

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

№ 2 (6) 2021

Видання засноване у 1961 р.

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

Сборник научных работ

№ 2 (6) 2021

Издание основано в 1961 г.

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

Collection of Scientific papers

No. 2 (6) 2021

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2021

**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», 2021. — № 2 (6) 2021. — 108 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 № 11 від 26 листопада 2021 р.

**СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ****СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ****SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY**

UDC 519.24

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.02.01

A. A. PAVLOV

**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**

We substantiate the structure of the efficient numerical axis segment an active experiment on which allows finding estimates of the coefficients for nonlinear terms of univariate polynomial regression with high accuracy using normalized orthogonal Forsyth polynomials with a sufficiently small number of experiments. For the case when an active experiment can be executed on a numerical axis segment that does not satisfy these conditions, we substantiate the possibility of conducting a virtual active experiment on an efficient interval of the numerical axis. According to the results of the experiment, we find estimates for nonlinear terms of the univariate polynomial regression under research as a solution of a linear equalities system with an upper non-degenerate triangular matrix of constraints. Thus, to solve the problem of estimating the coefficients for nonlinear terms of univariate polynomial regression, it is necessary to choose an efficient interval of the numerical axis, set the minimum required number of values of the scalar variable which belong to this segment and guarantee a given value of the variance of estimates for nonlinear terms of univariate polynomial regression using normalized orthogonal polynomials of Forsythe. Next, it is necessary to find with sufficient accuracy all the coefficients of the normalized orthogonal polynomials of Forsythe for the given values of the scalar variable. The resulting set of normalized orthogonal polynomials of Forsythe allows us to estimate with a given accuracy the coefficients of nonlinear terms of univariate polynomial regression in an arbitrary limited active experiment: the range of the scalar variable values can be an arbitrary segment of the numerical axis. We propose to find an estimate of the constant and of the coefficient at the linear term of univariate polynomial regression by solving the linear univariate regression problem using ordinary least squares method in active experiment conditions. Author and his students shown in previous publications that the estimation of the coefficients for nonlinear terms of multivariate polynomial regression is reduced to the sequential construction of univariate regressions and the solution of the corresponding systems of linear equalities. Thus, the results of the paper qualitatively increase the efficiency of finding estimates of the coefficients for nonlinear terms of multivariate polynomial regression given by a redundant representation.

**Keywords:** univariate polynomial regression, multivariate polynomial regression, normalized orthogonal polynomials of Forsythe, redundant representation, linear equalities, conditional active experiment

O. A. ПАВЛОВ

**ОЦІНЮВАННЯ ІЗ ЗАДАНОЮ ТОЧНІСТЮ КОЕФІЦІЄНТІВ ПРИ НЕЛІНІЙНИХ ЧЛЕНАХ ОДНОВИМІРНОЇ ПОЛІНОМІАЛЬНОЇ РЕГРЕСІЇ ПРИ МАЛІЙ КІЛЬКОСТІ ВИПРОБУВАНЬ ДОВІЛЬНОГО ОБМЕЖЕНОГО АКТИВНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ**

Обґрунтовується структура ефективного відрізка числової осі, проведення на якому активного експерименту для знаходження оцінок коефіцієнтів при нелінійних членах одновимірної поліноміальної регресії за допомогою нормованих ортогональних поліномів Форсайта дозволяє при досить малій кількості експериментів знаходити оцінки з високою точністю. Для випадку, коли активний експеримент може бути реалізований на відрізку числової осі, що не задовольняє цим умовам, обґрунтовується можливість проведення віртуального активного експерименту на ефективному відрізку числової осі, за результатами якого в результаті розв'язання системи лінійних рівностей з верхньою трикутною невиродженою матрицею обмежень знаходяться оцінки при нелінійних членах досліджуваної одновимірної поліноміальної регресії. Таким чином, для розв'язання задачі оцінювання коефіцієнтів при нелінійних членах одновимірної поліноміальної регресії необхідно вибрати ефективний відрізок числової осі, задати мінімально необхідну кількість значень скалярної змінної, що належать цьому відрізку і гарантують задану величину дисперсії оцінок при нелінійних членах одновимірної поліноміальної регресії з використанням нормованих ортогональних поліномів Форсайта. Далі необхідно з достатньою точністю знайти всі коефіцієнти нормованих ортогональних поліномів Форсайта для заданих значень скалярної змінної. Отриманий набір нормованих ортогональних поліномів Форсайта дозволяє оцінювати із заданою точністю коефіцієнти при нелінійних членах одновимірної поліноміальної регресії при довільному обмеженому активному експерименті – область зміни значень скалярної змінної може бути довільним відрізком числової осі. Оцінку константи та коефіцієнта при лінійному члені одновимірної поліноміальної регресії пропонується знаходити внаслідок розв'язання задачі лінійної одновимірної регресії за допомогою стандартного методу найменших квадратів в умовах активного експерименту. У попередніх публікаціях автора та його учнів було показано, що оцінювання коефіцієнтів при нелінійних членах багатовимірної поліноміальної регресії зводиться до послідовної побудови одновимірних регресій та розв'язання відповідних систем лінійних рівностей. Таким чином, результати статті якісно підвищують ефективність знаходження оцінок коефіцієнтів при нелінійних членах багатовимірної поліноміальної регресії, яка задана надлишковим описом.

**Ключові слова:** одновимірна поліноміальна регресія, багатовимірна поліноміальна регресія, нормовані ортогональні поліноми Форсайта, надлишковий опис, лінійні рівності, умовний активний експеримент

© A. A. Pavlov, 2021

А. А. ПАВЛОВ

## ОЦЕНКА С ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТЬЮ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЧЛЕНАХ ОДНОМЕРНОЙ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ РЕГРЕССИИ ПРИ МАЛОМ КОЛИЧЕСТВЕ ИСПЫТАНИЙ ПРОИЗВОЛЬНОГО ОГРАНИЧЕННОГО АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Обосновывается структура эффективного отрезка числовой оси, проведение на котором активного эксперимента для нахождения оценок коэффициентов при нелинейных членах одномерной полиномиальной регрессии с помощью нормированных ортогональных полиномов Форсайта позволяет при достаточно малом количестве экспериментов находить оценки с высокой точностью. Для случая, когда активный эксперимент может быть реализован на отрезке числовой оси, не удовлетворяющем этим условиям, обосновывается возможность проведения виртуального активного эксперимента на эффективном отрезке числовой оси, по результатам которого в результате решения системы линейных равенств с верхней треугольной невырожденной матрицей ограничений находятся оценки при нелинейных членах исследуемой одномерной полиномиальной регрессии. Таким образом, для решения задачи оценивания коэффициентов при нелинейных членах одномерной полиномиальной регрессии необходимо выбрать эффективный отрезок числовой оси, задать минимально необходимое количество значений скалярной переменной, принадлежащих этому отрезку и гарантирующих заданную величину дисперсии оценок при нелинейных членах одномерной полиномиальной регрессии с использованием нормированных ортогональных полиномов Форсайта. Далее необходимо с достаточной точностью найти все коэффициенты нормированных ортогональных полиномов Форсайта для заданных значений скалярной переменной. Полученный набор нормированных ортогональных полиномов Форсайта позволяет оценивать с заданной точностью коэффициенты при нелинейных членах одномерной полиномиальной регрессии при произвольном ограниченном активном эксперименте – область изменения значений скалярной переменной может быть произвольным отрезком числовой оси. Оценку постоянной и коэффициента при линейном члене одномерной полиномиальной регрессии предлагается находить вследствие решения задачи линейной одномерной регрессии с помощью стандартного метода наименьших квадратов в условиях активного эксперимента. В предыдущих публикациях автора и его учеников было показано, что оценивание коэффициентов при нелинейных членах многомерной полиномиальной регрессии сводится к последовательному построению одномерных регрессий и решению соответствующих систем линейных равенств. Таким образом, результаты статьи качественно повышают эффективность нахождения оценок коэффициентов при нелинейных членах многомерной полиномиальной регрессии, заданной избыточным описанием.

**Ключевые слова:** одномерная полиномиальная регрессия, многомерная полиномиальная регрессия, нормированные ортогональные полиномы Форсайта, избыточное описание, линейные равенства, условный активный эксперимент

**Introduction.** Univariate and multivariate regression models are widely used [1–8] in modern information diagnostic systems in various fields of human activity, for example, in medicine. Finding, with a given accuracy, estimates of the coefficients of univariate polynomial regression (UPR) and multivariate polynomial regression (MPR) is still a serious theoretical problem today.

Works [9, 10] substantiate the possibility of reducing the sufficiently efficient estimating of the coefficients at nonlinear terms of the MPR in an active experiment to successive building of a UPR. The coefficients at nonlinear terms of the UPR are the right-hand sides of the systems of linear equalities, whose unknowns are the coefficients at the nonlinear terms of the MPR. Thus, the efficient finding of estimates at nonlinear terms of the UPR reduces the problem of estimating the coefficients of the MPR to the standard problem of finding the coefficients of linear multivariate regression in an active experiment. In this paper, we substantiate a procedure for efficient finding of the coefficients at nonlinear terms of a UPR. The procedure is based on the transformation of a real active experiment into a virtual one. The formulated problem is solved using the results of the virtual experiment together with a previously found set of normalized orthogonal polynomials of Forsythe (NOPFs) which guarantee a specified variance value of the estimated coefficients.

**General theoretical provisions.** Univariate polynomial regression is given in the form

$$Y(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \dots + \theta_r x^r + E \quad (1)$$

where  $x$  is an input scalar variable;

$E$  is a random variable with mathematical expectation  $ME = 0$  and variance  $\text{Var}(E) = \sigma^2 < \infty$ ,  $\sigma^2$  is known, or its upper bound is given.

An active experiment is designed as follows: the values of the input variable  $x_i$ ,  $i = \overline{1, n}$ , sequentially enter the object (1), we obtain the output values of

$y_i = \theta_0 + \theta_1 x_i + \dots + \theta_r x_i^r + \delta_i$  where  $\delta_i$  is the realization of the random variable  $E$ . Based on the results of an active experiment  $(x_i, y_i, i = \overline{1, n})$  we find estimates  $\hat{\theta}_j$  of unknown coefficients  $\theta_j$ ,  $j = \overline{0, r}$ . We will find the estimates  $\hat{\theta}_j$  by the least squares method using NOPFs. Let us give the following well-known facts [11].

Let us transform the model (1) into a model (2):

$$Y(x) = \sum_{j=0}^r w_j Q_j(x) + E \quad (2)$$

where  $Q_j(x)$ ,  $j = \overline{0, r}$ , is the  $j$ -th NOPF.

According to [11],

$$\lambda Q_j(x) = x Q_{j-1}(x) - \alpha Q_{j-1}(x) - \beta Q_{j-2}(x), \quad (3)$$

where  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$  are the coefficients determined as follows:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n x_i Q_{j-1}^2(x_i); \quad (4)$$

$$\beta = \sum_{i=1}^n x_i Q_{j-1}(x_i) Q_{j-2}(x_i); \quad (5)$$

$$\lambda = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i Q_{j-1}(x_i) - \alpha Q_{j-1}(x_i) - \beta Q_{j-2}(x_i))^2}. \quad (6)$$

The first two orthogonal polynomials are calculated by the formulas

$$Q_0(x) = \frac{1}{\sqrt{n}};$$

$$Q_1(x) = -\frac{\bar{x}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} + \frac{x}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (7)$$

where  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ .

In general case, the  $j$ -th orthogonal polynomial is calculated by the formula

$$Q_j(x) = q_{j0} + q_{j1}x + \dots + q_{jj}x^j, \quad j = \overline{0, r}. \quad (8)$$

The recurrent procedure (3) allows us to find all the coefficients (8) for  $j = \overline{2, r}$  using (7) by values  $x_i, i = \overline{1, n}$ . We find estimates of the coefficients  $w_j, j = \overline{0, r}$ , by the formula

$$\hat{w}_j = \sum_{i=1}^n y_i Q_j(x_i), \quad j = \overline{0, r}, \quad (9)$$

and determine the estimates  $\hat{\theta}_j, j = \overline{0, r}$ , from the estimates  $\hat{w}_j, j = \overline{0, r}$ , as follows:

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

The accuracy of the estimate  $\hat{\theta}_j, j = \overline{0, r}$ , is evaluated by the formula

$$M\hat{\theta}_j = \theta_j, \quad \text{Var}(\hat{\theta}_j) = \sigma^2 \sum_{i=r}^j q_{ij}^2. \quad (11)$$

It was shown in [12] that the most convenient interval of the numerical axis for an active experiment has the form  $[-|t|, t], t > 1$ .

For example, carrying out an active experiment in the interval  $[-50, 50], x_1 = -50, \dots, x_{10} = 50$ , with an equal step, leads to the following estimates [10]:

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{\theta}_2) &= \sigma^2 \cdot 4.26 \cdot 10^{-6}; \\ \text{Var}(\hat{\theta}_3) &= \sigma^2 \cdot 7.55 \cdot 10^{-9}; \\ \text{Var}(\hat{\theta}_4) &= \sigma^2 \cdot 1.4 \cdot 10^{-12}; \\ \text{Var}(\hat{\theta}_5) &= \sigma^2 \cdot 1.28 \cdot 10^{-15} \end{aligned} \quad (12)$$

where  $\sigma^2 = \text{Var}(E)$ .

Intervals  $[u, v], u < v < 0$  or  $0 < u < v$ , are much less efficient for an active experiment using NOPFs: variances of the estimates  $\hat{\theta}_j, j \geq 2$ , are significantly (by orders of magnitude) larger for a given  $n$  [12]. Further, we will call an interval of the form  $[-|t|, t], t > 1$ , an efficient interval.

**Formal statement of the problem and methodology for its solving.** We solve the following problem. Suppose that a set of NOPFs was built in advance with sufficient accuracy for the interval  $[-|t|, t], t > 1$ , and a given  $n$  (it is enough to set  $b = 50$  and  $n = 10$ , see (12)). Then a real active experiment on an interval  $[c, d]$  where  $c < d$  are arbitrary real numbers, is reduced to a virtual active experiment on an interval  $[-|t|, t], t > 0$ , for an artificially constructed UPR. The problem of estimating the coefficients at nonlinear terms of this UPR is solved using a pre-built set of NOPFs found for  $x_i, i = \overline{1, n}, x_1 = -|t| < x_2 < \dots < x_n = t$ . It is shown that estimates  $\hat{\theta}_j, j = \overline{2, r}$ , are a solution of a nondegenerate system of linear equalities with an upper triangular structure of the constraint matrix.

**Designing a virtual active experiment for a given limited active experiment.** Let us specify an arbitrary polynomial of degree  $r$ :

$$y(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \dots + \theta_r x^r. \quad (13)$$

Let us make the substitute of variables:

$$x = az + b \quad (14)$$

where  $a$  and  $b$  are the coefficients of linear transformation. We obtain a polynomial

$$y(z) = \theta_0 + \theta_1(az + b) + \theta_2(az + b)^2 + \dots + \theta_r(az + b)^r$$

or, in equivalent form:

$$y(z) = \gamma_0 + \gamma_1 z + \dots + \gamma_r z^r. \quad (15)$$

*Statement 1.* There is a one-to-one correspondence between the coefficients of polynomials (13) and (15).

*Proof.* We can verify directly for  $r = 2, 3$  that the systems of linear equalities linking the coefficients  $\theta_j$  and  $\gamma_j \forall j$  have the following form:

For  $r = 2$ :

$$\begin{pmatrix} 1 & b & b^2 \\ 0 & a & 2ab \\ 0 & 0 & a^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} \quad (16)$$

For  $r = 3$ :

$$\begin{pmatrix} 1 & b & b^2 & b^3 \\ 0 & a & 2ab & 3ab^2 \\ 0 & 0 & a^2 & 3a^2b \\ 0 & 0 & 0 & a^3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \end{pmatrix} \quad (17)$$

or in general form:

$$A_r \begin{pmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \dots \\ \theta_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma_0 \\ \gamma_1 \\ \dots \\ \gamma_r \end{pmatrix}, \quad (18)$$

where the matrix  $A_r$  is upper triangular:

$$A_r = \begin{pmatrix} 1 & & & & \\ & \square & & & \\ & & a^2 & & \\ & 0 & & \ddots & \\ & & & & a^r \end{pmatrix},$$

$|A_r| = \prod_{j=0}^r a^j \neq 0$  and, therefore, there is a one-to-one correspondence between the coefficients of the polynomials (13) and (15).

*Corollary.* Due to the structure of the matrix  $A_r$ , the system (18) is solved as follows:

$$\begin{aligned} \theta_r &= \frac{\gamma_r}{a^r}, \quad \theta_{r-1} = f(a, b, \theta_r, \gamma_{r-1}), \\ \theta_2 &= f(a, b, \theta_r, \dots, \theta_3, \gamma_2). \end{aligned} \quad (19)$$

Let the UPR model be given in the form

$$Y(x) = \theta_0 + \theta_1 x + \dots + \theta_r x^r + E. \quad (20)$$

An active experiment can only be carried out for values from the range  $[c, d]$ ,  $c < d$ , for which the use of NOPFs is inefficient. And for a symmetrical segment  $[z_1, z_n]$ ,  $z_1 = -z_n$ ,  $z_n > 1$ , a pre-built set of NOPFs for the given

$$r, z_1 = -z_n < z_2 < \dots < z_{n-1} < z_n, \quad (21)$$

guarantees the specified variances of the estimates of the UPR coefficients,  $j = \overline{2, r}$ . For example [10], variances of the UPR coefficients for  $j = \overline{2, 5}$  are determined by (12) for  $z_1 = -50, z_{10} = 50, n = 10$ .

Algorithm for designing a virtual active experiment:

1. Find a linear relationship  $x = az + b$  satisfying the condition  $az_1 + b = c, az_n + b = d$ . Verify directly:

$$a = \frac{d - c}{z_n - z_1} > 0, \quad b = x_1 - \frac{d - c}{z_n - z_1} \cdot z_1. \quad (22)$$

Set

$$x_1 = c, x_j = az_j + b, j = \overline{2, n} (x_n = d) \quad (23)$$

( $x_j > x_{j-1}, j = \overline{2, n}$ , since  $a > 0$ , and  $z_j > z_{j-1}$ ).

2. Carry out an active experiment on the UPR model (20) for the values of the input variable  $x_i, i = \overline{1, n}$ , given by expressions (23). The result of an active experiment is a dataset  $(x_i, y_i), i = \overline{1, n}$ . By virtue of Statement 1, simultaneously for the UPR model (3), a virtual active experiment was carried out on the following virtual UPR of the form

$$Y(z) = \gamma_0 + \gamma_1 z + \dots + \gamma_r z^r + E \quad (24)$$

(see formula (15)), its result is a dataset  $(z_i, y_i), i = \overline{1, n}$ . Using this dataset and the set of pre-built NOPFs (21) find with a given accuracy the estimates of the coefficients  $\hat{\gamma}_j, j = \overline{2, r}$ , and use them for solving system (18) finding as a result the estimates  $\hat{\theta}_j, j = \overline{2, r}$ .

Thus, the use of a virtual active experiment qualitatively simplifies estimating of the coefficients at nonlinear terms of an UPR. Finding the estimates of  $\theta_0, \theta_1$  is reduced to the problem of univariate linear regression under active experiment conditions.

*Remark.* Theoretical estimates of the accuracy of finding the values of  $\gamma_0, \gamma_1$  with the use of NOPFs are rough even for  $n \approx 100$  [10] and do not guarantee anything in fact. To estimate them, it is better to use the least squares method for  $x_i = 0 \vee 1, i = \overline{1, n}$ , at a large enough  $n$  and a low variance  $\text{Var}(E)$ .

**Conclusions.** 1. We show that the problem of estimating the coefficients at nonlinear terms of a univariate polynomial regression using an arbitrary limited active experiment with a given accuracy can be solved with the use of one set of pre-built normalized orthogonal polynomials of Forsythe. The polynomials guarantee estimating of the coefficients at nonlinear terms of univariate poly-

nomial regression with the specified accuracy in a specially designed virtual active experiment.

2. We have reduced estimation of the constant and the coefficient at the linear term of univariate polynomial regression to univariate linear regression problem solving.

3. The result we obtained qualitatively increases the efficiency of estimating the coefficients at nonlinear terms of a multivariate polynomial regression given by a redundant representation. The procedure is reduced to the sequential building of univariate polynomial regressions and solving the corresponding systems of linear equations.

## 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. *Біомедична інженерія 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 А. А., Калашник В. В., Коваленко Д. А. Построение многомерной полиномиальной регрессии. Регрессия с повторяющимися аргументами во входных данных. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка»*. Київ: ВЕК+, 2015. № 62. С. 57–61
10. Згуровский М. З., Павлов А. А. *Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами*. Київ: Наук. думка, 2010. 573 с.
11. Худсон Д. *Статистика для физиков: Лекции по теории вероятностей и элементарной статистике*. 2-е изд. Москва: Мир, 1970. 296 с.
12. Павлов А. А., Калашник В. В. Рекомендации по выбору зоны проведения активного эксперимента для одномерного полиномиального регрессионного анализа. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка»*. Київ: ВЕК+, 2014. № 60. С. 41–45.

