestinghelp.com/software-test-metrics-and-measurements> (accessed: 10.05.2022).
8. Crump, S. C. *Simplify Testing with React Testing Library: Create maintainable tests using RTL that do not break with changes*. London: Packt Publishing, 2021. 246 p.
9. Daniel Irvine. *Mastering React Test-Driven Development: Build rock-solid, well-tested web apps with React, Redux and GraphQL*. London: Packt Publishing, 2019. 496 p.
10. David Flanagan. *JavaScript: The Definitive Guide: Master the World's Most-Used Programming Language 7th Edition*. London: O'Reilly Media, 2020. 706 p.
11. Carlos Santana Roldán. *React Design Patterns and Best Practices: Design, build and deploy production-ready web applications using standard industry practices 2nd Edition*. London: Packt Publishing, 2019. 350 p.
12. Trevor Burnham. *Test-Driven React: Find Problems Early, Fix Them Quickly, Code with Confidence 1st Edition*. London: Pragmatic Bookshelf, 2019. 192 p.

References (transliterated)

1. Bentley J., Bank W., Charlotte N. C. *Software Testing Fundamentals – Concepts, Roles, and Terminology. Planning, Development and Support*. Available at: <https://support.sas.com/resources/papers/proceedings/proceedings/sugi30/141-30.pdf> (accessed: 10.05.2022).
2. Jenkins N. A. *Software Testing Primer v.2*. OPENLIBRA, 2017. 55 p.

11. Carlos Santana Roldán. *React Design Patterns and Best Practices: Design, build and deploy production-ready web applications using standard industry practices 2nd Edition*. London: Packt Publishing, 2019. 350 p.
12. Trevor Burnham. *Test-Driven React: Find Problems Early, Fix Them Quickly, Code with Confidence 1st Edition*. London: Pragmatic Bookshelf, 2019. 192 p.

Received 13.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Голян Наталія Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1390-3116>; e-mail: nataliia.golian@nure.ua

Голян Віра Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5981-4760>; e-mail: vira.golan@nure.ua

Афанасьєва Ірина Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4061-0332>; e-mail: iryna.afanasieva@nure.ua

Golian Nataliia Viktorivna – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1390-3116>; e-mail: nataliia.golian@nure.ua

Golian Vira Volodymyrivna – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5981-4760>; e-mail: vira.golan@nure.ua

Afanasieva Iryna Vitayivna – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor at the Department of Software Engineering; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4061-0332>; e-mail: iryna.afanasieva@nure.ua

С. Ф. ЧАЛИЙ, В. О. ЛЕЩИНСЬКИЙ, І. О. ЛЕЩИНСЬКА

РЕЛЯЦІЙНО-ТЕМПОРАЛЬНА МОДЕЛЬ НАБОРУ СУТНОСТЕЙ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ДЛЯ ПРОЦЕСУ ФОРМУВАННЯ РІШЕННЯ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ ІНФОРМАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ

Предметом дослідження є процеси формування причинно-наслідкових зв'язків між станами сутностей предметної області у процесі функціонування інтелектуальної інформаційної системи. Дані каузальні зв'язки відображають залежності, які лежать в основі процесу отримання результату в інформаційній системі, і тому вони можуть бути використані для формування пояснень щодо цього процесу. Пояснення відображає знання щодо причин та наслідків як щодо отриманого результату в цілому, так і щодо окремих дій процесу прийняття рішення в інформаційній системі. Використання таких знань підвищує довіру користувача до отриманих від інформаційної системи рішень. Мета роботи полягає в розробці реляційно-темпоральної моделі представлення множини взаємопов'язаних сутностей предметної області, які є об'єктом формування рішення в інформаційній системі, з тим, щоб створити умови для виявлення каузальних залежностей щодо процесу формування рішення в такій системі. Для досягнення сформульованої мети вирішуються такі задачі: структуризація залежностей між сутностями предметної області у атрибутивному та темпоральному аспектах; визначення обмежень щодо процесу отримання рішення в інформаційній системі на основі статичних залежностей між сутностями; визначення темпоральних зв'язків в рамках одного класу сутностей як відображення каузальних залежностей між сутностями у процесі отримання рішення в інтелектуальній системі; побудова реляційно-темпоральної моделі взаємопов'язаних сутностей предметної області. Висновки. Виконано структуризацію статичних та динамічних залежностей між сутностями предметної області, що є об'єктом формування рішення в інформаційній системі. Визначено статичні обмеження щодо процесу формування рішення, які пов'язані із властивостями предметної області. Визначено темпоральні залежності між сутностями предметної області, які відображають причинно-наслідкові зв'язки між діями процесу з формування рішення. Запропоновано реляційно-темпоральну модель пов'язаних сутностей предметної області, що містить класи еквівалентності сутностей, статичні залежності між властивостями різних класів еквівалентності, а також темпоральні залежності між властивостями в рамках кожного класу. Модель дає можливість перевірити обмеження на процес формування рішення на основі статичних зв'язків між сутностями предметної області, а також визначити можливі послідовності зміни властивостей сутностей у часі, що створює умови для побудови каузальних залежностей, які лежать в основі процесу формування рішення. Отримані каузальні залежності є ключовим елементом пояснень щодо процесу функціонування інформаційної системи.