## References (transliterated)

1. Ivahnenko A.G. Modelirovanie Slozhnyh Sistem. Informacionnyj Podhod [Complex Systems Modeling. Informational Approach]. Kiev, Vyshha shkola Publ., 1987. 62 p.
2. Nastenka E., Pavlov V., Boyko G., Nosovets O. Mnogokriteriial'nyj algoritm shagovoj regressii [Multi-criterion step-regression algorithm]. *Biomedychna inzheneriya i tekhnolohiya* [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, 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 A. A., Kalashnik V. V., Kovalenko D. A. Postroenie mnogomernoj polinomial'noj regressii. Regressiya s povtorjajushhimisja argumentami vo vhodnyh dannyh [Multidimensional polynomial regression construction. Regression with duplicate arguments in the input]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya «Informatyka, upravlinnya ta obchislyvalna tekhnika»* [Visnyk NTUU "KPI". Informatics, operation and computer science]. Kiev, Vek+ Publ., 2015, no. 62, pp. 57–61
10. Zgurovsky M. Z., Pavlov A. A. *Prinyatie resheniy v setevykh sistemakh s ogranichenymi resursami* [Decision making in network systems with limited resources]. Kiev, Nauk. dumka Publ., 2010, 573 p.
11. Hudson D. J. *Statistics Lectures, Volume 2: Maximum Likelihood and Least Squares Theory*. CERN Reports 64(18). Geneva, CERN, 1964. (Russ. ed.: Hudson D. *Statistika dlja fizikov: Lekcii po teorii verojatnostej i jelementarnoj statistike*. Moscow, Mir Publ., 1970. 296 p.). doi: 10.5170/CERN-1964-018
12. Pavlov A. A., Kalashnik V. V. Rekomendacii po vyboru zony provedenija aktivnogo jeksperimenta dlja odnomernogo polinomial'nogo regressionnogo analiza [Recommendations for choosing the zone of an active experiment for one-dimensional polynomial regression analysis]. *Visnyk NTUU "KPI". Seriya «Informatyka, upravlinnya ta obchislyvalna tekhnika»* [Visnyk NTUU "KPI". Informatics, operation and computer science]. Kiev, Vek+ Publ., 2014, no. 60, pp. 41–45

Received 15.10.2021

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

**Павлов Олександр Анатолійович** – доктор технічних наук, професор каф. 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](mailto:pavlov.fiot@gmail.com)

**Павлов Александр Анатольевич** – доктор технических наук, профессор каф. информатики и программной инженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»; г. Киев, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>; e mail: [pavlov.fiot@gmail.com](mailto:pavlov.fiot@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](mailto:pavlov.fiot@gmail.com)

*O. V. SHEPELIEV, M. O. BILOVA*

## SOFTWARE TESTING RESULTS ANALYSIS FOR THE REQUIREMENTS CONFORMITY USING NEURAL NETWORKS

The relevance of scientific work lies in the need to improve existing software designed to analyze the compliance of the results of software testing of the stated requirements. For the implementation of this goal, neural networks can be used by quality control specialists to make decisions about software quality, or project managers as an expert system, for one of the quality indicators for the customer. The article deals with software testing which is a process of validation and verification of compliance of the software application or business program with the technical requirements that guided its design and development, and work as expected, and identifies important errors or deficiencies classified by the severity of the program to be fixed. Existing systems do not provide for or have only partial integration of systems of work with the analysis of requirements, which should ensure the formation of expert assessment and provide an opportunity to justify the quality of the software product. Thus, a data processing model based on a fuzzy neural network was proposed. An approach to allow determining the compliance of the developed software with functional and non-functional requirements was proposed, taking into account how successfully or unsuccessfully implemented this or that requirement. The ultimate goal of scientific work is the development of algorithmic software analysis of compliance of software testing results to stated requirements for support in the decisions taken. The following tasks are solved in scientific work: analysis of advantages and disadvantages of using existing systems when working with requirements; definition of general structure and classification of testing and requirements; characteristic main features of the use of neural networks; designing architecture, the module of research of conformity of results of testing software to the stated requirements.

**Keywords:** quality; requirement; testing; pipe-line; machine learning; CI/CD; Google; ANFIS.

*О. В. ШЕПЕЛЁВ, М. О. БИЛОВА*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДПОВІДНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАЯВЛЕНИМ ВИМОГАМ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Актуальність наукової роботи полягає в необхідності вдосконалення існуючого програмного забезпечення, призначеного для аналізу відповідності результатів тестування програмного забезпечення заявленим вимогам. Для досягнення цієї мети можуть бути використані нейронні мережі, що буде корисно спеціалістам з контролю для прийняття рішень щодо якості програмного забезпечення або керівникам проєктів як еквівалент експертної системи, що слугуватиме одним з індикаторів якості для замовника. У статті розглядається тестування програмного забезпечення, яке представляє собою процес перевірки відповідності програмного додатка або бізнес-програми технічним вимогам, які визначали особливості його проектування і розробки, функціонування його належним чином, а також виявлення важливих помилок або недоліків, класифікованих за їх серйозністю. Існуючі програмні продукти не передбачають або мають лише часткову інтеграцію систем для роботи з аналізом вимог, що має забезпечити формування експертної оцінки та дати можливість обґрунтувати якість програмного продукту. Таким чином, запропонована модель обробки даних на основі нечіткої нейронної мережі. Запропоновано підхід, що дозволяє визначити відповідність розробленого програмного забезпечення функціональним і нефункціональним вимогам з урахуванням того, наскільки успішно реалізована та чи інша вимога. Кінцевою метою наукової роботи є розробка алгоритмічного та програмного забезпечення відповідності результатів тестування заявленим вимогам для підтримки прийняття рішень. У науковій роботі вирішуються такі завдання: аналіз переваг та недоліків використання існуючих систем при роботі з вимогами; визначення загальної структури та класифікації тестування вимог; основні особливості використання нейронних мереж; архітектура програмного забезпечення та розробка модулю дослідження відповідності результатів тестування програмного забезпечення заявленим вимогам.

**Ключові слова:** якість, вимога, тестування, пайп-лайн, машинне навчання, CI/CD, Google, ANFIS.

*А. В. ШЕПЕЛЕВ, М. А. БЕЛОВА*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СООТВЕТСТВИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ТЕСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАЯВЛЕННЫМ ТРЕБОВАНИЯМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Актуальность научной работы заключается в необходимости усовершенствования существующего программного обеспечения, предназначенного для анализа соответствия результатов тестирования программного обеспечения заявленным требованиям. Для достижения этой цели могут быть использованы нейронные сети, что будет полезно специалистам по контролю для принятия решений о качестве программного обеспечения или руководителям проектов как эквивалент экспертной системы, которая служит одним из индикаторов качества для заказчика. В статье рассматривается тестирование программного обеспечения, которое представляет собой процесс проверки соответствия программного приложения или бизнес-программы техническим требованиям, определяющим особенности его проектирования и разработки, функционирования его должным образом, а также выявление важных ошибок или недостатков, классифицированных согласно их серьезности. Существующие программные продукты не предусматривают или имеют лишь частичную интеграцию систем для работы с анализом требований, обеспечивающих формирование экспертной оценки и дать возможность обосновать качество программного продукта. Таким образом, предложена модель обработки данных на основе нечеткой нейронной сети. Предложен подход, позволяющий определить соответствие разработанного программного обеспечения функциональным и нефункциональным требованиям с учетом того, насколько успешно реализовано то или иное требование. Конечная цель научной работы - разработка алгоритмического и программного обеспечения соответствия результатов тестирования заявленным требованиям для поддержки принятия решений. В научной работе решаются следующие задачи: анализ преимуществ и недостатков использования существующих систем при работе с требованиями; определение общей структуры и классификация требований; архитектура программного обеспечения и разработка модуля исследования соответствия результатов тестирования программного обеспечения заявленным требованиям.

**Ключевые слова:** качество, требование, тестирование, пайп-лайн, машинное обучение, CI/CD, Google, ANFIS.

**Introduction.** The urgency of the work lies in the need to improve existing software designed to analyze the compliance of software testing results with the stated

requirements. To achieve this goal, neural networks can be used by quality control specialists to make decisions about software quality, or by project managers as an

© O.V. Shepeliev, M. O. Bilova 2021



expert system, as one of the quality indicators for the customer. Existing systems do not provide or have only partial integration of requirements analysis systems, which should ensure the formation of expert assessment and provide an opportunity to justify the quality of the software product.

The object of research is the process of analyzing the compliance of software testing results with the stated requirements.

The subject of research: conformity analysis of the software testing results to the declared requirements with use of neural networks

The science work solves the following tasks: analysis of the advantages and disadvantages of using existing systems for the requirements analysis; determination of the general structure and classification of testing and requirements; main features characteristics of the neural networks use; design of module architecture for the conformity of software testing results to the declared requirements.

The ultimate goal of the science work is to develop algorithmic software for the software testing results analysis to the stated requirements to support decision-making.

**General theory of testing.** Software testing is the process of validating and verifying the compliance of a software application or program with the business and technical requirements that guided its design and development, as well as working as expected, and identifies important errors or deficiencies classified according to the severity of the program [1]. Software testing is also used to identify other software quality factors, such as reliability, usability, integrity, security, capability, efficiency, portability, maintainability, compatibility, and so on. The approach to testing differs for different programs, levels of testing, and purpose of testing.

Software testing should be conducted within budget and planning limits. Due to a large number of limitations on testing, such as comprehensive (general) testing, it is impossible to find a compromise between diligence, time, and budget – it is impossible to be sure that every mistake in the program has been eliminated [2]. Adherence to established principles can make testing simpler and more effective, as well as ensure maximum achievement of testing objectives, despite certain limitations. They also ensure the repeatability of the process. Software testing is a very important quality filter and should be planned with its goals, principles, and limitations in mind.

The purpose of testing is the predicted state of affairs that a person or system plans or intends to achieve. The goal must be achievable and measurable. It is good if all the goals are interconnected. During testing, goals can be described as the planned results of the software testing process.

Thus, software testing is a vital element of systems development life cycle (SDLC) and can provide excellent results if done correctly and effectively. Unfortunately, software testing is often less formal and rigorous than it should be, and the main reason for this is that the team has tried to identify best practices, methodologies, principles, and standards for optimal software testing. For effective

and effective testing, everyone involved in testing should be familiar with the basic goals, principles, limitations, and concepts of software testing. Much work has already been done in this area and even continues today. Implementing real-world testing principles of software development to achieve testing goals to the fullest extent, given the limitations of testing, will validate research as well as pave the way for future research [3].

**Types of requirements and their formation.** Definition, analysis, verification, and management of requirements are constantly recognized as key areas of business analysis and are one of the target areas of software testing. Requirements are needs-oriented; solutions-oriented designs. The difference between requirements and design is not always clear. The same methods are used to identify, model and analyze both. The requirement leads to a design that, in turn, can help identify and analyze more requirements [4].

In software engineering, a functional requirement defines a system or its component. It describes the functions that the software should perform. A function is nothing but inputs, its behavior, and results. This can be computing, data processing, business process, user interaction, or any other specific functionality that determines what function the system can perform.

Functional software requirements help determine the predicted behavior of the system. Such behavior can be expressed as functions, services, or tasks or what system needs to be performed.

A non-functional requirement defines an attribute of software system quality. They are a set of standards used to assess the specific performance of the system. For example, how fast does a website load?

A non-functional requirement is important to ensure the convenience and efficiency of the entire software system. Failure to meet non-functional requirements may result in systems not being able to meet user needs.

Non-functional requirements allow you to impose restrictions or restrictions on the design of the system in different flexible lags. For example, a site should load in 3 seconds when the number of concurrent users is  $> 10,000$ . The description of non-functional requirements is as important as the functional requirement [5].

**Approaches to the analysis of software compliance with the stated requirements.** The purpose of verification of requirements is to ensure that the requirements and specifications of the design and models meet quality and suitability standards for the purposes they serve.

Verification of requirements ensures that requirements and designs have been correctly defined. Requirement's verification is the verification by a business analyst and key stakeholders of whether the requirements and designs are ready for verification, and provides the information needed for further work to be performed.

The most important characteristic of quality requirements and designs is suitability for use. They must meet the needs of stakeholders who will use them for a specific purpose. Ultimately, quality is determined by stakeholders [5].

Requirements (verified): a set of requirements or designs that are of sufficient quality to be used as a basis for further work.

The purpose of validation requirements is to ensure that all requirements and designs meet business requirements and support the required value provision.

Requirement validation is an ongoing process that ensures compliance with the requirements of stakeholders, decisions and the transition to the requirements of the business, and the compliance of structures with the requirements [5].

If the design cannot be verified to support the requirement, there may be a lack or misunderstanding of the requirement, or the design must change.

Approved requirements and designs are those that can be demonstrated to benefit stakeholders and agree on business goals and objectives for change. If a requirement or project cannot be verified, it either does not benefit the organization, does not fall within the scope of the decision, or both.

**Algorithmic implementation of the outcome conformance analysis algorithm.** From the characteristics of the subject area, we can conclude that the results obtained in the testing process are reduced to the conclusion: passed tests (pass) or not passed (fail) [6].

Such an assessment is relatively superficial and does not accurately define how well the developed software meets its requirements. Therefore, recognized as high-quality software can be a source of failure when changing the configuration or operating conditions.

The development of a method for determining the level of compliance software with functional and non-functional requirements would further provide a greater depth of measurements, and, accordingly, increase the efficiency of testing.

Since the input data for the software's assessment problem meets with the requirements of the test findings, mathematical approaches for solving it are not applicable.

Formalization of the input data of the above problem would simplify the solution and, as a result, improve the quality of the software. For formalization, it is expedient to use methods of fuzzy logical inference, which allow operating of numerical values of their belonging to the corresponding sets instead of non-numerical values.

We will assume that each requirement is met by a separate test. For the result of each test, we define its belonging to two fuzzy sets "execution" and "non-execution".

Depending on the objectives of the test, a test is considered to have been completed if all or more of half of its runs have been successful. The test is considered as failed if one, all, or more of half of its runs have failed.

Therefore, the fuzzy set of "execution" will consist of three subsets: "fully executed", "partially executed" and "more executed than not executed". The fuzzy set "non-execution" will consist of the following subsets "not executed completely", "partially executed" and "no more executed than executed".

Let's determine  $\mu_j^i$  and  $\mu_j^i$ .  $\mu_j^i$  is the degree of affiliation of the test to each of the subsets of the set

"execution", and  $i$  – the ordinal number of the test,  $j$  – the number of fuzzy subset (1 – "completed", 2 – "partially failed", 3 – "more than not fulfilled"),  $\mu_j^i \in [0,1]$ , these degrees are determined by experts, based on the results of evaluation of test results by software developers.  $\mu_j^i$  is the degree of belonging of the test to each of the subsets of the set "failure", and  $i$  – the ordinal number of the test,  $j$  – the number of fuzzy subset (1 – "not fully performed", 2 – "partially performed", 3 – more not performed than performed"),  $\mu_j^i \in [0,1]$ , these degrees are also determined by experts, based on the results of evaluation of test results by software developers.

To determine the general correspondence of each test to the corresponding requirement  $\mu^i$ , we use the rule of difference of fuzzy sets [6]

$$\mu^i = \mu_j^i \wedge \left(1 - \left(\mu_2^i \wedge (1 - \mu_3^i)\right)\right), \mu^i \in [0,1]. \quad (1)$$

Similarly, we find the value of the general non-compliance of each test with a specific requirement

$$\mu^i = \mu_j^i \wedge \left(1 - \left(\mu_2^i \wedge (1 - \mu_3^i)\right)\right), \mu^i \in [0,1]. \quad (2)$$

Test results are not interdependent and cannot compensate for worse values of some tests with better values of others.

The general compliance of the developed software with the requirements  $M$  can be found by the formula of the additive criterion and the difference between the sets of compliance and non-compliance, where  $N$  is the total amount of subsets

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N \mu^i}{N} \wedge \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N \mu^i}{N}\right). \quad (3)$$

The proposed method allows to determine the compliance of the developed software with functional and non-functional requirements, taking into account how successfully or unsuccessfully implemented a particular requirement, but it has a number of significant shortcomings.

First, its application can ignore important but isolated facts that do not fit into the proposed formulas.

Second, the mathematical apparatus provides only approximate calculations of compliance, as it does not take into account the nonlinear relationships between the input data of the problem of assessing the conformity of the test results of critical application software to the requirements and its initial result.

As a result, to increase the quality of analyzing the compliance of software test results with requirements, it will be more practical to design a fuzzy neural network based on the method described above [7].

**The structure of the fuzzy neural network to solve the problem of assessing the compliance of the application test results to the requirements.** An ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) [8] can assist us in determining the optimal distribution of membership functions by determining the mapping relation between input and output data via hybrid learning. This inference system is made up of five levels. The node function describes numerous nodes in each tier. Fixed nodes,

shown by circles, represent parameter sets that are fixed in the system, whereas adaptive nodes, represent parameter sets that are adjustable in these nodes. The current layer's input will be the output data from the preceding levels nodes. Created ANFIS structure is shown in fig. 1.

ANFIS consists of inputs, that equal to the number of tests, four layers, an output that carries out the defuzzification process.

Layers of ANFIS consist of

Layer for calculating the membership of input variables. On this layer, membership in one of the sets is calculated – the test is passed or not.

The second layer aggregates the prerequisite values for each rule in accordance with the selected T-norm [9].

Thus, there is compliance of the developed software with the “execution” and “non-execution” and determine how the developed software does not meet the requirements.

The diagram of activity of the developed software for research of testing conformity results of the software to the declared requirements with use of neural networks is given in fig. 2.

The starting point of the model of research of conformity of testing conformity results of the software to the declared requirements with use of neural networks is an initialization of a pipeline in GIT Actions.

Next, if the tests that were marked as required were positive, i.e. the expected result corresponds to the actual result, a webhook is passed on the software API to study

In the third layer, the values received as input are normalized; normalization is carried out using the z-

normalization method [10].

The fourth layer forms the output value.

The last layer performs defuzzification. The purpose of defuzzification is to obtain the usual (not fuzzy) value of each of the output variables using the results of the accumulation of all output linguistic variables. Defuzzification is also called clarity reduction [11].

The proposed method based on a fuzzy neural network allows to eliminate this shortcoming by replacing the non-numerical results of tests with numerical values of their belonging to the corresponding fuzzy sets of requirements. If the response from the API is negative, then the next step – the deployment of the system is not possible.

If the answer from the API came in the affirmative, then the deployment of the system on the stands is possible and is performed using the last step in the system.

**Overview of system functionality.** The software works at the level of an automated system integrated into the life cycle of the task, or branch.

For a full understanding, let's look at the stages of the life cycle of the problem.

Backlog – the task is created and moved to the backlog, from where it gets to the stage of work.

To do – the task is moved from the backlog and taken to work.

In progress – the task is under development.

Run Autotests – the task is in the state of passing automatic tests.

For review – the task is reviewed – evaluated by another developer, for better code quality.

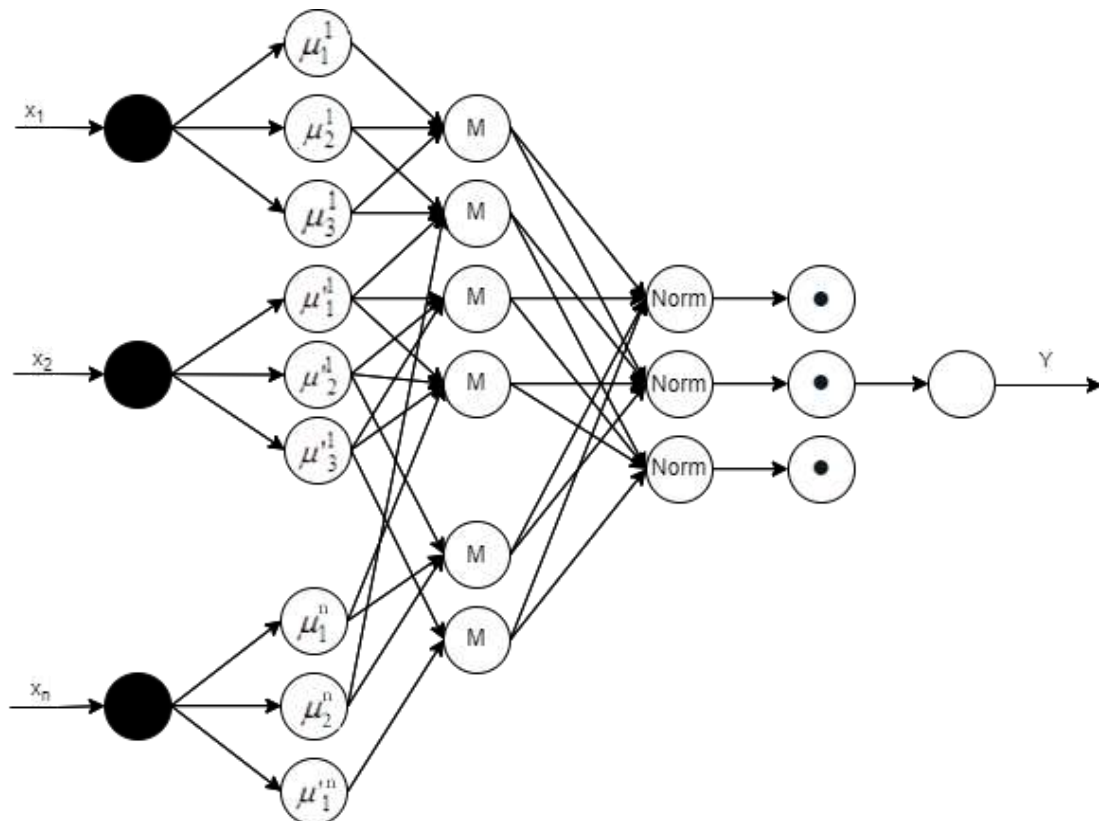


Fig. 1. The structure of a fuzzy neural network

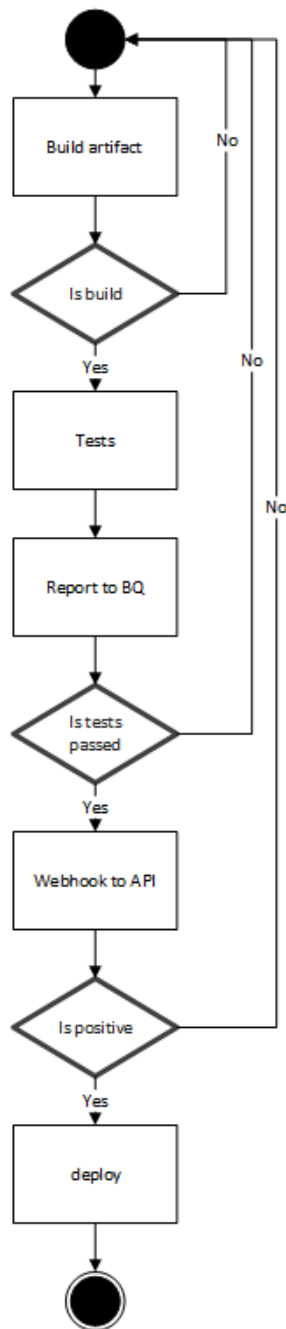


Fig. 2. Diagram of activity

For testing – the task is in a state of testing, or writing auto tests Ready for merge – a task tested, and ready for release into the product environment.

On Prod – the task is tested and is on the product environment.

Closed – the task is closed, i.e. it is executed or the decision to stop development is made.

From the reference stage it is seen that to improve the process it is necessary to implement the created software at the stages of transition from one state to another, and more precisely at the stages that are more vulnerable to system error. That is why it is advisable to implement the software in stages Run Autotests, For testing, Ready for merge, On Prod.

To better understand what is happening at these stages, we need to consider the reference process of working with a branch in the pipeline.

The CI / CD pipeline is the most important component of automated software development. Although the term has been used to describe many different aspects of computer science, git Actions and in most areas of DevOps use pipeline to illustrate the widespread use of behaviors and processes involved in continuous integration (CI).

CI is a software development strategy that increases the speed of development while ensuring the quality of the deployed code. Pipeline CI / CD is a complete set of processes that run projects start. Conveyors cover workflows, which coordinate tasks, and this is all defined in the project configuration file [12].

Examining the reference process, we can understand that automatic processes, such as unit testing, API testing, UI testing, static code analysis – requires process improvement, and therefore it is advisable to use the developed software product.

Example of the software work is given for a branch in the project. Pipeline was started by an automatic action from the bot – service on the side of the project management system.

The pipeline for a branch is based on the reference process of working with a branch in the pipeline. Pipeline is shown in fig.3.

As can be seen from the figure and based on the reference process, we see the following stages:

1. Stage of compiling and assembling docker images. There are two steps to build tests at this stage, namely the construction of the image with the solved project task.

2. Stage of passing self-tests. At this stage following is happening: static code analysis, automatic unit tests, automatic API tests, automatic UI tests, as well as the stage of analysis of passing tests and their compliance with the set of requirements.

3. Stage of data collection and import to Google BigQuery, Google Data Studio. At this stage, data is aggregated and imported into data storage and analysis systems.

Pipeline results can be found in Allure report format or in aggregate data format using Google Data Studio. Aggregate results for the period are shown in fig. 4.

Thus, an example of software operation for compliance of test results with the stated requirements was given.

**Conclusions.** To achieve the goal of the work, the following tasks were performed. Based on the analysis of the subject area, the advantages and disadvantages of using modern systems are determined and the conclusion is made about the need to develop algorithmic software to meet the results of software testing to the stated requirements. A data processing model based on a fuzzy neural network is proposed. A method has been developed that allows determining the compliance of the developed software with functional and non-functional requirements, taking into account how successfully or unsuccessfully implemented this or that requirement, but it has a number of significant shortcomings. Therefore, the information and algorithmic software of the solution was designed to

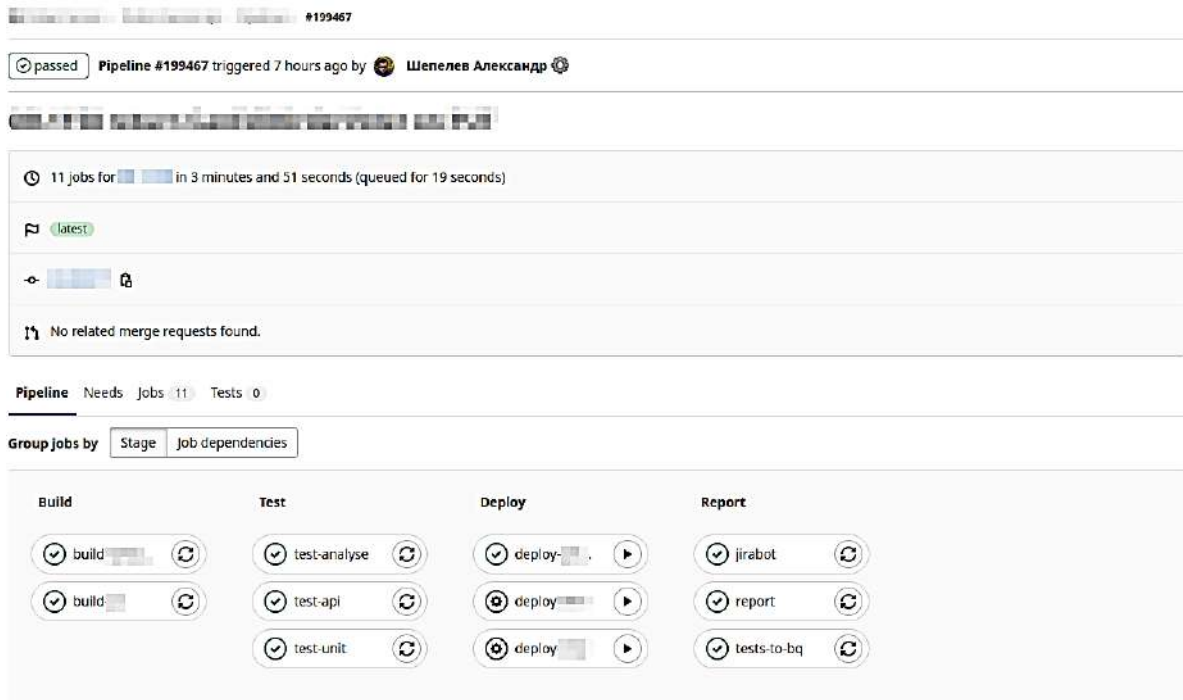


Fig. 3. Pipeline

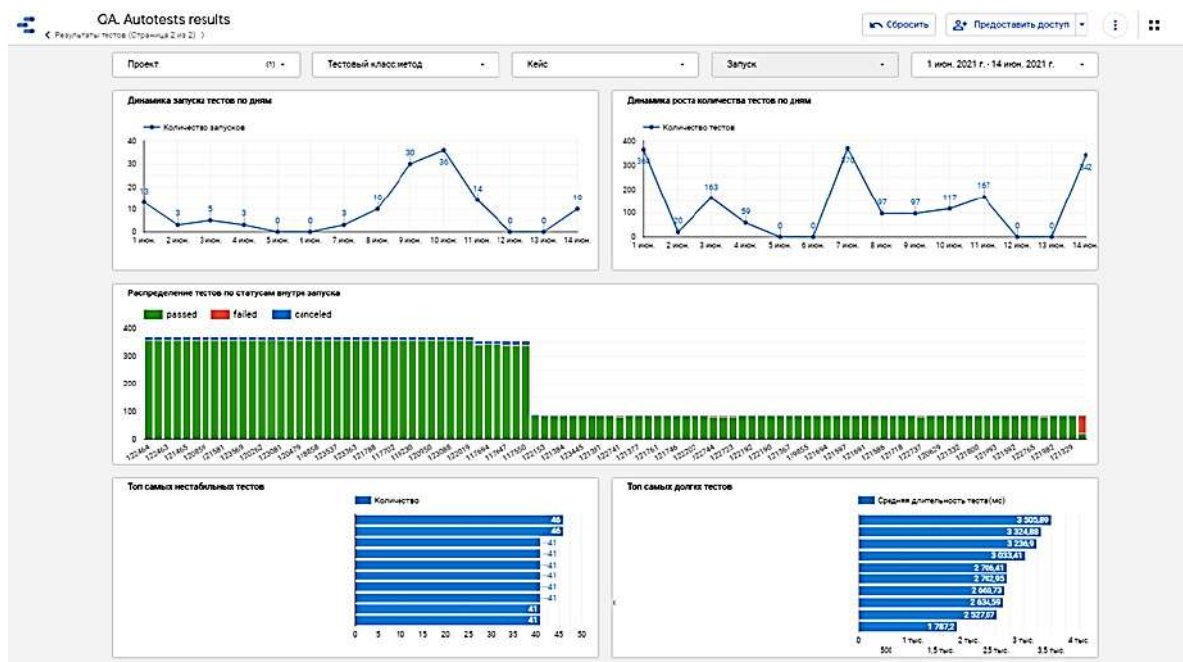


Fig. 4. Aggregate results

implement the analysis of the compliance of the software testing results with the stated requirements, which will allow forming an expert assessment of the quality of the software.

**References**

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/ugi30/141-30.pdf> (access date: 18.10.2021).
2. Farooq Sh. U., Quadri S. M. K. Effectiveness of Software Testing Techniques on a Measurement Scale. *Oriental Journal of Computer Science & Technology*. 2010. № 3(1). P. 109-113.
3. Jenkins N. *A Software Testing Primer v.2*. OPENLIBRA, 2017. 55 p.
4. Myers G. J. *The art of software testing 3rd edition*. New York: Wiley, 2011. 256 p.
5. *BABOK V3 a guide to the business analysis body of knowledge* Available at

- [https://book.akij.net/eBooks/2018/September/5b8a80dd494ce/BAB\\_OK\\_Guide\\_v3\\_Member.pdf](https://book.akij.net/eBooks/2018/September/5b8a80dd494ce/BAB_OK_Guide_v3_Member.pdf) (access date: 29.09.2021).
6. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Москва: Физматлит, 2001. 224 с.
  7. Kruse R. *Fuzzy neural network*. Available at [http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy\\_neural\\_network](http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_neural_network) (access date: 11.09.2021).
  8. Jang JSR. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst, Man, Cybernet.* 1993. № 23(3). P. 665–685.
  9. Beg, Ismat & Ashraf, Saminax. *Similarity measures for fuzzy sets*. Applied and Computational Mathematics. 8. 2009 192-202.
  10. DevGoogle. *Data Preparation and Feature Engineering for Machine Learning*. Available at <https://developers.google.com/machine-learning/data-prep/transform/normalization#z-score> (access date: 11.09.2021).
  11. Chakraverty S., Sahoo D.M., Mahato N.R. Defuzzification. In: Concepts of Soft Computing. *Springer*, 2019 Singapore. Available at [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7430-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7430-2_7) (access date: 10.10.2021).
  12. Fowler, M, Foemmel M. *Continuous integration*. (2006). Available at [https://moodle2019-20.ua.es/moodle/pluginfile.php/2228/mod\\_resource/content/2/martin-fowler-continuous-integration.pdf](https://moodle2019-20.ua.es/moodle/pluginfile.php/2228/mod_resource/content/2/martin-fowler-continuous-integration.pdf) (access date: 10.10.2021).
  3. Jenkins N. A *Software Testing Primer v.2*. OPENLIBRA, 2017. 55 p.
  4. Myers G. J. *The art of software testing 3rd edition*. New York: Wiley, 2011. 256 p.
  5. *BABOK V3 a guide to the business analysis body of knowledge Available* at [https://book.akij.net/eBooks/2018/September/5b8a80dd494ce/BAB\\_OK\\_Guide\\_v3\\_Member.pdf](https://book.akij.net/eBooks/2018/September/5b8a80dd494ce/BAB_OK_Guide_v3_Member.pdf) (access date: 29.10.2021).
  6. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Yu. Fuzzy logic and artificial neural networks. Moscow: Fizmatlit, 2001. 224 p.
  7. Kruse R. *Fuzzy neural network*. Available at [http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy\\_neural\\_network](http://www.scholarpedia.org/article/Fuzzy_neural_network) (access date: 11.09.2021).
  8. Jang JSR. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Trans Syst, Man, Cybernet.* 1993. no 23(3). pp. 665–685.
  9. Beg, Ismat & Ashraf, Saminax. *Similarity measures for fuzzy sets*. Applied and Computational Mathematics. 8. 2009 192-202.
  10. DevGoogle. *Data Preparation and Feature Engineering for Machine Learning*. Available at <https://developers.google.com/machine-learning/data-prep/transform/normalization#z-score> (access date: 11.09.2021).
  11. Chakraverty S., Sahoo D.M., Mahato N.R. Defuzzification. In: Concepts of Soft Computing. *Springer*, 2019 Singapore. Available at [https://doi.org/10.1007/978-981-13-7430-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7430-2_7) (access date: 10.10.2021).
  12. Fowler, M, Foemmel M. *Continuous integration*. (2006). Available at [https://moodle2019-20.ua.es/moodle/pluginfile.php/2228/mod\\_resource/content/2/martin-fowler-continuous-integration.pdf](https://moodle2019-20.ua.es/moodle/pluginfile.php/2228/mod_resource/content/2/martin-fowler-continuous-integration.pdf) (access date: 10.10.2021).

#### 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> (access date: 29.09.2021).
2. Farooq Sh. U., Quadri S. M. K. Effectiveness of Software Testing Techniques on a Measurement Scale. *Oriental Journal of Computer Science & Technology*. 2010. № 3(1). pp. 109-113.

Received 03.11.2021

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

**Шепелев Олександр Вадимович** – бакалавр технічних наук, студент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри Програмної Інженерії та Інформаційних Технологій Управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6258-3446>; e-mail: [zirgus1@gmail.com](mailto:zirgus1@gmail.com)

**Білова Марія Олексіївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри Програмної Інженерії та Інформаційних Технологій Управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)

**Шепелев Александр Вадимович** – бакалавр технических наук, студент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры Программной Инженерии и Информационных Технологий Управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6258-3446>; e-mail: [zirgus1@gmail.com](mailto:zirgus1@gmail.com)

**Белова Мария Алексеевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры Программной Инженерии и Информационных Технологий Управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)

**Shepeliev Oleksandr Vadymovich** – Bachelor of Technical Sciences, Student, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, student at the Department of Software Engineering And Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6258-3446>; e-mail: [zirgus1@gmail.com](mailto:zirgus1@gmail.com)

**Bilova Mariia Oleksiivna** – PhD, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering And Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)

## УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

## CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 004.852

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.02.03

*Р. А. БАБУДЖАН, К. О. ИСАЕНКОВ, Д. М. КРАСИЙ, О. О. ВОДКА, І. В. ЗАДОРЖНИЙ, М. В. ЮЩУК***ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ БІНАРНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ РОБОЧОГО СТАНУ ПІДШИПНИКІВ ЗА СИГНАЛАМИ ЇХ ВІБРОПРИСКОРЕННЯ**

В роботі досліджується зв'язок між віброприскоренням підшипників з їх робочим станом. Для визначення цих залежностей було побудовано випробувальний стенд та проведено 112 експериментів з різними підшипниками: 100 підшипників, у яких під час експлуатації розвинувся внутрішній дефект та 12 підшипників без дефекту. З отриманих записів було сформовано набір даних, який використовувався для побудови класифікатору та знаходиться у вільному доступі. Був запропонований метод для класифікації нових та використаних підшипників, що полягає у пошуку залежностей та закономірностей сигналу за допомогою описових функцій: статистичних, ентропій, фрактальних розмірностей та інших. Окрім обробки самого сигналу, також використовувалося частотне представлення сигналу роботи підшипників для доповнення простору ознак. У роботі було перевірено можливість узагальнення класифікації для її застосування на тих сигналах, які не були отримані під час лабораторних експериментів. Сторонній набір даних було знайдено у вільному доступі. Цей набір даних був використаний для того, щоб визначити, наскільки точним буде класифікатор, який навчався та тестувався на істотно різних сигналах. Навчання та валідація проводилась методом бутстрапування для викоринення ефекту випадковості з огляду на малий об'єм наявних даних для навчання. Для оцінки якості класифікаторів було використано  $F1$ -міру, як основну метрику, через незбалансованість наборів даних. В якості моделей класифікатору були обрані наступні алгоритми машинного навчання з вчителем: логістична регресія, метод опорних векторів, випадковий ліс та метод найближчих сусідів. Результати представлені в вигляді графіків густини розподілу та діаграм.

**Ключові слова:** машинне навчання, вібродіагностика дефектів підшипників кочення, обробка даних, вилучення ознак сигналів, швидке перетворення Фур'є, класифікація незбалансованих наборів даних, метод Монте-Карло, бутстрап.

*Р. А. БАБУДЖАН, К. А. ИСАЕНКОВ, Д. М. КРАСИЙ, А. А. ВОДКА, И. В. ЗАДОРЖНИЙ, М. В. ЮЩУК***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ БИНАРНОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РАБОЧЕГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ ПО СИГНАЛАМ ИХ ВИБРОУСКОРЕНИЯ**

В работе исследуется связь между виброускорением подшипников с их эксплуатационным состоянием. Для определения этих зависимостей был построен испытательный стенд и проведено 112 экспериментов с разными подшипниками: 100 подшипников, у которых во время эксплуатации развился внутренний дефект и 12 подшипников без дефекта. Из полученных записей был сформирован набор данных, который использовался для построения классификаторов и находится в свободном доступе. Был предложен метод классификации новых и использованных подшипников, заключающийся в поиске зависимостей и закономерностей сигнала с помощью описательных функций: статистических, энтропий, фрактальных размерностей и других. Кроме обработки самого сигнала также использовалось частотное представление сигнала работы подшипников для дополнения пространства признаков. В работе была рассмотрена возможность обобщения классификации для ее применения на тех сигналах, которые не были получены в ходе лабораторных экспериментов. Посторонний набор данных был найден в свободном доступе. Этот набор данных был использован для того, чтобы определить, насколько точен классификатор, который учился и тестировался на существенно разных сигналах. Обучение и валідація проводилась методом бутстрапирования для искоренения эффекта случайности, учитывая малый объем имеющихся обучающих данных. Для оценки качества классификаторов была использована  $F1$ -мера как основная метрика из-за несбалансированности наборов данных. В качестве моделей классификатора были выбраны следующие методы машинного обучения с учителем: логистическая регрессия, метод опорных векторов, случайный лес и метод ближайших соседей. Результаты представлены в виде графиков плотности распределения и диаграмм.

**Ключевые слова:** машинное обучение, вибродиагностика дефектов подшипников качения, обработка данных, извлечение признаков сигналов, быстрое преобразование Фурье, классификация несбалансированных наборов данных, метод Монте-Карло, бутстрап.

*Р. А. BABUDZHAN, К. О. ISAIENKOV, Д. М. KRASII, О. О. VODKA, І. V. ZADOROZHNIY, М. В. YUSHCHUK***THE USE OF MACHINE LEARNING METHODS FOR BINARY CLASSIFICATION OF THE WORKING CONDITION OF BEARINGS USING THE SIGNALS OF VIBRATION ACCELERATION**

The paper investigates the relationship between vibration acceleration of bearings with their operational state. To determine these dependencies, a test bench was built and 112 experiments were carried out with different bearings: 100 bearings that developed an internal defect during operation and 12 bearings without a defect. From the obtained records, a dataset was formed, which was used to build classifiers. Dataset is freely available. A method for classifying new and used bearings was proposed, which consists in searching for dependencies and regularities of the signal using descriptive

© Р. А. Бабуджан, К. О. Исаенков, Д. М. Красий, О. О. Водка, І. В. Задоржний, М. В. Ющук, 2021

functions: statistical, entropy, fractal dimensions and others. In addition to processing the signal itself, the frequency domain of the bearing operation signal was also used to complement the feature space. The paper considered the possibility of generalizing the classification for its application on those signals that were not obtained in the course of laboratory experiments. An extraneous dataset was found in the public domain. This dataset was used to determine how accurate a classifier was when it was trained and tested on significantly different signals. Training and validation were carried out using the bootstrapping method to eradicate the effect of randomness, given the small amount of training data available. To estimate the quality of the classifiers, the *F1*-measure was used as the main metric due to the imbalance of the data sets. The following supervised machine learning methods were chosen as classifier models: logistic regression, support vector machine, random forest, and *K* nearest neighbors. The results are presented in the form of plots of density distribution and diagrams.

**Keywords:** machine learning, vibration diagnostics of rolling bearing defects, data processing, signal feature mining, fast Fourier transform, classification of unbalanced datasets, Monte Carlo method, bootstrap.

**Вступ.** Обробка та аналіз сигналів широко поширений у завданнях радіоелектроніки, аналізі сейсмічної активності, розпізнаванні мови, а також вібродіагностики промислових конструкцій. З погляду різноманітності задач та застосувань обробки сигналів вібродіагностика конструкцій представляє великий інтерес. Розробка нових методів аналізу вібрацій установок активно проводиться сьогодні. Велику популярність отримали задачі аналізу підшипникових вузлів як одного з найчастіших місць поломки конструкцій, що обертаються. Близько 50 % таких конструкцій виходять з ладу саме через дефекти підшипникових вузлів [1].

Поширені зараз емпіричні підходи до вібродіагностики дають порівняно якісні результати та активно застосовуються у промисловості і сьогодні. Але розвиток обчислювальної техніки дає можливість створювати якісно нові підходи, які допоможуть покращити якість діагностики, автоматизувати та уніфікувати діагностичні процеси, зменшити витрати на діагностичне обладнання. Так, метою цієї роботи є огляд новітніх методів розробки математичних моделей діагностики, побудованих на кумулятивних характеристиках вібросигналів підшипників, та аналіз можливості уніфікації цих характеристик для різних конструкцій.

Мета цього дослідження – розробити підхід до аналізу сигналів вібрації установок, який б надав змогу класифікувати стан підшипників незважаючи на геометричні параметри установки та умови експлуатації.

**Огляд проблеми.** Задача діагностики підшипникових вузлів має широкий спектр підходів, що застосовуються у галузі протягом останніх років. Класичні підходи являють собою аналіз спектрів частот сигналів за допомогою емпіричних індикаторів, таких як аналіз зміни амплітуд частот, визваних різними конструкційними елементами підшипникових вузлів. Так, у статтях [2, 3, 4] розглядається класичний підхід до оцінки якості підшипника на підставі огляду спектру сигналу підшипнику. Такий підхід є виправданим та широко використовуваним у галузі, але потребує використання інформації щодо геометричних та експлуатаційних параметрів вузлів та установки, що унеможливило уніфікацію методу.

Дещо інший підхід пропонується у статті [5]. Автор пропонує використовувати статистичний аналіз метрики PSNR (пікового відношення сигналу до шуму) над коефіцієнтами розкладання сигналу в вейвлет-скейлограму. Цей підхід є більш уніфікованим, але для перевірки за статистичним критерієм необхідно мати сигнали підшипника, який перевіря-

ється під час діагностики. Для вирішення цієї проблеми можна використати методологію спектрального аналізу оминаючої за [6]. Цей потужний підхід дає спеціалістам з діагностики можливість використовувати перелік емпіричних індикаторів для детекції несправностей підшипникових вузлів, однак передбачає ручний вибір ширини фільтру та аналіз спектрів сигналу, що робить цей підхід затратним до людських ресурсів. Інший підхід до аналізу оминаючої пропонується у роботі [7]. Автори статті використовують синтезований набір даних сигналів прискорень підшипників для розрахунку ізоліній та побудови діагностичних карт.