Ключові слова: пояснення; інтелектуальна інформаційна система; темпоральні залежності; каузальність, причинно-наслідкові зв'язки.

S. CHALYI, V. LESHCHYNSKYI, I. LESHCHYNSKA

RELATIONAL-TEMPORAL MODEL OF SET OF SUBSTANCES OF SUBJECT AREA FOR THE PROCESS OF SOLUTION FORMATION IN INTELLECTUAL INFORMATION SYSTEMS

The subject of research is the processes of formation of causal relationships between the states of the entities of the subject area in the process of functioning of the information system. These causal links reflect the dependencies that underlie the process of obtaining a result in the information system, and therefore they can be used to form explanations for this process. The explanation reflects the knowledge of the causes and consequences of both the result obtained as a whole and the individual actions of the decision-making process in the information system. The use of such knowledge increases the user's confidence in the decisions received from the information system. The aim of the work is to develop a relational-temporal model of representation of many interconnected entities of the subject area, which are the object of decision formation in the information system, in order to create conditions for identifying causal dependencies on the decision formation process in such a system. To achieve the formulated goal, the following tasks are solved: structuring the relationships between the entities of the subject area in the attributive and temporal aspects; determining constraints on the decision-making process in the information system based on static dependencies between entities; definition of temporal connections within one class of entities as a reflection of causal dependencies between entities in the process of obtaining a solution in the intellectual system; construction of a relational-temporal model of interconnected entities of the subject area. Conclusions. The structuring of static and dynamic dependences between the entities of the subject area, which is the object of decision formation in the information system. Static constraints on the process of decision formation, which are related to the properties of the subject area, are determined. The temporal dependences between the entities of the subject area are determined, which reflect the cause-and-effect relations between the actions of the decision-making process. A relational-temporal model of related entities of the subject area is proposed, which contains classes of entity equivalence, static dependencies between properties of different equivalence classes, as well as temporal dependencies between properties within each class. The model makes it possible to test constraints on the decision-making process based on static relationships between entities of the subject area, as well as to determine possible sequences of changing properties of entities over time, which creates conditions for building causal relationships that underlie the decision-making process. The obtained causal dependencies are a key element of explanations about the process of functioning of the information system.

Keywords: explanation; intelligent information system; temporal dependencies; causality, cause-and-effect relationships.

Вступ. Сьогодні в інтелектуальних системах використовуються складні методи обчислювального інтелекту, що призначені для вирішення практично важливих задач великої розмірності.

Такі задачі вирішуються в умовах невизначеності та неконтрольованих зовнішніх впливів. Методи обчислювального інтелекту базуються на машинному навчанні, що робить процес отримання кінцевого рішення непрозорим для користувача, тобто не дає можливості явно виділити каузальні залежності, які привели до цього рішення. Тому виділення каузальних залежностей є важливою умовою для формування

пояснень щодо роботи інтелектуальної інформаційної системи. Пояснення забезпечують довіру користувачів до отриманих результатів, що створює умови для ефективного використання останніх [1–3].

Важливий аспект побудови пояснень щодо результатів інтелектуальної системи пов'язаний із впливом на результат вхідних даних, які використовуються для навчання. Викривлення у вхідних даних приводять до неточних результатів, що обмежує застосування цих результатів користувачем. Такі викривлення є наслідком як помилок при зборі даних, так і наявності в даних залежностей, що відображають упередження

людей, які вирішують відповідні задачі. Тому виявлення каузальних зв'язків, які лежать в основі процесів прийняття рішень в інтелектуальній інформаційній системі, є актуальною проблемою [4–6].

Для вирішення цієї проблеми необхідно визначити залежності між діями інтелектуальної системи. При використанні машинного навчання для налагодження моделей такі залежності не завжди можуть бути представлені явним чином. Однак вони відображаються через зв'язки між властивостями сутностей предметної області, а також при зміні значень цих властивостей внаслідок функціонування інтелектуальної інформаційної системи. Тобто залежності між властивостями сутностей відображають процес отримання результату в інформаційній системі [7, 8].

Такі залежності мають статичну й темпоральну складові [9, 10]. Перша задає структуру предметної області. Друга відображає послідовність станів сутностей у процесі формування рішення в інтелектуальній системі [11]. Відповідно, на основі цих залежностей можуть бути отримані статичні каузальні залежності, що обмежують можливості отримання результату, а також динамічні залежності, що визначають процес функціонування інтелектуальної інформаційної системи.

Зазначене свідчить про важливість побудови моделі взаємопов'язаних сутностей предметної області як умови для виявлення каузальних залежностей, що лежать в основі процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі, а також подальшого формування пояснення з використанням отриманих причинно-наслідкових залежностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Науковий напрямок, пов'язаний із побудовою пояснень з використанням каузальних зв'язків розвивається в рамках програми Explainable Artificial Intelligence [1]. Каузальність в рамках даного напрямку розглядається на трьох рівнях [12]. На першому рівні представлені статистичні закономірності у наборах даних, що відображають існуючі процеси функціонування інтелектуальної системи. На другому рівні визначаються каузальні залежності, що забезпечують отримання нових результатів. Наприклад, залежність виду «Як зміниться прибуток компанії при збільшенні зарплатні певним виконавцям вдвоє?». На третьому рівні каузальні залежності використовуються в якості пояснення для процесу роботи інформаційної системи [13]. Тобто каузальні залежності на даному рівні визначаються як причини отримання остаточних або проміжних результатів роботи інтелектуальної системи для заданого набору вхідних даних.

Представлені на першому рівні каузальності залежності відповідають темпоральним правилам, що розглядалися в роботах [4–8]. Такі залежності задають упорядкованість для пар послідовних станів сутностей предметної області, або ж станів, між якими можуть бути реалізовані проміжні стани [10].

Прототипи каузальних залежностей другого рівня в роботах [14, 15] запропоновано відображати на основі реляційних моделей сукупності сутностей предметної області. В подальшому такі моделі можуть

бути використані для формування каузальних залежностей даного рівня з використання підходу d-separation.

Таким чином, на сьогодні окремо розглядаються темпоральні залежності між станами сутностей предметної області, що відповідають першому рівню каузальності, та реляційні залежності між такими сутностями, що є основою для побудови відношень другого рівня каузальності. Однак для побудови пояснень щодо роботи інтелектуальної інформаційної системи доцільно розглянути залежності першого та другого рівня як єдину систему, що має статичний та темпоральні аспекти.

Метою цієї статті є розробка реляційно-темпоральної моделі представлення множини взаємопов'язаних сутностей предметної області, які є об'єктом формування рішення в інформаційній системі, з тим, щоб створити умови для виявлення каузальних залежностей щодо процесу формування рішення в такій системі.

Для досягнення сформульованої мети вирішуються наступні задачі:

- структуризація залежностей між сутностями предметної області у атрибутивному та темпоральному аспектах;
- визначення обмежень щодо процесу отримання рішення в інформаційній системі на основі статичних залежностей між сутностями;
- визначення темпоральних зв'язків в рамках одного класу сутностей як відображення каузальних залежностей між сутностями у процесі отримання рішення в інтелектуальній системі;
- побудова реляційно-темпоральної моделі взаємопов'язаних сутностей предметної області.

Статичні та динамічні властивості сукупності взаємопов'язаних сутностей як об'єктів формування рішення в інформаційній системі.

Узагальнено предметна область, що містить комплексний об'єкт формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі, представляється множиною E сутностей $e_{i,j}$, таких що кожна сутність описується множиною атрибутів $B_{i,j}$:

$$E = \{e_{i,j} : (\forall i \forall j) \exists B_{i,j}\}. \quad (1)$$

Атрибути задають властивості сутностей. В рамках запропонованого підходу використовується лінійна структура атрибутів. Ієрархія властивостей предметної області задається через зв'язки між сутностями. Іншими словами, комплексна властивість однієї сутності може бути представлена через іншу сутність та її властивості. Атрибути останньої також можна деталізувати через властивості додаткових сутностей. Така організація опису предметної області дає можливість єдиним чином представити прості й комплексні властивості сутностей, а також відобразити зміну їх станів через зміну значень відповідних властивостей з часом. В результаті отримуємо мережний опис предметної області зі статичною та динамічною (темпоральною) складовими.

Статична складова даного представлення визначає структуру фрагменту предметної області, з яким оперує інтелектуальна інформаційна система. Ця структура визначає допустимі послідовності дій у процесі функціонування інформаційної системи, оскільки зв'язки між сутностями впливають на можливі дії, а також на їх послідовність. Іншими словами, статична складова задає множину можливих послідовностей дій у процесі функціонування інформаційної системи.