У наш час проводяться дослідження з діагностики стану підшипників, використовуючи новітні методи побудови математичних моделей. Так, у статті [8] розглядаються дискримінантні класифікатори та машина опорних векторів для діагностики дефектів в підшипниках. Ці моделі мають високу точність розпізнавання, але у роботі не представлено застосування даних моделей для класифікації сигналів з інших установок обертання. Автори статті [9] використовують штучну нейронну мережу з архітектурою довгої короткочасної пам'яті для багатокласової класифікації аудіосигналів. За результатами статті можна побачити, що якість класифікації значним чином погіршується при використанні іншого експериментального обладнання. Таким чином питання уніфікації підходів для класифікації сигналів на наш час все ще є відкритим.

**Збір даних.** У вільному доступі було знайдено декілька наборів даних роботи підшипників, які можна було б використати для досліджень, але було вирішено сконструювати власний стенд для випробування. Власний експеримент проводився для збільшення кількості даних, та для виходу за обмеження, продиктованими параметрами експериментів, що були обрані іншими дослідниками. На рис. 1 зображений зовнішній вигляд пристрою. Характеристики пристрою та використаних підшипників знаходяться в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики установки

Параметр	Значення	
Частота запису	3 кГц	
Швидкість ротору	0–1500–200 об/хв	
Вага валу	35 Н	
Тип підшипнику	6204	6202
Внутрішній діаметр	20 мм	15 мм
Зовнішній діаметр	47 мм	35 мм
Довжина	14 мм	11 мм





Рис. 1. Вигляд експериментальної установки

Для тестування різних методик використовується набір даних за вільним доступом [10]. Конструкція установки для проведення експериментів є однаковою для всіх наборів даних. На одному боці стенду встановлений підшипник без дефекту, він є незмінним для усіх експериментів. На іншому боці встановлений підшипник з дефектом, сигнал якого повинен бути проаналізований.

Обробка даних. Використовуючи стенд з попереднього пункту, було створено набір даних з 10265700 записів, в середньому по 91600 записів на кожен експеримент. Отримані дані знаходяться у вільному доступі: їх було завантажено на платформу Kaggle [11]. Набір даних складається з 6 колонок, які відповідають прискоренню кожного з двох підшипників уздовж кожної з трьох вісей, а також супутньої інформації про швидкість обертання ротору, час виміру від початку експерименту, та потужність двигуна. Для навчання класифікаторів використовуються миттєві прискорення підшипників у трьох осях: X, Y, Z.

На рис. 2 приведені миттєві прискорення деяких підшипників уздовж осі Y.

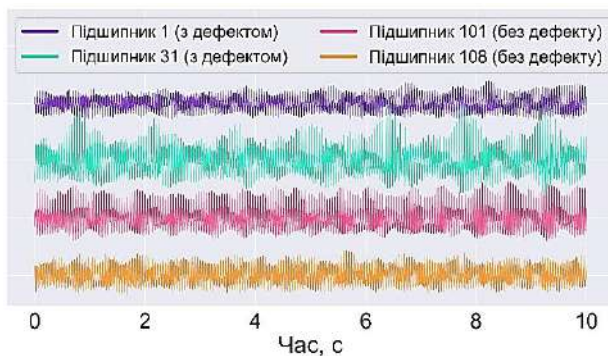


Рис. 2. Сигнали підшипників

Оскільки порівняння значень прискорення в конкретний момент часу між двома різними сигналами не є інформативним через велику кількість шумів та фазовий зсув, необхідно створити простір кумулятивних ознак, які б характеризували сигнал. Таким чином, для створення простору ознак використовується наступний підхід:

Початковий сигнал представляється чотирма способами:

- Чистий сигнал;
- Масштабування Z-значенням;

- Масштабування сигналу від  $-1$  до  $1$ ;
- Робастне масштабування [12];

Отриманий з попереднього пункту сигнал представляється методами описової статистики, різними визначеннями ентропії, фрактальних розмірностей та іншими, що будуть названі далі.

Сигнал представляється в частотному просторі за допомогою перетворення Фур'є (рис. 3), після чого використовуються методи з попереднього пункту.

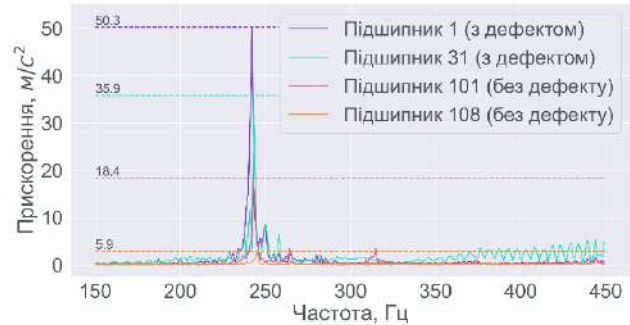


Рис. 3. Спектри сигналів

Набір використаних методів опису сигналу виглядає наступним чином:

- Коефіцієнт варіації;
- Розмах;
- Інтерквартильний розмах (IQR);
- Асиметрія;
- Екссес;
- Ентропія:
  - Ентропія за Шенном;
  - Приблизна ентропія;
  - Зразкова ентропія;
  - Ентропія перестановки;
  - Ентропія сингулярного розкладу матриці.
- Енергія;
- Параметри Хьорта:
  - Активність;
  - Мобільність.
- Показник Херста;
- Фрактальні розміри:
  - За Петросяном;
  - За Хігучі;
  - За Кацом.
- Кількість переходів через нуль;
- Пік-фактор.

Детальний розгляд даних ознак був приведений у статті [13].

**Моделі машинного навчання.** У даній роботі розглядаються 4 алгоритми машинного навчання:

- Логістична регресія
- Машина опорних векторів
- Випадковий ліс
- K-найближчих сусідів

Логістична регресія аналогічна множинній лінійній регресії за одним винятком – результат є бінарним. Перший крок полягає в тому, щоб представити змінну

результату не як бінарну мітку, а як ймовірність  $p$ , що мітка дорівнює "1". Для цього використовується функція логістичного відгуку:

$$p = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots)}} \quad (1)$$

Для того, щоб отримати експоненційний вираз із знаменника, замість ймовірностей ми розглядаємо шанси. Шанси – це ймовірність події, поділена на ймовірність, що подія не станеться.

$$\text{Odds}(Y = 1) = \frac{p}{1 - p} \quad (2)$$

Підставивши  $p$  у функцію шансів і взявши логарифм від отриманого виразу, ми отримаємо так звану логіт-функцію  $\text{logit}(p)$ . Невідомі вагові коефіцієнти  $b_i$  обчислюються методом максимальної правдоподібності.

Метод опорних векторів (support vector machine або SVM) – одна з найпопулярніших методологій навчання за прецедентами. У процесі навчання SVM обчислює важливість кожної точки навчальних даних з погляду визначення вирішальної межі між двома класами. Зазвичай лише частина точок навчального набору важлива для визначення межі прийняття рішення: точки, які лежать на межі між класами. Вони називаються опорними векторами (support vectors) і дали назву машині опорних векторів.

Щоб отримати прогноз для нової точки, вимірюється відстань до кожного опорного вектору. Класифікаційне рішення приймається виходячи з відстаней до опорних векторів, а також важливості опорних векторів, отриманих у процесі навчання. Вимірювання відстані між точками зазвичай виконується за допомогою гаусовського ядра, але ним не обмежено.

Випадковий ліс (англ. Random Forest) – це метод ансамблювання (агрегації) простих моделей дерева прийняття рішень [14]. Випадковий ліс навчає сукупність дерев рішень на різних підвбірках набору даних і використовує усереднення для підвищення точності прогнозування та контролю перенавчання. Дерево рішень [14] – це рекурсивний алгоритм, який прогнозує значення цільової змінної, вивчаючи прості правила прийняття рішень, виведені з ознак даних. На кожній ітерації дерево розбиває набір даних так, щоб максимізувати функцію інформативності розбиття за якимось критерієм, і створює вузол дерева з оптимальним правилом розбиття. У нашому випадку ми використовуємо критерій Джині. Оскільки дерево є жадібним алгоритмом – воно оптимізує критерій інформативності локально у кожному вузлі, набагато краще використовувати ансамбль з дерев для збільшення точності. У методі випадкового лісу використовується беггінг та метод випадкових підпросторів (RSM). Використовуючи перший метод, ми будемо навчати кожне дерево на підвбірці, взятій з поверненням із початкової вибірки, а використовуючи RSM ми будемо навчати кожне дерево лише на

частині ознак з набору даних. Остаточне рішення відбувається голосуванням по всіх деревах.

$K$ -найближчих сусідів (англ.  $K$ -nearest neighbors, або KNN) – метричний метод, сутність якого є у знаходженні "сусідів" елемента, найближчих до нього за певною метрикою [14]. Значення цільової величини, яке найчастіше зустрічається серед сусідніх елементів, стає значенням цього елемента. У даній роботі використовувалась метрика Міньковського – узагальнення евклідівської відстані з довільним значенням показнику.

Для кожної моделі у цій роботі була зроблена оптимізація гіперпараметрів методом повного перебору всіх комбінацій. Оптимізація гіперпараметрів виконувалась як максимізація якості розпізнавання на валідаційних вибірках.

**Оцінки якості.** Якість алгоритмів оцінювалась за допомогою  $F1$ -міри [15]. Ця метрика використовується для оцінки якості алгоритму класифікації, який побудований на наборі даних зі значним дисбалансом класів. Вимірюється від 0 до 1, де 1 – найкращий результат.  $F1$ -міра розраховується за формулою 3:

$$F1 = \frac{2 \times \text{влучність} \times \text{повнота}}{\text{влучність} + \text{повнота}} \quad (3)$$

Так, обрана метрика є гармонійним середнім між двома іншими метриками – влучністю – впевненістю у тому, що модель не робить багато хибно-позитивних помилок, та повнотою – впевненістю у тому, що модель не робить багато хибно-негативних помилок.  $F1$ -міра буде дорівнювати 0 якщо хоча б одна з цих складових дорівнюватиме 0, та 1 якщо обидві складові дорівнюють 1. Влучність та повноту можна розрахувати за формулами 4, 5:

$$\text{влучність} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

$$\text{повнота} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

де  $TP$  – правильно розпізнані позитивні результати (підшипники без дефекту);

$FP$  – кількість хибно-позитивних помилок;

$FN$  – кількість хибно-негативних помилок.

У роботі також розраховувались супутні метрики для більш тонкого контролю математичних моделей – точність, або відсоток правильних відповідей; складові  $F1$ -міри; TNR – метрика, які вказує, наскільки якісно ми розпізнаємо негативні приклади.

Оскільки ми маємо занадто малу кількість прикладів для навчання та тестування моделі, конкретні показники якості будуть залежати від того, як ми розіб'ємо вибірку на навчальну та тестову підвбірку. Тому ми використовували валідацію методом бутстрапу [16]. Цей метод полягає в багатократному стохастичному відборі з поверненням елементів для навчання з початкової вибірки. Так, для 100 ітерацій відбору ми будемо мати 100 різних пар підвбірок, де навчальна вибірка буде містити 63 %

елементів з початкової вибірки, а тестова – відповідно, 37 %. Цей метод розрахунку називається "Out-of-bag error" [17]. Цей метод також застосовується у методі машинного навчання "випадковий ліс". Необхідно зазначити, що ми окремо розбиваємо позитивні і негативні приклади, щоб зберегти розподіл класів та не отримати елементи лише одного класу у навчальній або тестовій підвибірках.

Якщо для кожної ітерації бутстрапованого відбору ми можемо навчити математичну модель на 63 % даних та обчислити метрики на відкладених 37 %, ми отримаємо розподіл значень метрики. Так, маючи середнє значення з розподілу, ми можемо зробити стійкий кількісний висновок про якість моделі.

Для того, щоб зробити якісний висновок про роботу моделі – чи є її прогноз кращим за випадкове вгадування, ми провели експеримент Монте-Карло [18]. Так, ми  $M$  разів створили випадкові прогнози для кожної з наших 100 пар підвибірок. Потім ми обчислили  $F1$ -міри для кожного прогнозу та знайшли середні значення метрики за усіма підвибірками. Так, ми маємо вибірку об'ємом  $M$  середніх значень  $F1$ -міри. За центральною граничною теоремою, розподіл середніх можна описати нормальним законом. Порівнюючи значення метрики для певної моделі з 99 % довірчим інтервалом із розподілу середніх і побачивши, що наше значення метрики більше ніж права границя, ми можемо зробити статистично значимий висновок, що наша модель навчається на даних, а не лише запам'ятовує навчальну вибірку.

Так, для нашого набору даних ми маємо 12 позитивних прикладів та 100 негативних. Тестова вибірка містить 37 % прикладів, тобто у кожній підвибірці ми маємо 41 приклад. На рис. 4, *a* представлений розподіл середніх та 99 % довірчі інтервали для нашого набору даних.

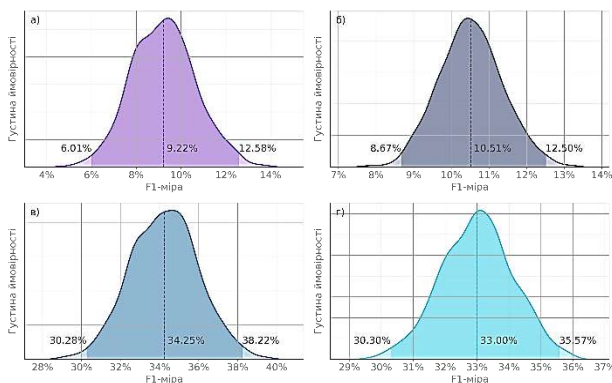


Рис. 4. Середнє значення  $F1$ -міри при випадковому вгадуванні стану підшипника: *a* – наш набір даних, 37 % набору; *б* – наш набір даних, 100 % набору; наш набір даних, *в* – сторонній набір даних, 37 % від набору; *г* – сторонній набір даних, 37 % від набору

Якщо брати весь наш набір даних за тестову підвибірку, то будемо мати рис. 4, *б*. Сторонні набори даних містять 33 % позитивних результатів, або 15 прикладів. Розподіл середніх для цього набору даних при тестовій підвибірці з 37 % початкової вибірки

проілюстрований на рис. 4, *в*. Для усіх 100 % (45 прикладів) – на рис. 4, *г*. Якщо ми розглядаємо навчання і тестування на одному й тому ж наборі даних, нас цікавить порівняння метрики з рис. 4, *a* та рис. 4, *в*. Якщо ж ми розглядаємо узагальнення математичних моделей на інші набори даних, нас цікавлять довірчі інтервали на рис. 4, *б* та рис. 4, *г*. У даній роботі значення  $M$  дорівнює 1000.

**Результати.** Першим етапом цієї роботи є створення математичних моделей для розпізнавання підшипників з дефектом у рамках одного експерименту. На рис. 5 зображені розподіли  $F1$ -міри для 100 бутстрапованих підвибірок з нашого набору даних. На рис. 6 зображені середні значення усіх метрик, які були обчислені у даній роботі. На рис. 7 надані середні значення метрик для іншого набору даних.

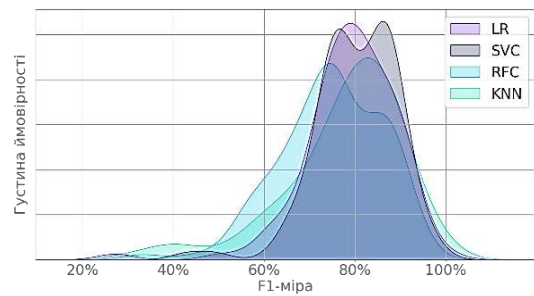


Рис. 5. Розподіл  $F1$ -міри при навчанні та тестуванні моделей на нашому наборі. Якість на валідаційній вибірці.

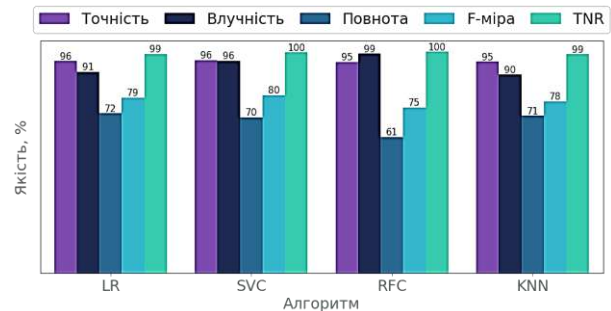


Рис. 6. Середні значення метрик при навчанні та тестуванні моделей на нашому наборі. Якість на валідаційній вибірці.

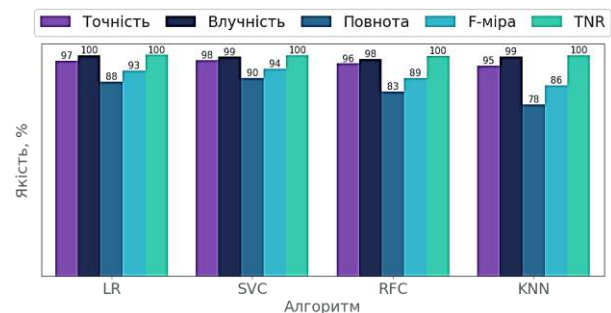


Рис. 7. Середні значення метрик при навчанні та тестуванні моделей на іншому наборі. Якість на відкладених вибірках.

Як можна бачити з наведених рисунків, метод опорних векторів має найкращий результат. Порівнюючи середні значення з рис. 4, *a*, *в*, ми можемо бути впевнені, що всі моделі придатні для детекції підшипників з дефектом у рамках одного експерименту.

Логістична регресія на рисунках позначається як LR, метод опорних векторів – SVC, випадковий ліс – RF, К найближчих сусідів – KNN. Усі метрики розраховувались для валідаційних вибірок, тобто на вибірках даних, які не приймали участі у навчанні моделей, а використовувались при оптимізації гіперпараметрів.

Другий етап – застосування моделей для класифікації сигналів, отриманих з інших експериментів. Тут перевірялося, чи можуть дані математичні моделі правильно класифікувати підшипники інших розмірів, які були встановлені на інших машинах обертання. На цьому етапі було розглянуто два випадки – навчання на нашому наборі даних і тестування на іншому наборі, та навчання на іншому і тестування на нашому. У першому випадку серед усіх варіантів масштабування сигналу та відбору статистик не було знайдено моделі, яка б перевершила 99 % довірчий інтервал випадкового вгадування з рис. 4, з. Але у другому випадку – навчанні на інших даних – ми отримали результат 18 % при використанні алгоритму "випадкового лісу", що на 5.5 % випереджає відповідний 99 % довірчий інтервал з рис. 6. На рис. 8 можна побачити розподіл  $F_1$ -міри, а на рис. 9 – середні значення усіх метрик.

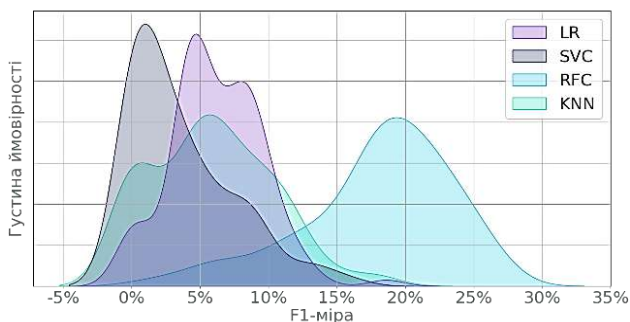


Рис. 8. Розподіл  $F_1$ -міри при навчанні моделей на іншому наборі та тестуванні на нашому.

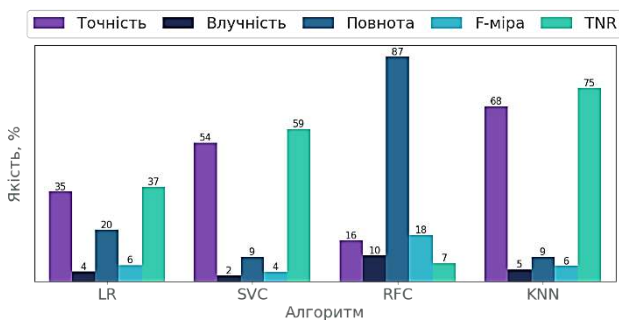


Рис. 9. Середні значення метрик при навчанні моделей на іншому наборі та тестуванні на нашому.

**Висновки.** У даній роботі розглядався підхід до аналізу дефектів підшипників кочення на основі застосування алгоритмів машинного навчання до оброблених сигналів миттєвого прискорення підшипників. Для отримання набору даних був створений експериментальний стенд, на якому було розглянуто 112 підшипників двох типорозмірів. У роботі також використовувався сторонній набір даних за відкритим доступом. У роботі запропоновані методи розширення

набору даних шляхом побачевого розділення початкових сигналів.

Для застосування алгоритмів машинного навчання був запропонований підхід для створення простору ознак сигналів за допомогою використання різних статистик сигналу. Простір ознак також містить статистику частотного представлення вхідного сигналу.

Для стійкої кількісної оцінки якості алгоритмів був використаний бутстрапований відбір прикладів для навчання моделей. Цей метод дав змогу побудувати розподіл цільової метрики для оцінки якості моделі. Для якісної оцінки методів використовувалося порівняння середнього значення цільової метрики з довірчими інтервалами з розподілу, отриманому за допомогою методу Монте-Карло для середніх значень при випадковому вгадуванні. Цей підхід дав змогу оцінити можливість застосування методів машинного навчання у поєднанні з використанням статистик сигналу як простору ознак для бінарної класифікації підшипників на підшипники з дефектом та без.