Якщо у інформаційній системі зафіксовано дії, які не відповідають статичному опису предметної області, то це свідчить або про нерегламентоване функціонування такої системи, або про неточний, неповний опис предметної області на поточний момент часу. Тому невідповідність статичного опису та процесів функціонування інформаційної системи є умовою для пояснення щодо помилок в роботі системи і, відповідно, некоректного результату. Таке пояснення дає можливість користувачеві не використовувати неточний отриманий результат, що в подальшому збільшує довіру користувача до результатів роботи системи. Фактично, статична складова опису взаємопов'язаних сутностей предметної області дає можливість обґрунтувати висновок (або пояснення) щодо коректності отриманих в результаті роботи інформаційної системи результатів.

В свою чергу, динамічна складова дає можливість оцінити ефективність отриманого результату. В даній ситуації є дві варіанти оцінки.

По-перше, ефективність може бути оцінена відносно результату роботи інформаційної системи. Така можливість виникає у випадку, якщо опис предметної області містить сутності, з якими взаємодіє отриманий в інформаційній системі результат. Наприклад, якщо рекомендаційна система пропонує блок безперебійного живлення для комп'ютера, то оцінка може бути виконана з урахуванням відповідності значень атрибутів цього блоку та значень відповідних атрибутів комп'ютера, для якого цей блок буде використано (потужність, час резервування, форма синусоїди, тощо).

По-друге, ефективність може бути оцінена відносно процесу формування рішення. В даному випадку також можливі два варіанти: атрибутивна оцінка ефективності й темпоральна оцінка ефективності.

Атрибутивна оцінка визначається особливостями предметної області. Наприклад, для рекомендаційної системи в якості оцінки може бути використаний відсоток конверсії. Тобто відсоток користувачів, які придбали товари або послуги із рекомендованого списку.

Темпоральна оцінка ефективності задає відхилення інтервалу часу на отримання результату від бажаного. Оцінка може бути модифікована в залежності від того, як ми враховуємо відхилення в строках завершення процесу отримання результату. Зазвичай використовується обмеження по строках і вводиться штраф за запізнення. Однак така оцінка дає можливість оцінити лише один процес, що виконується у системі. Якщо ж інформаційна система контролює

паралельне виконання декількох процесів, то може бути використана оцінка «точно в час», за якою штрафується також передчасне завершення кожного процесу. Дана оцінка дає можливість врахувати обмежені ресурси. Тобто передчасне виконання одного з процесів може привести до запізнь інших процесів внаслідок конкурування за спільні об'єкти (сутності предметної області).

Реляційно-темпоральна модель взаємопов'язаних сутностей предметної області в інформаційній системі.

Запропонований підхід до формального опису взаємопов'язаних сутностей предметної області, з якими оперує інформаційна система, базується на інтеграції атрибутивного та темпорального аспектів таких сутностей.

Атрибутивний аспект визначає множину властивостей сутностей, а темпоральний – зміну стану кожної сутності з часом. Множина атрибутів фактично визначає клас сутності. Стан сутності задається значеннями її атрибутів.

Виділення атрибутивної та темпоральної складової дає можливість розділити сутності різних класів, різні сутності одного класу, а також зміну станів сутності з часом.

Концептуальну схему опису окремих сутностей в обох аспектах наведено на рис. 1.

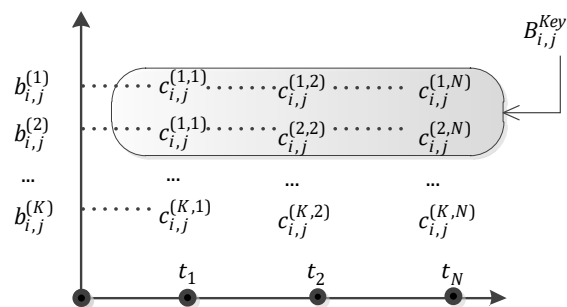


Рис. 1. Атрибутивна та темпоральна складова сутності предметної області

На даному рисунку на вертикальній осі показано множину атрибутів $B_{i,j} = \{b_{i,j}^k\}$ сутності $e_{i,j}$. На горизонтальній осі вказані дискретні моменти часу t_1, t_2, \dots, t_N , в які стан предметної області і, відповідно, стан сутності може змінюватись внаслідок реалізації процесів прийняття рішень в інтелектуальній системі, або ж внаслідок зовнішніх впливів на ці сутності.

Поточний стан сутності $e_{i,j}$ у довільний момент часу t_n задається множиною $C_{i,j}^n$ значень $c_{i,j}^{k,l}$ атрибутів цієї сутності:

$$C_{i,j}^n = \{c_{i,j}^{k,l} | t = t_n\}. \quad (2)$$

Слід зазначити, що згідно виразу (2), множина значень $C_{i,j}^n$ має темпоральну прив'язку, на відміну від окремих значень атрибутів $c_{i,j}^{k,l}$.

Відповідно, процес обробки сутності при формуванні рішення в інтелектуальній системі задається послідовністю множин значень її атрибутів:

$$\Pi_{i,j} = \langle C_{i,j}^1, \dots, C_{i,j}^n, \dots, C_{i,j}^N \rangle. \quad (3)$$

Частина атрибутів сутності може змінювати своє значення у процесі обробки в інтелектуальній системі, інша залишається незмінною. Підмножина незмінних атрибутів характеризує сутність і тому ми будемо розглядати її як підмножину ключових атрибутів $B_{i,j}^{Key}$:

$$B_{i,j}^{Key} = \{b_{i,j}^k : (\forall k)(\forall t_n)c_{i,j}^{k,n} = c_{i,j}^{k,1}\}. \quad (4)$$

Важливість виділення підмножини $B_{i,j}^{Key}$ полягає в тому, що ключові атрибути дають можливість виділити одну й ту саму сутність у різні моменти часу. Якщо для довільної пари сутностей $(e_{i,j}, e_{i,m})$ множини ключових атрибутів $B_{i,j}^{Key}$ та $B_{i,m}^{Key}$ є еквівалентними, то можна вважати, що пара $(e_{i,j}, e_{i,m})$ відображає одну й ту ж саму сутність у різні моменти часу. Тому сутності $e_{i,j}$ та $e_{i,m}$ є еквівалентними тобто $e_{i,j} \sim e_{i,m}$:

$$\exists(e_{i,j}, e_{i,m}) : (\forall j \forall m) B_{i,j}^{Key} \equiv B_{i,m}^{Key} \Rightarrow e_{i,j} \sim e_{i,m}. \quad (5)$$

Введення еквівалентності для довільної пари сутностей $e_{i,j}$ та $e_{i,m}$ дає можливість визначити клас еквівалентності сутностей $[e_i]$, який містить екземпляри $e_{i,j}$ однієї й тієї ж сутності у різні моменти часу t_n :

$$[e_i] = \{e_{i,1}, \dots, e_{i,j}, \dots\} : (\forall j) e_{i,1} \sim e_{i,j}. \quad (6)$$

Клас еквівалентності сутностей задає множину еквівалентних екземплярів однієї сутності, які були використані у процесі формування рішення в інтелектуальній системі у різні моменти часу.

З урахуванням визначення еквівалентності можна деталізувати, що даний клас задає множину станів однієї сутності у процесі прийняття рішення. Відмінності між станами сутності задаються підмножиною B_i^{State} значень її властивостей, яка містить мітку часу зміни стану сутності:

$$B_i^{State} = B_i \setminus B_i^{Key} \mid \exists c_i^{k,l} \in C_i^{State} : c_i^{k,l} = t_n. \quad (7)$$

Таким чином, клас еквівалентності сутності задає представлені на рис. 1 об'єкту та темпоральну складову, що дає можливість встановлювати обмеження на можливу взаємодію об'єктів ,а також послідовність взаємодії та оперування цими об'єктами у часі.

Наприклад, для сутності – виконавця клас еквівалентності може містити підмножину атрибутів $B_1^{Key} = \{b_1^1 = \text{ПІБ}, b_1^2 = \text{роль}\}$, та підмножину атрибутів

$$B_1^{State} = \{b_1^3 = \text{процес}, b_1^4 = \text{завдання}, b_1^5 = t_n\}.$$

Перша група атрибутів дає можливість ідентифікувати виконавця через його прізвище та роль на підприємстві. Друга група атрибутів визначає його поточну діяльність.

Аналогічно, в рекомендаційній системі для товару або послуги перша група може містити такі атрибути:

$$B_2^{Key} = \{b_2^1 = \text{Шифр}, \text{назва}, b_2^2 = \text{товарна_група}\}.$$

$$B_2^{State} = \{b_2^3 = \text{ціна}, b_2^4 = \text{популярність}, b_2^5 = \text{рейтинг}, b_2^6 = t_n\}.$$

Атрибути b_1^2 та b_2^2 задають посилання на інші сутності, що дає можливість встановити реляційні відношення між сутностями. Останні задають статичну конфігурацію предметної області і, фактично, визначають обмеження при реалізації процесу прийняття рішень в інтелектуальній системі.

Із наведених прикладів видно, що з використанням атрибутів першої групи можуть бути задані реляційні відношення $r_{m,s}^{i,k}$ між сутностями з класів еквівалентності $[e_i]$ та $[e_m]$. Тобто між даними класами існує відношення по атрибутам b_i^k та b_m^s :

$$r_{m,s}^{i,k} \equiv b_i^k r b_m^s \mid (\forall i \forall j) [e_i] \cap [e_m] = \emptyset, \quad (8)$$

$$\exists k, \exists s : b_i^k = b_m^s.$$

Сукупність відношень $R = \{r_{m,s}^{i,k}\}$ задає реляційну складову розробленої моделі, яка задає неявні обмеження на процес формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі.