#### Список літератури

1. Nguyen P., Kang M., Kim J., Ahn B., Ha J., Choi B. Robust condition monitoring of rolling element bearings using de-noising and envelope analysis with signal decomposition techniques. *Expert systems with applications*. 2015. Vol. 42, no. 22. P. 9024–9032. doi: 10.1016/j.eswa.2015.07.064.
2. Graney B., Starry K. Rolling element bearing analysis. *Engineering. Materials evaluation*. 2012. Т. 70. С. 78–85.
3. Науменко А. П., Кудрявцева И. С. *Диагностирование дефектов и неисправностей машин и механизмов: указания к лабораторным работам*. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2017. 60 с.
4. Таджикибаев А. И., Драганчев Х., Яровой В. С., Гаюров Л., Коркин Л. М. Прогнозирование технического состояния подшипников качения на основе вибрационного анализа. *Материаловедение. Энергетика*. 2021. Т. 27, № 3. С. 77–85. doi: 10.18721/JEST.27307.
5. Акутин М. В. Метод контроля состояния подшипников качения на основе сравнения вейвлет скейлограмм. *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2009. № 1–2. С. 145–149.
6. Кан Ш. Ч., Микулович А. В., Микулович В. И. Спектральный анализ огибающей высокочастотных составляющих сложных сигналов на основе эмпирической декомпозиции мод и преобразования Гильберта. *Информатика*. 2010. Т. 4, № 28. С. 16–26.
7. Soto-Ocampo R., Cano-Moreno J., Mera J., Maroto J. Bearing severity fault evaluation using contour maps-case study. *Applied sciences*. 2021. Vol. 11, no. 14. P. 2–30. doi: 10.3390/app11146452.
8. Cococcioni M., Forte P., Sacchi C., Manconi S. A machine learning approach to fault diagnosis of rolling bearings. *2008 IEEE international conference on computational cybernetics (ICCC), Stara Lesna, Slovakia, 27–29 November 2008*. 2008. P. 209–214. doi: 10.1109/icccyb.2008.4721407.
9. Nishizaki H., Makino K. Signal classification using deep learning. *2019 IEEE international conference on sensors and nanotechnology (SENSORS & NANO), Penang, Malaysia, 24–25 July 2019*. 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/sensorsnano44414.2019.8940077.
10. Soto-Ocampo C., Cano-Moreno J., Mera J., Maroto J. *Bearing Database*. URL: <https://zenodo.org/record/3898942#.YbZtrr1ByUm> (дата звернення: 01.12.2021).
11. Isaienkov K. *Bearing classification*. URL: <https://www.kaggle.com/isaienkov/bearing-classification> (дата звернення: 22.09.2021).
12. Pedregosa F., Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011. Vol. 12. P. 2825–2830.
13. Babudzhani R., Isaienkov K., Krasii D., Melkonian R., Vodka O., Zadorozhnyi I., Yushchuk M. Collection and processing of bearing vibration data for their technical condition classification by machine learning methods. *Modeling Control and Information Technologies*. 2021. Vol. 5. P. 10–15. doi: 10.31713/mcit.2021.02.

14. Müller A., Guido S. *Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists*. O'Reilly Media, 2016. 400 p.
15. Sulaiman M., Hossin M. A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*. 2015. Vol. 5. P. 1–11. doi: 10.5121/ijdkp.2015.5201.
16. Janitza S., Hornung R. On the overestimation of random forest's out-of-bag error. *PLoS ONE*. 2018, Vol. 13. P. 2–19. doi: 10.1371/journal.pone.0201904.
17. Bruce P., Bruce A. *Practical Statistics for Data Scientists: 50 Essential Concepts*. O'Reilly Media, 2017. 318 p.
18. Fishman G. *Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications*. Springer, 1996. 689 p.

#### References (transliterated)

1. Nguyen P., Kang M., Kim J., Ahn B., Ha J., Choi B. Robust condition monitoring of rolling element bearings using de-noising and envelope analysis with signal decomposition techniques. *Expert systems with applications*. 2015, vol. 42, no. 22, pp. 9024–9032. doi: 10.1016/j.eswa.2015.07.064.
2. Graney B., Starry K. Rolling element bearing analysis. *Engineering. Materials evaluation*. 2012, vol. 70, pp. 78–85.
3. Naumenko A. P., Kudryavtseva Y. S. Dyagnostyrovanye defektov y neyspravnostey mashyn y mekhanyzmov: ukazaniya k laboratornim rabotam. [Diagnosis of defects and malfunctions of machines and mechanisms: instructions for laboratory work]. Omsk: OmHTU Publ., 2017. 60 p.
4. Tadzhibaev A. I., Draganchev H., Yarovoy V. S., Gayurov L., Korin L. M., Forecasting of the technical condition of rolling bearings based on vibration analysis. *Materials Science. Power Engineering*. 2021, pp. 77–85. doi: 10.18721/JEST.27307.
5. Akutin M. V. Method of monitoring the state of rolling bearings based on the comparison of wavelet scalegrams. *Izvestiya vuzov. Energy problems*. 2009, no. 1–2, pp. 145–149. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-kontrolya-sostoyaniya-podshpnikov-kacheniya-na-osnove-sravneniya-veyvlet-skeylogramm> (date accessed 07.12.2021).
6. Kan Sh. Ch., Mykulovych A. V., Mykulovych V. Y. Spektral'nyy analiz ohybayushchey visokochastotnykh sostavlyayushchykh slozhnykh sygnalov na osnove empyrycheskoy dekompozitsyy mod y preobrazovaniya Hyl'berta. [Spectral analysis of the envelope of high-frequency components of complex signals based on empirical mode decomposition and Hilbert transform]. *Informatyka*. 2010, vol. 4, no. 28, pp. 16–26.
7. Soto-Ocampo R., Cano-Moreno J., Mera J., Maroto J. Bearing severity fault evaluation using contour maps-case study. *Applied sciences*. 2021, vol. 11, no. 14, pp. 2–30. doi: 10.3390/app11146452.
8. Cococcioni M., Forte P., Sacchi C., Manconi S. A machine learning approach to fault diagnosis of rolling bearings. *2008 IEEE international conference on computational cybernetics (ICCC), Stara Lesna, Slovakia, 27–29 November 2008*. 2008, pp. 209–214. doi: 10.1109/icccyb.2008.4721407.
9. Nishizaki H., Makino K. Signal classification using deep learning. *2019 IEEE international conference on sensors and nanotechnology (SENSORS & NANO), Penang, Malaysia, 24–25 July 2019*. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/sensorsnano44414.2019.8940077.
10. Soto-Ocampo C., Cano-Moreno J., Mera J., Maroto J. *Bearing Database*. Available at: <https://zenodo.org/record/3898942#files/YbZtrr1ByUm> (accessed 01.12.2021).
11. Isaienkov K. *Bearing classification*. Available at: <https://www.kaggle.com/isaienkov/bearing-classification> (accessed 22.09.2021).
12. Pedregosa F., Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*. 2011, vol. 12, pp. 2825–2830.
13. Babudzhan, R., Isaienkov, K., Krasii, D., Melkonian, R., Vodka, O., Zadorozhnyi, I., & Yushchuk, M. Collection and processing of bearing vibration data for their technical condition classification by machine learning methods. *Modeling Control and Information Technologies*. 2021, vol. 5, pp. 10–15. doi: 10.31713/mcit.2021.02.
14. Müller A., Guido S. *Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists*. O'Reilly Media, 2016. 400 p.
15. Sulaiman M., Hossin M. A Review on Evaluation Metrics for Data Classification Evaluations. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process*. Vol. 5, pp. 1–11. doi: 10.5121/ijdkp.2015.5201.
16. Janitza S., Hornung R. On the overestimation of random forest's out-of-bag error. *PLoS ONE*. 2018, vol. 13, pp. 2–19. doi: 10.1371/journal.pone.0201904.
17. Bruce P. and Bruce A. *Practical Statistics for Data Scientists: 50 Essential Concepts*. O'Reilly Media, 2017. 318 p.
18. Fishman G. *Monte Carlo: concepts, algorithms, and applications*. Springer, 1996. 689 p.

Надійшла (received) 08.11.2021

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

**Бабуджан Руслан Андрійович** – Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут», студент кафедри динаміки та міцності машин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5765-9234>, e-mail: [ruslanbabudzhan@gmail.com](mailto:ruslanbabudzhan@gmail.com)

**Ісаєнков Константин Олександрович** – інженер, Quantum Inc.; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5266-7040>; e-mail: [k.isaienkov@quantumobile.com](mailto:k.isaienkov@quantumobile.com)

**Красій Данило Максимович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1599-2295>, e-mail: [krasiydm@gmail.com](mailto:krasiydm@gmail.com)

**Водка Олексій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-9869>; e-mail: [Oleksii.vodka@gmail.com](mailto:Oleksii.vodka@gmail.com)

**Задорожний Іван Вячеславович** – Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут», аспірант кафедри динаміки та міцності машин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6952-3024>, e-mail: [Ivan.Zadorozhnyi@khp.edu.ua](mailto:Ivan.Zadorozhnyi@khp.edu.ua)

**Ющук Михайло Вікторович** – інженер, Quantum Inc; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2618-0893>, e-mail: [m.yushchuk@quantumobile.com](mailto:m.yushchuk@quantumobile.com)

**Бабуджан Руслан Андреевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры динамики и прочности машин; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5765-9234>, e-mail: [ruslanbabudzhan@gmail.com](mailto:ruslanbabudzhan@gmail.com)

**Исаенков Константин Александрович** – Quantum Inc., инженер; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5266-7040> e-mail: [k.isaienkov@quantumobile.com](mailto:k.isaienkov@quantumobile.com)

**Красий Данил Максимович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры динамики и прочности машин; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1599-2295>, e-mail: [krasiydm@gmail.com](mailto:krasiydm@gmail.com)

**Водка Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-9869>; e-mail: [Oleksii.vodka@gmail.com](mailto:Oleksii.vodka@gmail.com)

**Задорожный Иван Вячеславович** – Национальный Технический Университет "Харьковский Политехнический Институт", аспирант кафедры динамики и прочности машин; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6952-3024>, e-mail: [Ivan.Zadorozhnyi@khpi.edu.ua](mailto:Ivan.Zadorozhnyi@khpi.edu.ua)

**Ющук Михаил Викторович** – Quantum Inc., инженер; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2618-0893>, e-mail: [m.yushchuk@quantumobile.com](mailto:m.yushchuk@quantumobile.com)

**Babudzhan Ruslan Andriovich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student of the Department of Dynamics and Strength of Machines; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5765-9234>, e-mail: [ruslanbabudzhan@gmail.com](mailto:ruslanbabudzhan@gmail.com)

**Isaienkov Konstantyn Oleksandrovich** – Quantum Inc., engineer; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5266-7040>; e-mail: [k.isaienkov@quantumobile.com](mailto:k.isaienkov@quantumobile.com)

**Krasiy Danilo Maksimovich** – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", student of the Department of Dynamics and Strength of Machines; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1599-2295>, e-mail: [krasiydm@gmail.com](mailto:krasiydm@gmail.com)

**Vodka Oleksii Oleksandrovich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-9869>; e-mail: [Oleksii.vodka@gmail.com](mailto:Oleksii.vodka@gmail.com)

**Zadorozhny Ivan Vyacheslavovich** – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", post-graduate student of the Department of Dynamics and Strength of Machines; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6952-3024>, e-mail: [Ivan.Zadorozhnyi@khpi.edu.ua](mailto:Ivan.Zadorozhnyi@khpi.edu.ua)

**Yushchuk Michael Viktorovich** – Quantum Inc., engineer; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2618-0893>, e-mail: [m.yushchuk@quantumobile.com](mailto:m.yushchuk@quantumobile.com)

## УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

## MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

UDC 004.9

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.02.04

*S. V. OREKHOV, H. V. MALYHON*

### METRICS OF VIRTUAL PROMOTION OF A PRODUCT

An approach to the mathematical description of the criterion for the effectiveness of a new object of research – virtual promotion is presented in the paper. The emergence of this new object of research is connected, on the one hand, with the classical theory of marketing, and on the other with modern Internet technologies. Marketing is based on the 4P principle: product, price, location and promotion. Promotion is a component of this principle. But in modern conditions, this phenomenon is changing under the influence of the Internet. Now this 4P component is becoming a fully virtual instrument. The traditional scheme of promotion functioning is as follows. A message is created to a potential buyer and the delivery channel of this message undergoes a change. It is based on the principle: money – goods – money. While the new sales scheme is described by the scheme: we attract a client, make money on a client, we spend money. In the new scheme, we deal with product knowledge in the form of the so-called semantic core of web content. Knowledge describes for a potential client how a given product can cover his need for something. Using the logistic principles of the transfer of goods, this semantic core is loaded into the specified Internet nodes. That is, virtual promotion is formed as two channels: logistics and marketing. The first one performs three operations: concentration, formatting and distribution of semantic cores on the Internet. The second manages this process, forming a virtual promotion map. This map is a graph of Internet nodes. It is required to define such a tree of Internet nodes so that virtual promotion has maximum efficiency. The paper analyzes modern metrics related to the processes of search engine optimization on the Internet. Unfortunately, these metrics evaluate only statistically after the fact of visiting a web resource or the budget of the Internet site in which the advertising message about the product was placed. Therefore, based on the conversion metric, a criterion for the effectiveness of virtual promotion was proposed in the work, which takes into account both the attractiveness of the semantic core and the attractiveness of the Internet site where the semantic core will be located. The criterion reflects the income that we receive depending on the attractiveness of the semantic kernel and the Internet site.

**Keywords:** semantic kernel, search engine optimization, conversion.

*C. B. OPEXHOV, G. B. MALYHON*

### МЕТРИКИ ВІРТУАЛЬНОГО ПРОСУВАННЯ ПРОДУКТУ

У статті подано підхід до математичного опису критерію ефективності нового об'єкта досліджень – віртуальне просування. Поява цього нового об'єкта досліджень пов'язано з одного боку з класичною теорією маркетингу, а з іншого - з сучасними Інтернет-технологіями. Маркетинг базується на принципі 4P: товар, вартість, місце та просування. Компонентом цього принципу є просування. Але в сучасних умовах цей феномен змінюється під впливом мережі Інтернет. Наразі ця компонента 4P стає повністю віртуальним інструментом. Традиційна схема функціонування просування, коли створюється повідомлення до потенційного покупця і канал доставки цього повідомлення змінюється. Вона виходить з принципів: гроші – товар – гроші. Тоді як нова схема продажів описується схемою: залучаємо клієнта, заробляємо клієнта, витрачаємо. У новій схемі ми маємо справу зі знаннями про продукт у вигляді так званого семантичного ядра веб-контенту. Знання описують для потенційного клієнта, як цей продукт може покрити його потребу у чомусь. Користуючись логістичними принципами передачі товарів, це семантичне ядро завантажується в задані сайти Інтернет. Тобто віртуальне просування формується як два канали: логістичний та маркетинговий. Перший виконує три операції: концентрація, форматування та розподіл семантичних ядер у мережі Інтернет. Другий управляє цим процесом, формуючи карту віртуального просування. Дана карта – це граф вузлів Інтернету. Потрібно визначити таке дерево вузлів Інтернету, щоб віртуальне просування мало максимальну ефективність. У роботі проведено аналіз сучасних метрик, пов'язаних із процесами пошукової оптимізації у мережі Інтернет. На жаль, ці метрики оцінюють лише статистично постфактум відвідування веб-ресурсу або бюджет вузла Інтернет, в якому було розміщено рекламне повідомлення про продукт. Тому в роботі на основі метрики конверсії було запропоновано критерій ефективності віртуального просування, який враховує як привабливість семантичного ядра, так і привабливість вузла Інтернет, де буде розміщено семантичне ядро. Критерій відображає дохід, який отримемо ми залежно від привабливості семантичного ядра та вузла Інтернет.

**Ключові слова:** семантичне ядро, ключове слово, пошукова оптимізація в Інтернет, конверсія.

*C. B. OPEXHOV, G. B. MALYHON*

### МЕТРИКИ ВІРТУАЛЬНОГО ПРОДВИЖЕННЯ ПРОДУКТА

В статье представлен подход к математическому описанию критерия эффективности нового объекта исследований – виртуальное продвижение. Появление этого нового объекта исследований связано с одной стороны с классической теорией маркетинга, а с другой с современными Интернет технологиями. Маркетинг базируется на принципе 4P: продукт, цена, место и продвижение. Компонентом этого принципа выступает продвижение. Но в современных условиях данный феномен изменяется под влиянием сети Интернет. Сейчас эта компонента 4P становится полностью виртуальным инструментом. Традиционная схема функционирования продвижения, когда создается

© S. V. Orekhov, H. V. Malyhon, 2021

сообщение к потенциальному покупателю и канал доставки данного сообщения претерпевает изменение. Она базируется на принципе: деньги – товар – деньги. В то время как новая схема продаж описывается схемой: привлекаем клиента, зарабатываем на клиенте, тратим. В новой схеме мы имеем дело со знаниями о продукте в виде так называемого семантического ядра веб контента. Знания описывают для потенциального клиента, как данный продукт может покрыть его потребность в чем-то. Пользуясь логистическими принципами передачи товаров, данное семантическое ядро загружается в заданные узлы Интернет. То есть виртуальное продвижение формируется как два канала: логистический и маркетинговый. Первый выполняет три операции: концентрация, форматирование и распределение семантических ядер в сети Интернет. Второй управляет данным процессом, формируя карту виртуального продвижения. Данная карта – это граф узлов сети Интернет. Требуется определить такое дерево узлов Интернет, чтобы виртуальное продвижение имело максимальную эффективность. В работе проведен анализ современных метрик, связанных с процессами поисковой оптимизации в сети Интернет. К сожалению, эти метрики оценивают только статистически постфактум посещения веб ресурса или бюджет узла Интернет, в котором было размещено рекламное сообщение о продукте. Поэтому в работе на основе метрики конверсия был предложен критерий эффективности виртуального продвижения, который учитывает как привлекательность семантического ядра, так и привлекательность узла Интернет, где семантическое ядро будет размещено. Критерий отражает доход, который получаем мы в зависимости от привлекательности семантического ядра и узла Интернет.

**Ключевые слова:** семантическое ядро, ключевое слово, поисковая оптимизация в Интернет, конверсия.

**Introduction.** In article [1] describes a new control object – virtual promotion. The main purpose of this facility is to stimulate sales through information technology available on the Internet.

The traditional definition of product promotion speaks of increasing the efficiency of sales, sales and demand [2–4]. However, the central place in the promotion process is given to the formation of messages that inform potential customers about the product, packaging, brand, advertising exhibitions, demonstrations, business and more. Accordingly, the effectiveness of sales will depend on the effectiveness of the message about the product to potential customers. In other words, the effectiveness of virtual promotion is determined by the effectiveness of the communication channel between the company and customers, where the message about the product is transmitted.

Thus, it is possible to define virtual promotion as an impersonal channel of communication with a potential client. Let's analyze the existing metrics for evaluating the effectiveness of such a channel.

**Related works.** Marketing theory defines sales efficiency as profitability of sales [2–4]. This indicator expresses the share of profit from each earned UAH as a percentage. Or it is the ratio of net income to the amount received from the sale of products, which is expressed as a percentage [2–4]. Then the impact of promotion is determined by the costs that the company incurs on the formation of the communication channel and the message itself. Profitability can also be affected by the number of customers involved through the message and the communication channel.

Thus, it is necessary to determine the metrics and criteria that describe the effectiveness of the channel and the message. On the one hand, we need criteria that indicate the reduction of costs for the formation of the communication and communication channel, and on the other hand, we need metrics that determine the number of customers attracted through the channel and communication.

Currently, the indicator that can describe the effectiveness of the channel and the message on the Internet is traffic [5–6]. It describes the number of unique users who read messages in the channel per unit time.

The channel is also characterized by the budget and the traffic it generates. In [7] the indicator of conditional efficiency of the channel and message on the basis of the classical theory of marketing and search engine optimization was introduced [6]:

$$E = \frac{T}{B}, \quad (1)$$

where  $T$  – traffic,  $B$  – budget.

$$P = \frac{B}{T}, \quad (2)$$

$$O = \frac{T}{B}, \quad (3)$$

where  $O$  – the average payback of the channel, and  $P$  – the price of attracting one customer of goods through this channel.

Another indicator of the efficiency of the channel is the rate of return on investment [5]:

$$ROI = \frac{Pr - Ex}{Ex}, \quad (4)$$

where  $Pr$  – profit,  $Ex$  – expenses on channel formation.

The next important indicator is conversion (5).

$$K = \frac{Q_{clients}}{N}, \quad (5)$$

where  $Q_{clients}$  – the number of customers attracted by the promotion channel, and  $N$  is the total number of channel visitors [7].

It reflects the achievement of the main goal - to attract the required number of buyers of goods.

All the above indicators correspond to one of the seven categories, namely: traffic, bounce rate, conversion, the cost of attracting one buyer, the average check, return on investment, repeat visits. But these indicators are only metrics, unfortunately, the criterion of effectiveness among them is not identified. Modern theory of Internet promotion is based only on the metric approach.

Thus, there is an urgent problem of formulating a criterion for the effectiveness of virtual promotion. This criterion should describe the benefit of the message in the promotion channel and the benefit of the channel itself. And since virtual promotion is a two-tier system, the benefits must be determined at two levels coordinated in time.

**Problem statement.** First, you need to consider the mechanism of the object's functioning - virtual promotion. It includes two levels of marketing and technological



(logistics). The first level describes the nodes of the virtual promotion map. Each node is a separate, either a WEB site, or a social network profile, or a video blog, or a telegram channel. Each node at the technological level has an IP address and domain name according to the OSI model. Also, the node is characterized by a set of software components that are installed in it. These software components support a specific set of information technologies. Therefore, the virtual promotion map consists of a description of profiles and domain names, as well as a set of technologies that function to increase the traffic of these nodes. The main metric of a node is traffic [8].

Thus, virtual promotion is described by a map on which a tree of Internet nodes is presented, in which it is planned to place the specified information about the product that needs to be sold. We will consider the corporate website (its domain name) as the root of the tree. The leaves of the tree will be domain names of profiles in social networks, web pages with product descriptions, domain names of telegram channels, web pages of marketplaces, links to video blogs and other links on the Internet. That is, the map at the first level is a lot of links. The second element of the map is the semantic core and its evolution [9]. The third slice of the virtual view map is the technology pool. This is a tree of technologies to stimulate attendance of the map node at a given point in time.

Then a criterion is required that reflects the usefulness or effectiveness of the virtual promotion map.

**Proposed approach.** Let's expand our understanding of the virtual promotion map as follows. Let each node of the map be characterized by its current state. This is a metric according to the theory of situational management [10]. Let the current state describe the conversion of node (5) [11]. Our goal is to build such a virtual promotion map that provides maximum conversion.

Let's assume that the map is generated and its nodes are known. Then, at each node, we observe the appearance of visitors (network users) at a given time interval. Some of them will place an order for the purchase of a given product. The number of visitors and the number of buyers are generally described by CTR, CTI, CTB, CPV and CPUU [12]. All of these metrics include the number of users and the number of buyers.

On the other hand, the number of map nodes will be limited for financial reasons. The fact is that it is possible to ensure a steady increase in the value of conversion in the modern Internet only at the expense of constant financial costs. This means that we will assume that there is a certain budget  $B$ , which is allocated for the implementation of the virtual promotion map [11–12].