З використанням атрибутів другої групи формуються темпоральні відношення $\tau_{i,k}^{l,n}$ для пар значень $c_i^{k,l}, c_i^{k,n}$ одного й того ж атрибуту b_i^k у моменти часу $t_n < t_w$:

$$\tau_{i,k}^{l,n} \equiv c_i^{k,l} \tau c_i^{k,n} \mid (\exists [e_i]) : t_n < t_w, c_i^{k,l} \neq c_i^{k,n}. \quad (9)$$

Сукупність відношень $T = \{\tau_{i,k}^{l,n}\}$ задає темпоральну складову представлення сукупності взаємопов'язаних сутностей предметної області.

Сукупність класів еквівалентності $E = \{[e_i]\}$ задає сутнісну складову темпорально-реляційної моделі:

$$M = \{E, R, T\}. \quad (10)$$

Модель (10) комбінує статичні й динамічні залежності, що дає можливість перевірити темпоральні відношення $\tau_{i,k}^{l,n}$ на відповідність обмеженням $r_{m,s}^{i,k}$. Тобто таке поєднання дає можливість виділити підмножини відношень $\tau_{i,k}^{l,n}$ для обмежень $r_{m,s}^{i,k}$ як основу для пояснення. Подальше перетворення темпоральних відношень в каузальні дає можливість безпосередньо сформулювати пояснення.

Розглянемо приклад використання моделі для пари сутностей $[e_1]$ = ноутбук_модель та $[e_2]$ = категорія_ноутбук як об'єктів, які можуть бути використані в рекомендаційній системі.

Перша сутність має властивість b_1^1 = товарна_група, яка відповідає аналогічній властивості b_2^1 класу $[e_2]$. Реляційне відношення $r_{1,1}^{1,1}$ між відповідними властивостями цих класів є аналогічним відношенню між таблицями реляційної бази даних і тому виступає обмеженням при побудові рекомендацій. Сутність даного обмеження залежить від типу відношення $r_{1,1}^{1,1}$ (один до одного, один до багатьох, багато до багатьох). Темпоральне відношення $\tau_{1,3}^{1,2}$ визначає зміни значення атрибуту b_1^3 = ціна (нижні індекси правила) від моменту часу t_1 до моменту часу t_2 (верхні індекси правила). Підмножина темпоральних правил $T_{1,3}$ $\left\{ \tau_{1,3}^{1,2}, \tau_{2,3}^{1,2}, \tau_{3,3}^{1,2}, \dots \right\}$ для даного ноутбуку (тобто правила $\tau_{1,3}^{2,3}, \tau_{3,3}^{3,4}, \dots$, що відрізняються лише моментами часу t_2, t_3, t_4 задовольняє умовам обмеження $r_{1,1}^{1,1}$, тобто має відношення лише до вартості ноутбука:

$$T_{1,3} = \left\{ \tau_{1,3}^{1,2}, \tau_{1,3}^{2,3}, \tau_{3,3}^{3,4}, \dots \mid r_{1,1}^{1,1} \right\}. \quad (11)$$

Поєднання підмножин (11) дає можливість сформулювати множини темпоральних правил, що відображають зміни цін на ноутбуки. З урахуванням інших залежностей виду $r_{1,1}^{1,1}$ ця множина є вхідним набором для побудови каузальних залежностей щодо процесу побудови рекомендованого переліку моделей ноутбуків.

Висновки. Виконано структурування у атрибутивному та темпоральному аспектах відношень між сутностями предметної області, які є об'єктом прийняття рішень в інформаційній системі. Перший аспект відображає статику, а другий – динаміку сутностей предметної області.

Показано, що в атрибутивному аспекті такі відношення задають обмеження на процес прийняття рішення в інформаційній системі. Темпоральні ж відношення визначають послідовність дій процесу прийняття рішень.

Темпоральні відношення сформовано на базі класів еквівалентності сутностей. До одного класу еквівалентності належить один і той же екземпляр сутності, значення властивостей якого змінювались з часом. Такий підхід дає можливість в рамках класу еквівалентності врахувати всі можливі варіанти зміни властивостей сутності з часом, тим самим відобразивши можливі комбінації процесу прийняття рішень в інформаційній системі.

Сукупність статичних да динамічних характеристик сутностей предметної області дає можливість встановити каузальні зв'язки між діями процесу отримання рішення. При цьому статичні залежності обмежують можливі варіанти реалізації даного процесу, а темпоральні зв'язки відображають причинно-наслідкові залежності між діями у процесі отримання рішення.

Запропоновано реляційно-темпоральну модель набору взаємопов'язаних сутностей предметної області в інтелектуальній інформаційній системі. Модель містить у собі класи еквівалентності сутностей, статичні залежності між класами й темпоральні залежності в рамках кожного класу. Модель дає можливість описати динаміку отримання результатів у процесі прийняття рішення в інформаційній системі, що створює умови для побудови каузальних залежностей щодо даного процесу. Отримані каузальні залежності можуть бути використані для побудови пояснень щодо процесу функціонування інтелектуальної системи.