Let's designate as  $I_{tj}$  – income, which provides the  $j$ -th node for the time interval  $t$ . Then  $u_{tj}$  – the number of buyers in the  $j$ -th node for the time interval  $t$ . It is required to deliver the maximum to the criterion:

$$\sum_{t \in T} \sum_j \frac{I_{tj}}{u_{tj}} \rightarrow \max, \quad (6)$$

In general,  $r_{tj}$  there is a function that depends on the number of nodes of the virtual promotion map (configuration), as well as on the attractiveness of the semantic core of the web content that is located in the node. It also depends on the price of placing this semantic core in the map node.

$$u_{tj} = f_j^t(b_{tj}, M_{tj}) = U_1(b_{tj}) + U_2(M_{tj}), \quad (7)$$

where  $U_1$  – cost function for the placement of the semantic core in the  $j$ -th node,  $U_2$  – the function of assessing the attractiveness of the semantic core, which is located in the  $j$ -th node. The first function allows you to estimate the number of users who are interested in the semantic core due to its placement in this particular node of the map. The first function also shows the level of trust of Internet users to the information located in this site. This function is similar to the CTR metric. The second shows how many users are interested in the semantic core due to its attractiveness. This function is similar to the CTI metric. Then we have:

$$\sum_{t \in T} \sum_j \frac{I_{tj}}{U_1(b_{tj}) + U_2(M_{tj})} \rightarrow \max, \quad (8)$$

**Summary.** Criterion (8) is similar to the conversion metric, but it describes the income received on average from one customer. This situation is more suitable for Internet sales, since the number of sellers is unlimited and it is difficult for a potential buyer to decide. On the other hand, the seller, if a purchase is made, needs to get the maximum income from each client.

Formula (8) also takes into account two main ways of attracting a customer: the correct choice of a product message (semantic core) and the correct choice of a node for placing such a message.

**Future work.** The next step in the work is to clarify the restrictions that are imposed from the side of the map node itself. Since each node has its own purpose on the Internet and its metrics do not always coincide with the above. In addition, you need to set the type of functions  $U_1$  and  $U_2$ .

## References

1. Orekhov S.V., Malyon H.V. Virtual promotion knowledge management technology. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии. Харьков: НТУ «ХПИ», 2020. № 1 (3). С. 74-79.
2. Котлер Ф. *Основы маркетинга Краткий курс*. Киев: Диалектика, 2016. 496 с.
3. Ламбен Ж. *Стратегический маркетинг. Европейская перспектива*. СПб: Наука, 1996. 589 с.
4. Пьянков В.В., Тимофеева О.А., Кельбах Е.И. *Практический маркетинг: учеб. пособие*. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2013. 134 с.
5. Шапиной И. М. *100 способов увеличить посещаемость сайта*. Москва: IPS.RU, 2016. 171 с.
6. Нееловой Н. М. *Энциклопедия поискового продвижения Ingate. Издание 2-е*. Москва: ИП Андросов, 2017. 541 с.
7. Bendle N., Farris P., Pfeifer P., Reibstein D. *Marketing metrics. The manager's guide to measuring marketing performance*. США: Pearson Education Inc., 2016. 456 с.

8. Hashimova K.K. Development of an Effective Method of Data Collection for Advertising and Marketing on the Internet. *I.J. Mathematical Sciences and Computing*, 2021. № 3. С. 1–11.
9. Orekhov S., Malyhon H., Stratienco N., Goncharenko T. Software Development for Semantic Kernel Forming. *CEUR WS. США*, 2021. № 2870. С. 1312–1322.
10. Поспелов Д.А. *Ситуационное управление: теория и практика*. Москва: Наука, 1986. 288 с.
11. Godlevsky M., Orekhov S., Orekhova E. Theoretical Fundamentals of Search Engine Optimization Based on Machine Learning. *CEUR WS. США*, 2017. № 1844. С. 23–32.
12. Hashimova K.K. Analysis Method of Internet Advertising-Marketing Information's Dynamic Changes. *I.J. Information Engineering and Electronic Business. США*, 2017. № 5. С. 28–33.
5. Shaminoy I. M. *100 sposobov uvelichit poseschaemost сайта*. [100 Ways to Increase Site Traffic]. Moscow, IPS.RU Publ., 2016. 171 p.
6. Neelovoy N. M. *Enciklopediya posikovogo rpdvizeniya Ingate. Izdanie 2-e*. [Encyclopedia of Ingate Search Engine Promotion. Edition 2]. Moscow, IP Androsov Publ., 2017. 541 p.
7. Bendle N., Farris P., Pfeifer P., Reibstein D. *Marketing metrics. The manager's guide to measuring marketing performance*. USA, Pearson Education Publ., 2016. 456 p.
8. Hashimova K.K. Development of an Effective Method of Data Collection for Advertising and Marketing on the Internet. *I.J. Mathematical Sciences and Computing*, 2021. № 3, pp. 1–11.
9. Orekhov S., Malyhon H., Stratienco N., Goncharenko T. Software Development for Semantic Kernel Forming. *CEUR WS. USA*, 2021. № 2870, pp. 1312–1322.
10. Pospelov D.A. *Situacionnoe upravlenie: teoriya I praktika*. [Situational management: theory and practice]. Moscow, Nauka Publ., 1986. 288 p.
11. 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.
12. Hashimova K.K. Analysis Method of Internet Advertising-Marketing Information's Dynamic Changes. *I.J. Information Engineering and Electronic Business. USA*, 2017. № 5, pp. 28–33.

#### References (transliterated)

1. Orekhov S.V., Malyhon H.V. Virtual promotion knowledge management technology. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology*. Kharkiv: NTU «KPI» Publ., 2020. № 1 (3), pp. 74–79.
2. Kotler F. *Osnovu marketings. Kratkiy kurs*. [Marketing fundamentals. Short course]. Kiev, Dialektika Publ., 2016. 496 p.
3. Lamben J. *Strategicheskyy marketing. Europeyskaya perspektiva*. [Strategic marketing. European perspective]. SPb, Nauka Publ., 1996. 589 p.
4. Pjankov V.V., Timofeeva O.A., Kelbah E.I. *Prakticheskyy marketing: uchebnoe posobie*. [Practical marketing: tutorial]. Perm, Permsky State National Research University Publ., 2013. 134 p.

Received 11.10.2021

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

**Орехов Сергій Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-5861>; e-mail: [sergey.v.orekhov@gmail.com](mailto:sergey.v.orekhov@gmail.com)

**Малигон Геннадій Васильович** – аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-2488>; e-mail: [gmalygon@gmail.com](mailto:gmalygon@gmail.com)

**Орехов Сергей Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии та информационных технологий управления; Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-5861>; e-mail: [sergey.v.orekhov@gmail.com](mailto:sergey.v.orekhov@gmail.com)

**Малигон Геннадий Васильевич** – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры программной инженерии та информационных технологий управления; Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-2488>; e-mail: [gmalygon@gmail.com](mailto:gmalygon@gmail.com)

**Orekhov Sergey Valerievich** – PhD, Associate Professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of Software Engineering and Management Information Technologies department; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5040-5861>; e-mail: [sergey.v.orekhov@gmail.com](mailto:sergey.v.orekhov@gmail.com)

**Malyhon Hennadiy Vasiliievich** – Post graduate, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Post graduate of Software Engineering and Management Information Technologies department; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5448-2488>; e-mail: [gmalygon@gmail.com](mailto:gmalygon@gmail.com)

# МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

UDC 621.384.6+539.1.074.8

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.02.05

*A. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК, А. Ю. СИДОРЕНКО*

#### ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ФОРМИРУЕМОГО МАГНЕТРОННОЙ ПУШКОЙ С ВТОРИЧНОЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ, В СПАДАЮЩЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ СОЛЕНОИДА: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований и расчетов по формированию радиального электронного пучка магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом в диапазоне энергий электронов 35...65 кэВ и измерению его параметров при транспортировке в суммарном спадающем магнитном поле соленоида и поля рассеяния постоянных магнитов. Транспортировка пучка осуществлялась в системе, состоящей из медных колец с внутренним диаметром 66 мм, находящейся на расстоянии 85 мм от среза магнетронной пушки. Изучена зависимость тока пучка от амплитуды и градиента спада поля. Проведенные исследования показали возможность формирования радиального электронного пучка с энергией в десятки килоэлектронвольт в спадающем магнитном поле соленоида. Оптимизацией распределения магнитного поля (создаваемого соленоидом и кольцевыми магнитами) и его градиента спада можно добиться увеличения попадания электронов на одно кольцо (до ~72 % тока пучка). На основе математической модели движения электронного потока синтезировано программное средство, позволяющее получать и интерпретировать характеристики результирующих потоков. Полученные численные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом спада. Рассмотрены различные конфигурации магнитного поля. Получены решения прямой задачи моделирования траекторий электронов для заданных начальных условий и параметров. Рассмотрены различные конфигурации магнитного поля. Показано, что для выбранных начальных условий для пучка электронов и распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого порядка миллиметра. Таким образом, изменяя амплитуду и распределение магнитного поля, можно регулировать ток в радиальном направлении вдоль длины трубы, и, следовательно, место электронного облучения.

**Ключевые слова:** магнетронная пушка, вторичноэмиссионный катод, электронный пучок, математическое моделирование, распределение магнитного поля.

*O. С. МАЗМАНИШВІЛІ, М. Г. РЕШЕТНЯК, Г. Ю. СИДОРЕНКО*

#### ДИНАМІКА ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В СПАДАЮЧОМУ СОЛЕНОІДАЛЬНОМУ МАГНІТНОМУ ПОЛІ МАГНЕТРОННІЙ ГАРМАТИ З ВТОРИЧНОЕМИСІЙНИМ КАТОДОМ: ЕКСПЕРИМЕНТ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

У даній роботі представлені результати експериментальних досліджень та розрахунків за динамікою пучка електронів у магнетронній гарматі зі вторинноемісійним катодом. При енергії електронів 35...65 кеВ виміряні параметри пучка. Рух частинок здійснювався у спадаючому магнітному соленоїдальному полі. Ділянка руху складалася з 14 кілець діаметром 66 мм, розташованих на відстані 85 мм від анода гармати. Вивчено залежність струму пучка від амплітуди та градієнта спаду поля. Експериментально показана можливість концентрації пучка електронів з енергією в десятки кеВ у спадаючому магнітному полі соленоїда. Оптимізацією розподілу магнітного поля, що створене соленоїдом та кільцевими магнітами) та його градієнта спаду можна домогтися збільшення попадання електронів на одне кільце (до ~72 % струму пучка). На основі математичної моделі руху електронного потоку синтезовано програмний засіб, що дозволяє отримувати та інтерпретувати характеристики результируючих потоків. Чисельно проведено моделювання динаміки руху сукупності електронів (кількість частинок 1000) у магнітному полі соленоїда. Отримані чисельні залежності задовільно узгоджуються з експериментальними результатами для магнітного поля з великим градієнтом спаду. Для цих умов проведено пряме моделювання руху електронів. Розглянуто різні зміни магнітного поля. Показано, що для обраних початкових умов пучка електронів і розподілу магнітного поля в системі електронний згусток виявляється на вертикальній ділянці міліметрового розміру. Таким чином, змінюючи амплітуду та розподіл магнітного поля, можна регулювати струм у радіальному напрямку вздовж довжини труби, і, отже, місце електронного опромінення.

**Ключові слова:** магнетронна пушка, вторинноемісійний катод, електронний пучок, математичне моделювання, розподіл магнітного поля.

*O. S. MAZMANISHVILI, M. G. RESHETNYAK, G. YU. SYDORENKO*

#### DYNAMICS OF AN ELECTRON BEAM FORMED BY MAGNETRON GUN WITH THE SECONDARY EMISSION CATHODE IN THE DECLINING MAGNETIC FIELD OF SOLENOID: EXPERIMENT AND SIMULATION

The article presents the results of research and calculations on the formation of a radial electron beam by a magnetron gun with a secondary emission

© А. С. Мазманишвили, Н. Г. Решетняк, А. Ю. Сидоренко, 2021

cathode in the electron energy range 35..65 keV and measuring its parameters during transportation in the total decreasing magnetic field of the solenoid and the stray field of permanent magnets. The beam was transported in a system consisting of copper rings with an inner diameter of 66 mm, located at a distance of 85 mm from the exit of the magnetron gun. The dependence of the beam current on the amplitude and gradient of the field decay has been studied. The studies carried out have shown the possibility of stable formation of a radial electron beam with an energy of tens of keV in the decreasing magnetic field of the solenoid. By optimizing the distribution of the magnetic field (created by the solenoid and ring magnets) and its decay gradient, it is possible to achieve an increase in the incident of electrons on one ring (up to ~72% of the beam current). On the basis of the mathematical model of the movement of the electron flow, a software tool has been synthesized that makes it possible to obtain and interpret the characteristics of the resulting flows. The obtained numerical dependences are in satisfactory agreement with the experimental results for a magnetic field with a large decay gradient. Various configurations of the magnetic field are considered. Solutions to the direct problem of modeling electron trajectories for given initial conditions and parameters are obtained. Various configurations of the magnetic field are considered. It is shown that for the selected initial conditions for the electron beam and the distributions of the longitudinal magnetic field along the axis of the gun and the transport channel, the electron flux falls on a vertical section, the length of which is on the order of a millimeter. Thus, by changing the amplitude and distribution of the magnetic field, it is possible to control the current in the radial direction along the length of the pipe, and, therefore, the place of the electron irradiation.

**Keywords:** magnetron gun, secondary-emission cathode, electron beam, mathematical design, distribution of magnetic-field.

**Введение.** В настоящее время ведутся работы по широкому применению радиационных технологий. В данном направлении можно выделить ряд актуальных задач: формирование и использование устойчивого пучка электронов для стерилизации медицинской продукции [1, 2, 3], изменение поверхностных свойств металлов и фазового состава путем поверхностной обработки электронным пучком и т.д. При обработке электронным пучком некоторых типов сталей получено увеличение твердости от 2 до 5 раз и возрастания срока службы. При обработке лопаток газовых турбин электронным пучком увеличивается срок службы в 2...2,5 раз [4, 5].

**Обзор предметной области. Актуальность.** Рассмотрение задач управления электронным пучком требует создания нужной геометрии магнитного поля с целью формирования устойчивого пучка электронов при его передаче вдоль канала ускорителя. Такая реализация связана с предварительным компьютерным моделированием динамики электронного пучка для конкретных ускорителей и последующей экспериментальной проверкой результатов. Подобные расчеты проводились в ряде работ. Так, в работе [6] получены результаты расчетов динамики сгустков ускоренных электронов в периодически меняющемся во времени магнитном поле в линейном СВЧ-ускорителе на стоячей волне. В работе [7] приводятся теоретические расчеты геометрии магнитного поля для формирования электронных вращающихся сгустков. Проведено численное моделирование продольного сжатия трубчатого пучка без учета эффектов пространственного заряда и получены оптимальные параметры установки для реализации продольного сжатия трубчатого пучка в магнитной системе типа „касп“. Исследованы зависимости характеристик сжатого пучка, определяющие допуски на его начальные параметры и параметры магнитной системы. В работе [8] проведено численное моделирование процесса инжекции пучка электронов сходящимся магнитным полем в магнитную ловушку. Промоделирован эффект появления угловой расходимости скоростей электронов в магнитном поле при транспортировке пучка и его сжатии. Определен диапазон токов пучка, при превышении которого появляются отраженные от пробки электроны. В работе [9] рассмотрена динамика пучка в магнитном поле кольцевого соленоида. Разработан программный модуль для моделирования динамики частиц в

магнитных полях, конфигурация контуров которых задается аналитически. В работе [10] на основе метода макрочастиц получены конфигурационные портреты пучка, и распределение плотности заряда вдоль канала в триодных системах, изучено влияние геометрии системы на формирование виртуального катода.

Следует отметить, что получение электронных пучков с помощью описанных в представленных работах установок обуславливает небольшой срок службы катодов. В НИЦ ХФТИ на протяжении последних лет ведутся исследования с источниками электронов с холодными катодами, работающими в режиме вторичной эмиссии с их поверхности в скрещенных электрических и магнитных полях [11, 12]. Достоинством вторичноэмиссионного источника является: отсутствие накала, простота конструкции, способность работать в условиях технического вакуума ( $\sim 10^{-6} \dots \sim 10^{-5}$  Торр), безинерционность включения, высокая плотность тока  $\sim 50$  А/см<sup>2</sup> с единицы поперечной площади катодов, при этом катоды не теряют эмиссионную способность после напуска атмосферы. Считается, согласно оценкам, что время жизни катодов из платины составляет  $\sim 10000$  ч.

**Цель.** В данной работе представлены результаты исследований по динамике пучка электронов в магнетронной пушке с вторичноэмиссионным катодом. При энергии электронов в 35..65 кэВ измерены параметры пучка. Движение частиц осуществлялось в спадающем магнитном соленоидальном поле и поле рассеяния постоянных магнитов и описана математическая модель движения электронного потока в этом поле. Актуальность работы обусловлена отсутствием достаточных экспериментальных и теоретических результатов, описывающих формирование электронного пучка в установках с холодными катодами.

**Экспериментальная установка и методика исследований.** Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

Для питания магнетронной пушки использовался импульсный генератор **1**, который обеспечивал получение импульса напряжения с выбросом на вершине  $\sim 100$  кВ, амплитуда плоской части импульса  $\sim 65$  кВ, длительность импульса  $\sim 15$  мкс. Источник электронов (С – катод, А – анод) размещается в вакуумном объеме **3**. Магнетронная пушка имела анод диаметром 78 мм и катод диаметром 38 мм. Для

транспортировки электронного пучка создается магнитное поле соленоидом 4, состоящим из четырех секций, каждая из которых питалась от источников постоянного тока. Изменяя ток в каждой из катушек можно регулировать продольное распределение магнитного поля в канале транспортировки пучка и тем самым использовать различные режимы формирования электронного пучка.

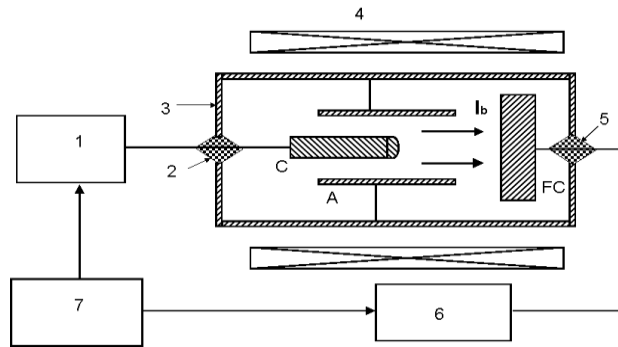


Рис. 1. Блок схема экспериментальной установки.

1 – высоковольтный импульсный генератор; 2, 5 – проходные изоляторы; 3 – вакуумная камера магнетронной пушки с вторичноэмиссионным катодом (С – катод, А – анод), 4 – соленоид, создающий продольное магнитное поле, FC – цилиндр Фарадея; 6 – компьютерная измерительная система, 7 – блок синхронизации

Система транспортировки электронов состояла из 14 медных колец с внутренним диаметром ~66 мм, находящейся на расстоянии ~85 мм от среза магнетронной пушки (рис. 2). Для фиксации однородности радиального электронного пучка 11-е кольцо было разрезано на 4 идентичных сегмента.

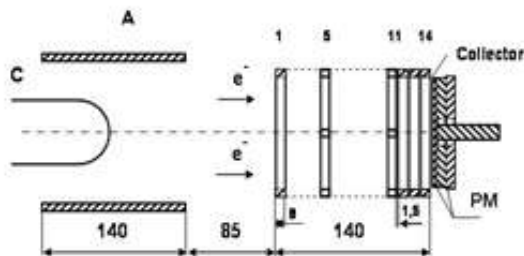


Рис. 2. Расположение элементов пушки и системы измерения тока пучка (А – анод, С – катод, 1...14 – металлические кольца, PM – постоянные магниты. Кривые 1, 2 – суммарное магнитное поле соленоида и поля рассеяния постоянных магнитов, кривая 3 – поле без использования постоянных магнитов)

На рис. 3 приведено распределение продольного магнитного поля (кривые 1, 2, 3 вдоль оси магнетронной пушки и канала транспортировки пучка, при которых проводились эксперименты. Направления полей кольцевых магнитов было противоположное. Обработка результатов измерений параметров импульсов напряжения, токов в радиальном и осевом направлениях проводилась с помощью компьютерной измерительной системы (6).

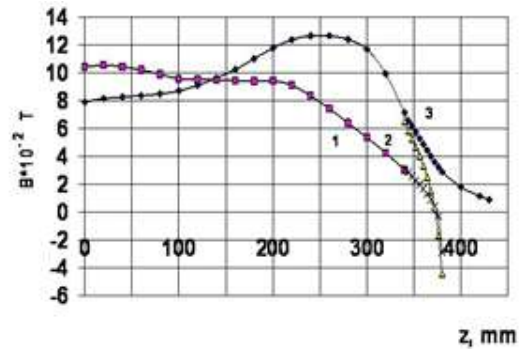


Рис. 3. Распределение продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки пучка

### Экспериментальные результаты и их обсуждение.

Были проведены эксперименты, в которых для регулирования спада магнитного поля использовалось рассеянное магнитное поле в кольцевых магнитах, которые размещались на оси системы. В экспериментальных исследованиях в диапазоне энергий электронов 35...65 кэВ обнаружено, что величина тока пучка в радиальном направлении и его распределение вдоль длины металлических колец зависит от амплитуды распределения магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада поля.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы сигналов напряжения на катоде U и токов в радиальном направлении  $I_{13}$  и  $I_{14}$  снятые с 13-го и 14-го колец, которые были получены при распределении магнитного поля, показанного на рис. 3 (кривая 2). Эксперименты показали, что при этом распределении магнитного поля, как видно из рис. 5, ток в радиальном направлении на 14-е кольцо составлял ~70 % тока пучка при энергии электронов ~42 кэВ. Магнитное поле в области расположения 14-го кольца имело градиент спада ~280 Ое/см при напряженности магнитного поля на середине кольца ~400 Ое/см. Ток в радиальном направлении на 13-е кольцо составлял ~15 %, а на 12-е – ~4 %, а ток, идущий в осевом направлении, составлял ~11 % тока пучка.