Список літератури

- Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. № 40(2). P. 44-58.
- Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
- Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems / ed. David J-M., Krivine J-P., Simmons R. *Second generation expert systems*, Springer-Verlag. 1993. P. 543-585.
- Lewis D. Causation as influence. *Journal of Philosophy*. 2000. Vol. 97, № 4. P. 182-97.
- Paul L. A. *Aspect Causation*. In Collins, Hall & Paul. 2004. P. 205-24.
- Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973. № 70 (17). P. 556-567.
- Halpern J. Y. Axiomatizing causal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000. № 12. P. 317-337.
- Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005. № 56 (4). P. 889-911.
- Miller D. T., Gunasegaram S. Temporal order and the perceived mutability of events: Implications for blame assignment. *Journal of personality and social psychology*. 1990. № 59 (6). P. 1111-1118.
- Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. Kharkiv: NTU "KhPI"2020. Vol. 4, № 3. P. 113-117.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах. *Вісник Нац. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип. Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2(4). С. 51-56.
- Pearl J. *Causality: models, reasoning and inference*. Cambridge University Press, USA. 2009. №2.
- Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005. № 56 (4). P. 843-887.

14. Maier M., Marazopoulou K., Jensen D. Reasoning about Independence. *Probabilistic Models of Relational Data*. 2014.
15. Marazopoulou K., Maier M., and Jensen D. Learning the structure of causal models with relational and temporal dependence. *Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. 2015.
10. Chalyi S., Leshchynskyi V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. 2020, vol. 4, no 3, pp. 113-117.
11. Chalyi S., Leshchynskyi V., Leshchynska I. Deklaratyvno-temporalnyi pidkhdid do pobudovy poiasnen v intelektualnykh informatsiynk systemakh [Declarative-temporal approach to the construction of explanations in intelligent information systems]. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu "KhPI": zb. nauk. pr. Temat. vyp. Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ, 2020, no. 2(4), pp. 51-56.

References (transliterated)

1. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. no 40(2), pp. 44-58.
2. Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
3. Swartout W., Moore J. Explanation in Second Generation Expert Systems. David J-M., Krivine J-P., Simmons R. (ed) *Second generation expert systems*, Springer-Verlag. 1993, pp. 543-585.
4. Lewis D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. 1979. Vol. 13, no. 4, pp. 455-476.
5. Paul L. A., Hall. N. *Causation: A User's Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 259 p.
6. Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973, no 70 (17), pp. 556-567.
7. Halpern J. Y. Axiomatizing causal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000, no 12, pp. 317-337.
8. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part II: Explanations. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005, 56 (4), pp. 889-911.
9. Miller D. T., Gunasegaram S. Temporal order and the perceived mutability of events: Implications for blame assignment. *Journal of personality and social psychology*. 1990, no 59 (6), pp. 1111- 1118..
12. Pearl J. *Causality: models, reasoning and inference*. Cambridge University Press, USA. 2009, no. 2.
13. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005, no. 56 (4), pp. 843-887.
14. Maier M., Marazopoulou K., Jensen D. Reasoning about Independence. *Probabilistic Models of Relational Data*. 2014.
15. Marazopoulou K., Maier M., and Jensen D. Learning the structure of causal models with relational and temporal dependence. *Proceedings of the Thirty-First Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*. 2015.

Надійшло (received) 20.05.2022

Відомості про авторів / About the Authors

Чалий Сергій Федорович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри інформаційних управляючих систем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Лецинський Володимир Олександрович (Лецинский Владимир Александрович, Leshchynskyi Volodymyr Oleksandrovich) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua

Лецинська Ірина Олександрівна (Лецинская Ирина Александровна, Leshchynska Irina Oleksandrivna) – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри програмної інженерії, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua

Chalyi Serhii Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Information Control System, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: serhii.chalyi@nure.ua

Leshchynskyi Volodymyr Oleksandrovich – PhD, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: volodymyr.leshchynskyi@nure.ua

Leshchynska Irina Oleksandrivna – PhD, Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Software Engineering доцент кафедри програмної інженерії, Kharkiv; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: iryna.leshchynska@nure.ua