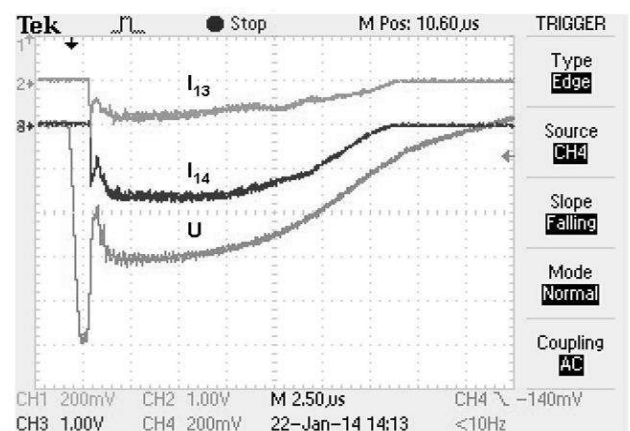


Рис. 4. Осциллограммы импульсов токов в радиальном направлении ( $I_{13}$ ,  $I_{14}$ ) и импульс напряжения на катоде (U).  $I_{13}$  – 4.5 А/дел,  $I_{14}$  – 14 А/дел, U – 14 кВ/дел

Исследования показали, что при уменьшении градиента спада магнитного поля до  $\sim 100$  Ое/см (без использования постоянных магнитов), в области 14-го кольца (рис. 3, кривая 3), ток в радиальном направлении на кольцо уменьшился на 80 %, как видно из рис. 5 (для кривой 3). При этом увеличивались токи в радиальном направлении с 13-го кольца по 10-е соответственно.

Экспериментально установлено, что, варьируя распределение магнитного поля вдоль оси магнетронной пушки (рис. 3, кривая 1), можно было регулировать ток вдоль длины колец. Как видно из рисунка, в области нахождения магнетронной пушки и вдоль измерительной системы магнитное поле было спадающее. При этом распределении магнитного поля максимум тока смещался с 14-го кольца на 11-е и составлял  $\sim 38$  % тока пучка при энергии электронов 45 кэВ. Магнитное поле в области расположения 11-го кольца было спадающее с градиентом поля  $\sim 110$  Ое/см. Так как 11-е кольцо было разрезано на 4 идентичных сегмента, то, снимая радиальные токи с двух противоположных разнесенных на 180° сегментов, можно было судить об азимутальной однородности пучка.

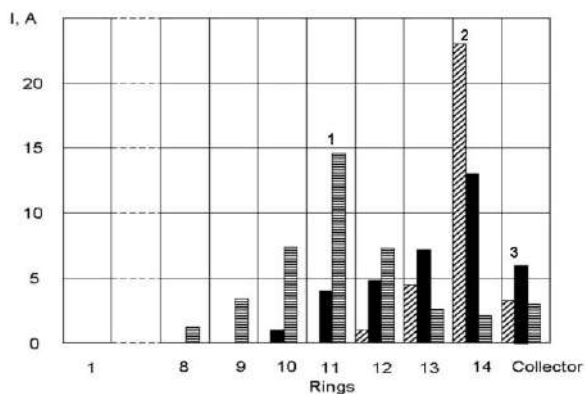


Рис. 5. Сравнительная гистограмма распределения токов в радиальном направлении по кольцам для различных градиентов спада магнитного поля, приведенного на рис. 3; 1 – магнитное поле (кривая 1), 2 – магнитное поле (кривая 2), 3 – магнитное поле (кривая 3)

На рис. 6 приведены осциллограммы импульсов токов в радиальном направлении, снятые с 2-го и 3-го сегментов 11-го кольца. Из осциллограмм видно, что форма и амплитуда сигналов с сегментов при распределении магнитного поля, показанного на рис. 3 (кривая 1), практически совпадают. Коэффициент азимутальной неоднородности пучка равнялся  $\sim 1.1$ .

Ранее проведенные исследования показывают, что азимутальная однородность электронного пучка в сильной степени зависит от продольного распределения магнитного поля [1]. Оптимальным для формирования электронного пучка является распределение магнитного поля на катоде, при котором коэффициент азимутальной однородности пучка – минимальный.

На рис. 7 приведена зависимость тока на 14-м кольце от градиента спада магнитного поля. Из рисунка видно, что с увеличением градиента спада

магнитного поля значительная часть тока  $\sim > 70$  % от общего тока пучка протекает через одно металлическое кольцо.

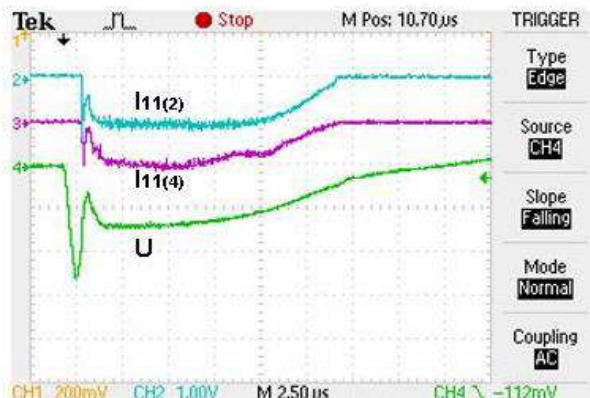


Рис. 6. Осциллограммы импульсов токов в радиальном направлении с двух сегментов 11-го кольца ( $I_{11(2)} = 3.6$  А,  $I_{11(4)} = 3.5$  А) и импульс напряжения на катоде (U);  $I_{11(2)} - 3.5$  А/дел,  $I_{11(4)} - 3.5$  А/дел,  $U \sim 30$  кВ/дел

Следует отметить, что в диапазоне градиента спада магнитного поля до  $\sim 110$  Ое/см эти данные были получены с помощью регулирования спада поля только соленоидом.

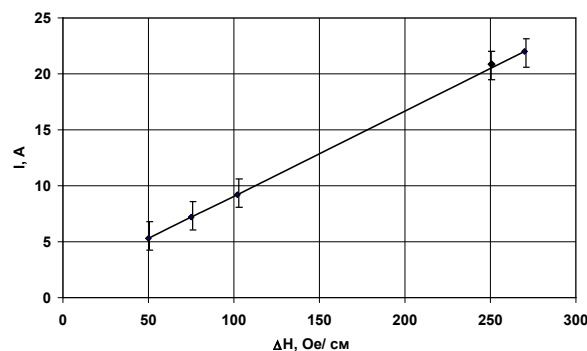


Рис. 7. Зависимость тока в радиальном направлении на 14-е кольцо от градиента спада магнитного поля

Амплитуда тока пучка в радиальном направлении на металлические кольца и его распределение вдоль длины колец зависела не только от градиента спада магнитного поля, но и от величины напряженности магнитного поля в этой области.

В исследованиях показано, что плотность мощности пучка на металлическом кольце составляет  $\sim 0.1$  МВт/см<sup>2</sup> (энергия  $E \sim 62$  кэВ, ток  $I \sim 28$  А) при длительности импульса  $\sim 15$  мкс и частоте повторения  $\sim 3$  Гц. Если допустить, что весь ток в радиальном направлении равномерно распределен по длине кольца, то приведенной мощности будет недостаточно для модификации внутренней поверхности материалов трубчатых изделий. В дальнейшем будут проведены исследования различных режимов работы ускорителя при энергии электронов 100... 120 кэВ для повышения плотности мощности на внутренней цилиндрической поверхности.

**Математическое моделирование.** Полученные результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о возможности устойчивого формирования электронного пучка в радиальном направлении магнетронной пушкой с холодным вторичноэмиссионным катодом в спадающем магнитном поле соленоида. Для понимания и объяснения физических процессов, сопровождающих механизм такого формирования, следует провести теоретический анализ задачи, в которой электрон с энергией  $E$ , стартующий на некотором расстоянии  $r_0$  от нот оси системы, влетает в заданное соленоидальное магнитное поле. Требуется получить траекторию для электрона. Такая задача имеет обобщение для пучка исходных электронов с заданным стартовым распределением по радиусу  $r_0$  и по направлениям  $r'_0$ .

Гамильтониан рассматриваемой задачи в полярной системе координат  $(r, z, \vartheta)$  имеет вид

$$H = \frac{p_r^2 + p_z^2}{2m} + \frac{1}{2m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 A \right)^2, \quad (1)$$

где  $e_0$ ,  $m$  – заряд и масса покоя электрона,  $p_r$ ,  $p_z$ ,  $p_\vartheta$  – канонические импульсы,  $A$  – магнитный потенциал, который с учетом азимутальной симметрии пока записывается в виде  $A = A(r, z) = Brf(z)$ , где  $f(z)$  – амплитудная функция магнитного поля,  $B$  – напряженность магнитного поля в начальной точке. Теперь уравнения движения можно записать в виде

$$\begin{cases} \dot{r} = \frac{p_r}{m}, \quad \dot{z} = \frac{p_z}{m}, \\ \dot{\vartheta} = \frac{1}{m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \frac{1}{r}, \\ \dot{p}_r = -\frac{1}{m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left( \frac{p_\vartheta}{r^2} - e_0 Brf'(z) \right), \\ \dot{p}_z = -\frac{1}{m} \left( \frac{p_\vartheta}{r} - e_0 Brf(z) \right) \left( -e_0 Br \frac{\partial}{\partial z} f(z) \right), \\ \dot{p}_\vartheta = 0. \end{cases} \quad (2)$$

К уравнениям (2) необходимо присоединить начальные условия для  $r_0$ ,  $z_0$ ,  $\vartheta_0$ , а также для  $p_{r0}$ ,  $p_{z0}$ ,  $p_{\vartheta0}$ . Устойчивость численного алгоритма решения связана с шагом  $\Delta s$  решения, где  $s = ct$  ( $t$  – текущее время), и ларморовским параметром  $\mu = e_0 B / mc$ . Численное решение системы (2) будет сходиться к его аналитическому аналогу, если  $\mu \Delta s \ll 1$ , что обеспечивается при  $\Delta s \ll 0.0001$  м.

Численно искать решение системы (2) возможно, если амплитуда  $f(z)$  магнитного поля, а также её производная  $\frac{\partial}{\partial z} f(z)$ , будут заданы в аналитическом виде. Для этого была создана процедура, позволяющая на основании массива магнитного поля (рис. 2, 3), а также известных геометрических характеристик использованных соленоидов восстанавливать распределение амплитуды магнитного поля на оси  $z$ . Аналитическое представление для функции  $f(z)$  возможно восстановить, опираясь на известную формулу [13]

$$A(z) = \frac{1}{4} \left( \frac{z - z_r}{\sqrt{(z - z_r)^2 + R^2}} - \frac{z - z_l}{\sqrt{(z - z_l)^2 + R^2}} \right), \quad (3)$$

в которой  $A(z)$  – соленоидальная функция магнитного поля,  $R$ ,  $z_l$ ,  $z_r$  – радиус, левая и правая границы

соленоида, и аналогично для каждого из соленоидов. Набор из  $M$  экземпляров такого рода соленоидальных функций не образует полного базиса, пригодного для решения. Однако если учесть, что соленоиды следуют последовательно вдоль оси  $Z$ , а левые и правые фронты спадающего магнитного поля в каждом из них достаточно малы относительно продольных размеров, то можно принять, что в совокупности свойства каждой из этих функций близки к свойствам тета-функций Хэвисайда, пригодных для использования их в качестве базиса. Сопоставляя имеющиеся две группы данных, запишем уравнения для амплитуд магнитного поля  $\{H_m\}$  в каждой из точек измерения  $\{z_n\}$ ,  $n = 0, 1, \dots, N$ , вдоль оси  $Z$ :

$$\sum_{m=1}^M H_m A_m(z_n) = Z_n, \quad (4)$$

последовательностью  $\{Z_n\}$ , которой обозначена совокупность результатов измерения объемом  $N$ . В качестве решения будем рассматривать набор оценок значений величин  $\{H_m\}$ ,  $m = 0, 1, \dots, M$ . На основании известного метода наименьших квадратов [13] используем то решение системы (4), которое приближается к точному в смысле его наименьшего среднеквадратичного отклонения. В результате получаем искомое решение  $\{H_m\}$ . На рис. 8 приведен пример проведенного восстановления. Соответствующую производную  $\frac{\partial}{\partial z} f(z)$  амплитуды можно получить, опираясь на выражение (3).

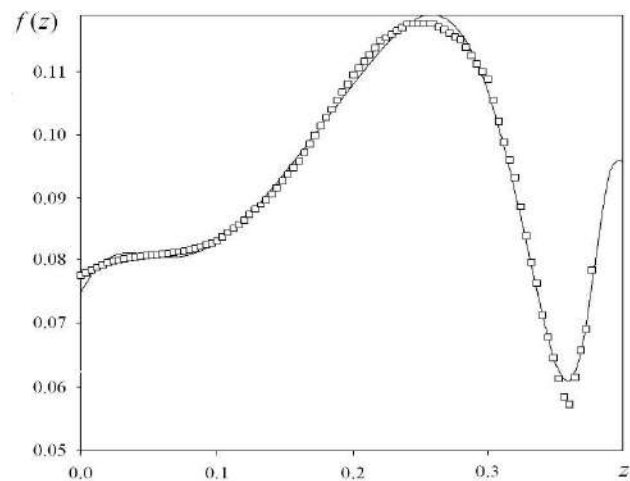


Рис. 8 – Пример экспериментальных данных (квадратики) и восстановленной аналитической функции  $f(z)$

Результатом рассматриваемой задачи Коши [13] будет являться траектория электрона (или пучок таких траекторий), отвечающий множеству начальных условий. Потребовав выполнения заданного условия (например, достижение радиальной компонентой  $r$  некоторого значения  $r_2$ ) можно получить необходимую информацию о результирующем пучке и изучить его свойства.

Численно проведено моделирование динамики движения совокупности электронов (количество частиц 1000) в магнитном поле соленоида. Фазовая карта  $(z, r)$  для выбранного электрона с  $r_0 = 0.020$  м,

энергией  $E = 30$  кэВ, которая была получена при распределении магнитного поля, показанного на рис. 3 (кривая 2) приведена на рис. 9.

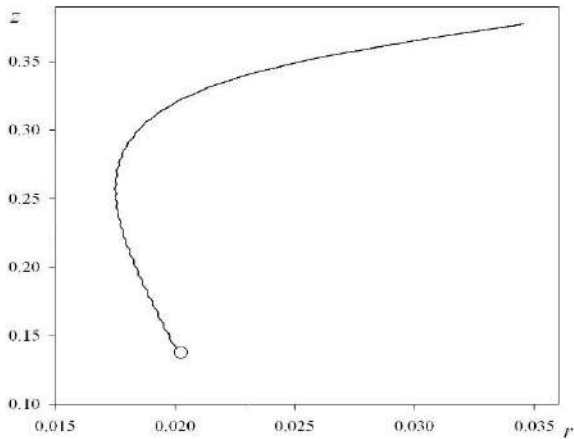


Рис. 9. Фазовая карта  $(z, r)$  для выбранной частицы

Пример траектории для одного выбранного электрона с теми же начальными условиями приведен на рис. 10, на котором также горизонтальной линией указан пороговый уровень  $r_U = 0.033$  м.

Начальные условия для электронов возможно варьировать, для приводимых результатов принималось: начальный радиус  $r_0 = 0.020$  м (радиус кольца эмиссии);  $\Delta r_0 = 0.001$  м;  $z_0 = 0.014$  м (место эмиссии по вертикали); координата  $z'_0$  определялась энергией частиц (в полученных зависимостях энергия  $E$  частиц равнялась 30...60 кэВ), при этом начальное распределение по азимуту  $\vartheta_0$  задавалось равномерным. Точность расчетов определялась количеством шагов в интегрирующем алгоритме Рунге – Кутты.

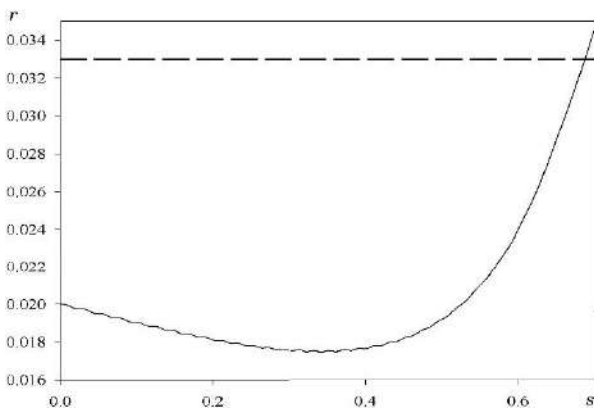
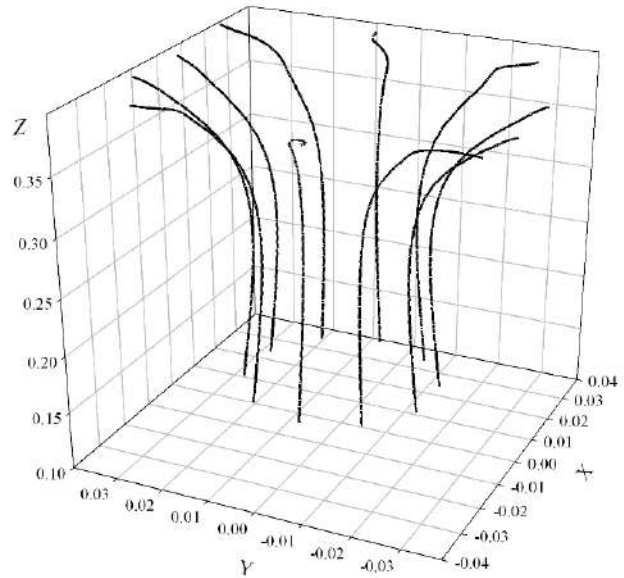
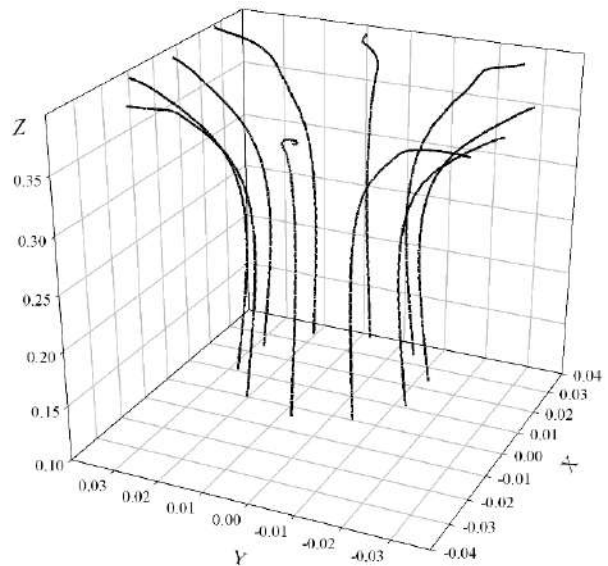


Рис. 10. Зависимость радиальной компоненты движения  $r(s)$  от пройденного пути  $s = ct$  для выбранной частицы

На рис. 11 приведено два семейства из 10 траекторий электронов,  $z_0 = 0.014$  м (ось  $Z$  – вертикальная), у которых начальный азимутальный угол равномерно распределен на  $(0, 2\pi)$ . Видно, что по мере движения в спадающем магнитном поле, электроны отклоняются от оси  $Z$ , при этом достигается заданный пороговый радиус  $r_U$ .



а



б

Рис. 11. Набор траекторий частиц (вид сбоку):  
а –  $E = 30$  кэВ; б –  $E = 40$  кэВ

На рис. 12 приведены расчетные гистограммы вертикальных значений  $G(z_U)$  при достижении электронами с энергией  $E = 40$  кэВ и  $E = 50$  кэВ радиального уровня  $r_U = 0.033$  м, которые были получены при распределении магнитного поля, показанного на рис. 3 (кривая 1). Видно, что поток электронов (объем выборки – 1000) попадает на вертикальный участок, протяженность которого  $\Delta z_U$  составляет доли миллиметра. Такая концентрация обусловлена исходным распределением по координате  $z$ , размеры которого (согласно постановке задачи) малы ( $\Delta z_0 = 0.001$  м). Также малыми были выбраны интервалы возможных значений в распределениях



исходного потока частиц по другим координатам (или равны нулю).

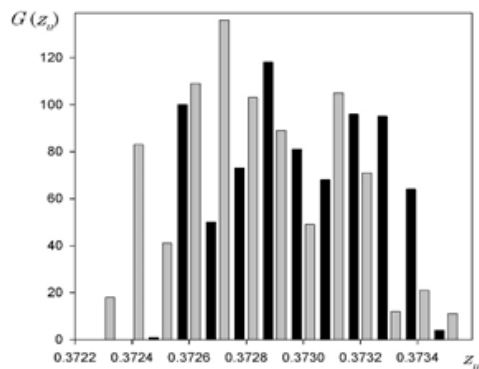


Рис. 12. Гистограммы  $G(z_U)$  вертикальных значений  $z_U$  электронного пучка при достижении ими радиуса  $r_U = 0.033$  м. Серые столбики –  $E = 50$  кэВ, черные –  $E = 40$  кэВ

Анализ движения потоков частиц с увеличенным фазовым объемом, в частности, с большим вертикальным размером  $\Delta z_0$  и большего разброса по импульсам  $p_{z0}$  и  $p_{r0}$  приводит к выводу о соответствующем увеличении вертикального участка  $\Delta z_U$ , на котором реализуется выполнение условия попадания на заданный радиус.

#### Выводы.

Проведенные исследования показали возможность устойчивого формирования радиального электронного пучка с энергией в десятки килоэлектронвольт в спадающем магнитном поле соленоида. Распределение тока пучка вдоль металлических колец и сам ток пучка в радиальном направлении зависит от амплитуды магнитного поля вдоль оси системы и градиента спада поля. Оптимизацией распределения магнитного поля (создаваемого соленоидом и кольцевыми магнитами) и его градиента спада можно добиться увеличения попадания электронов на одно кольцо (до  $\sim 72$  % тока пучка).

На основе математической модели движения электронного потока синтезировано программное средство, позволяющее получать и интерпретировать характеристики результирующих потоков. Рассмотрены различные конфигурации магнитного поля. Численно получены решения прямой задачи моделирования траекторий электронов. Экспериментально показано, что поток электронов попадает на вертикальный участок, длина которого порядка миллиметра для выбранных распределений продольного магнитного поля вдоль оси пушки и канала транспортировки. Полученные численные зависимости удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами для магнитного поля с большим градиентом спада.