ЗМІСТ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.....	3
<i>Pavlov A. A., Holovchenko M. N., Drozd V. V.</i> Construction of a multivariate polynomial given by a redundant description in stochastic and deterministic formulations using an active experiment.....	3
<i>Раскін Л. Г., Сухомлин Л. В.</i> Оптимізація розподілу ресурсу в умовах нечітких вихідних даних	9
УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	16
<i>Куценко О. С., Безменов М. І.</i> Ідентифікація лінійних динамічних систем у середовищі поліноміальних сигналів	16
<i>Нікуліна О. М., Северин В. П., Бубнов А. І., Кондратов О. М.</i> Розробка нелінійної моделі парогенератора АЕС для інформаційної технології оптимізації управління.....	21
<i>Євсєєнко О. М.</i> Синтез системи виміру параметрів повітря у приміщеннях торговельного центру	28
УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	35
<i>Двухглазов Д. Е., Безменов М. І., Шматко О. В., Двухглавова А. С., Корховий Д. С., Черкун М. В.</i> Формалізація процесу підготовки плану навчального навантаження викладачів кафедри закладу вищої освіти.....	35
<i>Шевченко С. В.</i> Про концепцію векторної оптимізації в задачах багатокритеріального вибору	46
МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	51
<i>Галуза О. А., Костюк О. В., Нікульченко А. О., Ахієзер О. Б., Асландуков М. О.</i> Модель на основі шаблонів для короткострокового прогнозування кількості транзакцій у роздрібних магазинах одягу	51
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ	57
<i>Orekhov S. V., Malyhon H. V., Stratiienko N. K.</i> Problem of classification of semantic kernels of web resource.....	57
<i>Корп А. М., Orlovskiy D. L., Liutenko I. V.</i> A software solution to work with a database of business process models and analyze their structural measures.....	61
<i>Корп А. М., Orlovskiy D. L.</i> The approach and the software tool to calculate semantic quality measures of business process models	66
<i>Мельников О. Ю., Гіміс В. Б.</i> Дослідження впливу якості засвоєння попереднього матеріалу на успішність здобувачів освіти з окремої дисципліни	70
<i>Golian N. V., Golian V. V., Afanasieva I. V.</i> Black and white-box unit testing for web applications.....	79
<i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О., Лециньська І. О.</i> Реляційно-темпоральна модель набору сутностей предметної області для процесу формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі	84

CONTENT

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY.....	3
<i>Pavlov A. A., Holovchenko M. N., Drozd V. V.</i> Construction of a multivariate polynomial given by a redundant description in stochastic and deterministic formulations using an active experiment.....	3
<i>Raskin L. G., Suhomlin L. V., Sagaydachny D. A.</i> Optimization of resource distribution under the conditions of fuzzy initial data.....	9
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	16
<i>Kutsenko O. S., Bezmenov M. I.</i> Identification of linear dynamic systems in the environment of polynomial signals ...	16
<i>Nikulina O. M., Severyn V. P., Bubnov A. I., Kondratov O. M.</i> Development of nonlinear model of NPP steam generator for information technology of control optimization.....	21
<i>Yevseienko O. M.</i> Shopping mall air parameters measurement system synthesis.....	28
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS.....	35
<i>Dvukhglavov D. E., Bezmenov M. I., Shmatko O. V., Dvukhglavova A. S., Korkhoviyy D. S., Cherkun M. V.</i> Formalization of the process of preparation of the teachers studyload plan of the higher education institution department.....	35
<i>Shevchenko S. V.</i> On the concept of vector optimization in the tasks of multicriteria choice.....	46
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	51
<i>Haluza O. A., Kostiuk O. V., Nikulchenko A. O., Akhiezer O. B., Aslandukov M. O.</i> Template-based model for short-term forecasting of the number of transactions in retail clothing stores.....	51
INFORMATION TECHNOLOGY.....	57
<i>Orekhov S. V., Malyhon H. V., Stratiienko N. K.</i> Problem of classification of semantic kernels of web resource.....	57
<i>Kopp A. M., Orlovskiy D. L., Liutenko I. V.</i> A software solution to work with a database of business process models and analyze their structural measures.....	61
<i>Kopp A. M., Orlovskiy D. L.</i> The approach and the software tool to calculate semantic quality measures of business process models.....	66
<i>Melnykov O. Yu., Gitis V. B.</i> Study of the influence of the quality of assimilation of the previous material on the prediction of student grades in a particular discipline.....	70
<i>Golian N. V., Golian V. V., Afanasieva I. V.</i> Black and white-box unit testing for web applications.....	79
<i>Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I.</i> Relational-temporal model of set of substances of subject area for the process of solution formation in intellectual information systems.....	84

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ**

Збірник наукових праць

№ 1 (7) 2022

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: bezmenov@kpi.kharkov.ua

Підп. до друку 05.07.2022 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік.-вид. арк. 8.91.
Тираж 100 пр. Зам. № 54. Ціна договірна.

Друкарня «ФОП Пісня О. В.»

Свідоцтво про державну реєстрацію ВО2 № 248750 від 13.09.2007 р.
61002, Харків, вул. Гіршмана, 16а, кв. 21, тел. (057) 764-20-28