Таким образом, изменяя амплитуду и распределение магнитного поля, можно регулировать ток в радиальном направлении вдоль длины трубы, и, следовательно, место электронного облучения. В дальнейшем необходимо провести исследование различных режимов работы магнетронной пушки при энергии электронов 100...120 кэВ и выбрать оптимальные

характеристики электронного облучения для обработки внутренних поверхностей трубчатых изделий.

#### Список литературы

1. Belugin V. M., Mischenko A. V., Pirozhenko V. M., Rozanov N. E., Zavadtsev A. A., Korolev A. N., Simonov K. G. Compact electron linacs for radiation technology systems. *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference*. 2001. Vol. 4. P. 2515–2517.
2. Довбня А. Н., Лавриненко С. Д., Закутин В. В. и др. Модификация поверхности циркония и сплава Zr 1% Nb электронным пучком ускорителя на основе магнетронной пушки *ВАНТ. Серия «Физика радиационного материаловедения»*. 2011, № 2(72), вып. 97. С. 39–45.
3. Быстров П. А., Розанов Н. Е. Методика и программа «Beap scanning» расчета процессов в системе развертки релятивистского электронного пучка с широким энергетическим спектром. *ВАНТ*, 2012, №4, вып. 87. С. 87–91.
4. Голковский М. Г., Корчагин А. И., Куksанов Н. К. и др. Перспектива применения электронно-лучевой технологии для повышения износостойкости боковой поверхности рельсов в действующем пути. *Сб. докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине* (г. Санкт-Петербург, 1–4 октября, 2001). М.: ЦНИИатоминформ, 2001. С. 393–396.
5. Глухих В. А., Печерский О. П., Яценко Б. И. Модификация поверхностных свойств материалов с помощью мощных импульсных электронных пучков. *Сб. докладов X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине* (г. Санкт-Петербург, 1–4 октября, 2001). М.: ЦНИИатоминформ, 2001. С. 445–447.
6. Saveliev Y. M., Sibbet W., Parkes D. M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source. *Review of Scientific Instruments*. 1999. Vol. 70, no. 12. P. 4502–4514.
7. Азарян Н. С., Баренгольд С. А., Доля С. Н., Месяц Г. А., Перельштейн Э. А. Азарян Н. С., Баренгольд С. А., Доля С. Н., Месяц Г. А., Перельштейн Э. А. Моделирование формирования электронного кольца с использованием пикосекундных электронных пучков в магнитной системе типа "кас". *Журнал технической физики*. 2010. Т. 80, вып. 4. С. 126–134.
8. Астрелин В. Т., Кандауров И. В., Свешников В. М. Численное моделирование транспортировки и сжатия электронного пучка сходящимся магнитным полем при его инжекции в многопробочную ловушку ГОЛ-3. *Успехи прикладной физики*. 2013. Т. 1, № 5. С. 580–585.
9. Тузиков А. В., Александров В. С., Шевцов В. Ф. Моделирование динамики пучка в магнитном поле спиральной катушки. *Письма в ЭЧАЯ*. 2006. Т. 3, №7 (136). С. 55–59.
10. Коваль Т. В., Офицеров В. В., Обухов Д. С., Марченко А. Л. Исследование самосогласованной динамики сильноточного электронного пучка в триодах с виртуальным катодом. *Вестник науки Сибири*. 2012. № 3, вып. 4. С. 16–23.
11. Волколупов Ю. Я., Довбня А. Н., Закутин В. В. и др. Формирование электронных пучков в магнетронном диоде с металлическим вторичноэмиссионным катодом. *Журнал технической физики*. 2001. Т. 71, вып. 2. С. 98–104.
12. Довбня А. Н., Закутин В. В., Решетняк Н. Г. и др. Исследование формирования пучка в ускорителе электронов с вторичноэмиссионным источником. *«Вісник Харківського університету», серія фізична «Ядра, частинки, поля»*. 2006. № 732, вып. 2(30). С. 96–100.
13. Маделунг Э. *Математический аппарат физики*. Москва: Физматгиз, 1961. 620 с.

#### References (transliterated)

1. Belugin V. M., Mischenko A. V., Pirozhenko V. M., Rozanov N. E., Zavadtsev A. A., Korolev A. N., Simonov K. G. Compact electron linacs for radiation technology systems. *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference*. 2001, vol. 4, pp. 2515–2517.
2. Dovbnya A. N., Lavrinenko S. D. and Zakutin V. V. Modifikaciya povirhnosti cirkonia i splava Zr1%Nb elektronnim puchkom uskoritelya na osnove magnetronnoy pushki [Modification of the surface of zirconium and Zr 1% Nb alloy by an electron accelerator beam based on a magnetron gun] *VANT. Ser.: Fizika radiacionnogo*

- materialovedeniya [VANT. Series "Physics of Radiation Material Science"]. 2011, vol. 2 (72), issue 97, pp. 39–45.
3. Bistrov P. A., Rozanov N. E. "Metodika i programma «Bean scanning» rascheta processov v sisteme razvertki relyativistskogo elektronogo puchka s shirokim energeticheskim spektrom". *VANT*, no. 4, issue 80. 2012. 87–91.
  4. Golkovski M. G., Korchagin A. I., Kuksanov K. Perspektiva primeneniya elektronno-luchevoy tehnologii dlya povysheniya iznosostoykosti bokovoy poverhnosti rel'sov v deystvuyutshem puti. [The prospect of using electron-beam technology to increase the wear resistance of the side surface of the rails in the operating track]. *Sb. dokladov X mezhdunarodnogo sovetshania po primineniju sarjazhennykh chastits v promishlennosti i medicine* [Collection of reports of the X International Meeting on the Application of Charged Particle Accelerators in Industry and Medicine] (s.Sankt-Peterburg, 1–4 oktober, 2001). Moscow: TsNIIatominform, 2001, pp. 93–396.
  5. Gluhih V. A., Pecherskiy O. P., Engel'ko V. I., Yatsenko B. I. Modifikatsiya poverhnostnykh svoystv materialov s pomotshyu motshnykh impul'snykh ustanovok [Modification of surface properties of materials using high-power pulsed electron beams]. *Sb. dokladov X mezhdunarodnogo sovetshania po primineniju sarjazhennykh chastits v promishlennosti i medicine* [Collection of reports of the X International Meeting on the Application of Charged Particle Accelerators in Industry and Medicine] (s.Sankt-Peterburg, 1–4 oktober, 2001). Moscow: TsNIIatominform, 2001, pp. 93–396.
  6. Saveliev Y. M., Sibbet W., Parkes D. M. Self-excitation and characteristics of the crossed-fields emission electron source. *Review of Scientific Instruments*. 1999. vol. 70, no. 12, pp. 4502–4514.
  7. Asaryan N. S., Barenko'ls S. A., Dolya S. N., Mesyats G. A., Perel'shteyn E. A. Modelirovaniye formirovaniya elektronogo kol'tsa s ispol'sovaniem pikosekundnykh elektronnykh puchkov v magnitnoy sisteme tipa "kasp" [Simulation of the formation of an electron ring using picosecond electron beams in a "cusp" magnetic system]. *Gurnal tehnicheckoy fiziki*. [Journal of Technical Physics], 2010, issue. 80, no. 4, pp. 126–134.
  8. Astrelin V.T., Kandaurov I.V., Sveshnikov V.M. Chislennoe modelirovaniye transportirovki i szhatiya elektronogo puchka shodyatshim magnitnym polem pri ego izzhekcii v mnogoprotochnuyu lovushku GOL-3 [Numerical simulation of the transport and compression of an electron beam by a converging magnetic field during its injection into a GOL-3 multi-mirror trap]. *Uspehi prikladnoy fiziki* [Advances in Applied Physics]. 2013, vol. 1, no. 5, pp. 580–585.
  9. Tusikov A.V., Aleksandrov V. S., Shevtsov V. F. Modelirovaniye dinaiki puchka v magnitnom pole spiral'no' katushki. [Simulation of beam dynamics in the magnetic field of a spiral coil]. *Pis'ma v EChAya* [The brief of ECAY]. 2006, vol. 3, no. 7 (136), pp. 55–59.
  10. Koval' T. V., Ofizerov V. V., Obuhov D. S., Marchenko A. L. Isslodovaniye samosoglasovannoi dinamiki sil'notochnogo elektronogo puchka v triodah s virtual'nym katodom [Study of the self-consistent dynamics of a high-current electron beam in triodes with a virtual cathode]. *Vestnik nauki Sibiri* [Siberian Science Bulletin]. 2012, issue 4, no. 3, pp. 16–23.
  11. Volkolupov Yu. Ya. Dovbnya A. N., Zakutin V. V. Generaciya elektronnykh puchkov v magnetronnom diode s metalicheskim vtorichniemissionnym katodom [Generation of electron beams in a magnetron diode with a metallic secondary-emission cathode]. *GTF*, 2001, issue 71, vol. 7, pp. 88–91.
  12. Dovbnya A. N., N. G. Reshetnyak and V. V. Zakutin. "Issledovaniye formirovaniya puchka v uskoritele elektronov s vtorichniemissionnim istochnikom." *Visnyk "HNU". Ser.: Yadra, chastinki, polya*. [Bulletin "HNU". Ser. "Nuclei, Particles, Fields"]. 2006, issue, 732, vol. 2(30), pp. 96–100.
  13. Madelung E. *Matematicheskii apparat fiziki* [Mathematical machine of physics]. Moscow, Fizmatgiz, 1961. 620 p.

Поступила (received) 05.10.2021

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

**Мазманішвили Александр Сергеевич** – доктор фізико-математических наук, професор, старший научний сотрудник ННЦ ХФТИ, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: [mazmanishvili@gmail.com](mailto:mazmanishvili@gmail.com)

**Решетняк Николай Григорьевич** – кандидат фізико-математических наук, старший научний сотрудник ННЦ ХФТИ, г. Харьков; Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: [nreshetnyak@kipt.kharkov.ua](mailto:nreshetnyak@kipt.kharkov.ua)

**Сидоренко Анна Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий НТУ «ХПИ», доцент кафедры моделирования систем и технологий ХНУ им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: [annsydorenko01@gmail.com](mailto:annsydorenko01@gmail.com)

**Мазманішвілі Олександр Сергійович** – доктор фізико-математических наук, професор, старший науковий співробітник ННЦ ХФТИ, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: [mazmanishvili@gmail.com](mailto:mazmanishvili@gmail.com)

**Решетняк Микола Григорійович** – кандидат фізико-математических наук, старший науковий співробітник ННЦ ХФТИ, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: [nreshetnyak@kipt.kharkov.ua](mailto:nreshetnyak@kipt.kharkov.ua)

**Сидоренко Ганна Юрїївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій НТУ «ХПІ», доцент кафедри моделювання систем і технологій ХНУ ім. В. Н. Каразіна, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: [annsydorenko01@gmail.com](mailto:annsydorenko01@gmail.com)

**Mazmanishvili Oleksandr Serhiyovych** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, senior staff scientist, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkov; Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: [mazmanishvili@gmail.com](mailto:mazmanishvili@gmail.com)

**Reshetnyak Nikolay Grigorievych** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, senior staff scientist, National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology", Kharkov; Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: [nreshetnyak@kipt.kharkov.ua](mailto:nreshetnyak@kipt.kharkov.ua)

**Sydorenko Ganna Yurijivna** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of analysis of systems and information-analytical technologies NTU "KhPI", Associate Professor at the Department of Modeling of systems and technologies KhNU by V. N. Karazin, Kharkov; Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: [annsydorenko01@gmail.com](mailto:annsydorenko01@gmail.com)

**B. R. LITVINOV, M. O. BILOVA**

## HUMAN BODY MODELING TECHNOLOGIES FOR E-COMMERCE SYSTEMS

Relevance of the research work is the analysis of the main features of 3D modeling for further implementation in e-commerce. Namely, the features of creating a human body 3D model with the ability to edit personal settings of individual parts of the body, as well as a basic set of clothes to provide a more realistic representation of the model. The features of the 3D model in general were considered in this article. The mathematical analysis of the 3D graphics rendering on the 2D monitor and the possibilities of control and editing of such models have been presented. The developed software product allows the user to create an anatomical three-dimensional model of the human body and then adjust it to his needs. The user can apply on created model variety of settings, namely more than 15 different views, with a full package of changes. It is possible to change the size, color of hair, eyebrows, eyes, face, body, legs. Also, the user is able to select the levels of skeletal frame views and additionally can select different backgrounds to provide a more realistic representation of the model in space. Additional functionality was implemented for more flexible configuration of the model's face. The user can pre-determine points to select directions or sizes of different parts of the face using settings, displayed on the mouse or touchpad control. After adjustments, the user is able to manage the clothes that he had saved in the shopping cart from the online store, from which he later proceeded to the online fitting. After the fitting the user can test the creation of animations in 360 degrees of free movement. Finally, the user can go to the store to pay for the items he left in the shopping cart. Developed software allows improving main metrics of the on-line stores, which has a positive impact on increasing the growth of earnings.

**Keywords:** 3D model; 3D graphics; anatomical model; online commerce; ReactJS; ThreeJS

**Б. Р. ЛІТВИНОВ, М. О. БІЛОВА**

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МОДЕЛЮВАННЯ ТІЛА ЛЮДИНИ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПОНЕНТУ ДЛЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ

Актуальність наукової роботи полягає в аналізі основних особливостей 3D-моделювання для подальшого впровадження в електронну комерцію, а саме особливостей побудови 3D моделі тіла людини з можливістю редагування персональних налаштувань окремих частин тіла, а також базового набору одягу для більш реалістичного представлення моделі. У роботі було розглянуто особливості 3D моделювання. Представлено математичний розбір рендеру 3D графіки на 2D моніторі, можливості управління та редагування таких моделей. Продемонстровано розроблений програмний продукт, що дозволяє користувачеві створити анатомічну 3D модель тіла людини та налаштувати її під свої потреби. Користувачу доступні понад 15 різних видів налаштувань з можливістю їх зміни. Користувач може встановлювати розмір, колір для волосся, брів, очей, обличчя, тіла, ніг. Також користувачеві надається можливість вибирати рівні відображення видів каркасів, різні фони для надання більш реалістичного відображення моделі в просторі. Додатковою функціональністю було реалізовано можливість гнучкішого налаштування обличчя моделі. Користувач може за задані точки вибирати напрями чи розміри частин обличчя, використовуючи мишку чи тачпад. Після завершення роботи з налаштуваннями користувач отримує можливість керувати одягом, який він зберіг у кошику інтернет-магазину, з якого він перейшов до онлайн примірки. Після примірки користувач може переглянути створені анімації, обертаючи модель на 360 градусів. Насамкінець користувач може повернутися до магазину для оплати товарів, які він залишив у кошику. Розроблене програмне забезпечення дозволяє покращити основні показники роботи інтернет-магазинів, що позитивно впливає на збільшення прибутку.

**Ключові слова:** 3D модель; тривимірна графіка; анатомічна модель; онлайн торгівля; ReactJS; ThreeJS

**Б. Р. ЛІТВИНОВ, М. А. БЕЛОВА**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПОНЕНТА ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

Актуальность научной работы заключается в анализе основных особенностей 3D-моделирования для последующего внедрения в электронную коммерцию, а именно особенностей построения 3D модели тела человека с возможностью редактирования персональных настроек отдельных частей тела, а также базового набора одежды для более реалистичного представления модели. В работе рассмотрены особенности 3D моделирования. Представлен математический разбор рендера 3D графики на 2D мониторе, возможности управления и редактирования таких моделей. Предемонстрирован разработанный программный продукт, позволяющий пользователю создать анатомическую 3D модель тела человека, впоследствии настроить ее под свои потребности. Пользователю доступно более 15 различных видов с возможностью их изменения. Пользователь может менять размер, цвет волос, бровей, глаз, лица, тела, ног. Так же пользователю предоставляется возможность выбирать уровни отображения видов каркасов, различные фоны для предоставления более реалистичного отображения модели в пространстве. Дополнительной функциональностью была реализована возможность более гибкой настройки лица модели: пользователь может по заранее заданным точкам выбирать направления или размеры тех или иных участков лица, используя мышь или тачпад. После завершения настроек пользователь получает возможность управлять одеждой, которую он сохранил в корзине интернет-магазина, из которого он перешел к онлайн примерке. После примерки пользователь может протестировать созданные анимации, поворачивая модель на 360 градусов. В конце пользователь может вернуться в магазин для оплаты товаров, которые он оставил в корзине. Разработанное программное обеспечение позволяет улучшить основные показатели работы интернет-магазинов, что положительно сказывается на увеличении роста доходов.

**Ключевые слова:** 3D модель; трехмерная графика; анатомическая модель; онлайн торговля; ReactJS; ThreeJS

**Introduction.** Every year the share of online commerce in the sales market is growing, which is accompanied by the opening of various online stores, digital marketplaces and small trading pages in social networks. In a highly competitive environment, the issue of isolation from competitors through the introduction of

the latest technology becomes relevant, which makes it necessary to develop and implement software that will allow the owners of web applications, including online stores, to attract more new customers, increase sales and thereby increase profits. The relevance of scientific work is that the previously created software solutions can not be

integrated in any form of e-commerce due to existing technical limitations at the time of development, such software solutions have no practical value. In consequence of this the question about improvement of 3D modeling process and further introduction of such models into e-commerce for attraction of new buyers for business becomes actual. The object of the study is the process of building a 3D model of the human body with the possibility of subsequent realistic imposition and product control on the model. The subject is the analysis of the construction basic features of a proportional human body three-dimensional model.

The ultimate goal of the work is to increase the effectiveness of online commerce, as well as attracting new customers through the development of algorithmic and software support for the construction of three-dimensional human model using three-dimensional computer graphics reproduction technology with subsequent business integration.

**Problem review.** Unlike usual two-dimensional graphics, the purpose of three-dimensional graphics is connected with the presentation of more accurate information about the producers' products. In addition, this type of graphics helps a customer to form a deeper understanding of a particular product, increases the user's confidence in the manufacturer and the chance that the customer will come back, which affects growth of sales. In modern IT industry, such an approach can be implemented on the basis of WebGL and ThreeJS technologies, which will allow the final models to integrate into web applications.

3D modeling as a direction of IT-industry is gaining momentum every year, which attracts new funding to this segment of the market. More and more companies, enterprises and businesses are beginning to implement 3D modeling as a technical tool to facilitate work and increase sales.

One such tool may be methods of computer design of clothing and textiles based on geometric models, taking into account the characteristics of the fabric [1]. It is also possible to integrate three-dimensional modeling with technologies such as Unity or other game engines based on genetic engineering ideas to create realistic models [2].

A very important place is taken by three-dimensional modeling in scientific research, one such study is the study of the cut of various fabrics, as well as studying the percentage of error between 2D and 3D methods of measuring models. Such research helps to reduce the percentage of defects in the final product and the probability of rejection by the final buyer, which brings an increase in the level of earnings for the business [3].

Three-dimensional graphics found its practical application in the study of wear and comfort of clothing in daily use, such research will help further to develop and create a new type of synthetic fabric, which will be ideally suited to man based on his physiological characteristics. This gives businesses the opportunity to enter and promote new markets that have not been exploited before [4].

A very promising bundle of technologies is Big Data and three-dimensional modeling, which allows to predict, what kind of clothes will be popular in a given

time period on a base of large amount of data. This combination of technologies has great power, especially for existing businesses, where based on the data you can be the first in your industry and raise your earnings levels [5].

Thus, three-dimensional modeling can have a big impact on e-commerce, which makes relevant the developing of the algorithmic and software support for its implementation.

#### **General theory of three-dimensional modeling.**

Three-dimensional modeling is the process of creating a three-dimensional model. Its main task is to show the visual volume of the created object [6]. There are several different options for creating such graphics: wireframe model, surface modeling and solid modeling. A wireframe model is a model that is fully described in terms of lines and points. The second modeling method is surface modeling, defined in terms of points, lines, and surfaces. A solid model is defined in terms of the three-dimensional volume that the body it calculates occupies.

Each of these options has its positive and negative sides, for example wireframe modeling is the easiest to perform, but has a large list of functionality limitations. In this research we use solid modeling, which is the most accurate, but difficult to perform. It gives the user wide range of possibilities for customization of his three-dimensional model, provides realistic graphics in comparison with other approaches.

#### **Algorithmic implementation of the 3D model mapping algorithm.**

The developed software product is based on ThreeJS technology, which in turn is based on WebGL. WebGL is a software library for JavaScript, which allows creating 3D graphics for Internet browsers. This library is based on the architecture of the OpenGL library.

There are two types of shaders (computer program originally used for shading in 3D scenes): a vertex shader is a program code, which is called for each vertex. It is used to transform the geometry from one place to another. Since the mesh consists of several triangles, and the surface of each of the triangles is called a fragment, there is a second shader. A fragment shader is a code that runs on all the pixels of each fragment. It is written to calculate and fill color of individual pixels.

A special programming language called GLSL [7] handles such shaders. Modeling graphics using Three.js is comparable to a movie set, since we have the ability to operate with concepts such as scene, light, camera, objects, and their materials.

Scene is the platform where all the objects we created are placed. Camera is the analog of the human eye pointed at the scene. The Camera captures and displays the objects in the scene. There are several types of camera in Three.js. The most common are the perspective camera and the orthographic camera. The camera perceives all objects in perspective projection [8].

Since we are wielding the concept of scene and camera in ThreeJS, we first need to break down the scene into separate fragments  $F$  for displaying on the user's screen. A fragment definition function, where  $(a, b, c)$  denotes level, row and column:

$$F = \left\{ \frac{10 \cdot 2^a \cdot b + c}{50 \cdot 4^{a-1} + 10 \cdot 2^a \cdot b + c} \right\}. \quad (1)$$

Next, it is important to mark the centers of the cameras and calculate the position of cameras for each of the fragments [9]. The level  $L$  of the required sector is calculated as the distance  $LR$  between the camera  $h$  and the position of the center  $z$  of the sector and radius  $R$

$$LR = \sqrt{(h_x - z_x)^2 + (h_y - z_y)^2 + (h_z - z_z)^2}, \quad (2)$$

$$L = \left[ \frac{\log\left(\frac{R}{LR}\right)}{\log 2} \right]. \quad (3)$$

To rotate model in 3D space we need to use matrices.

Rotation in 3D is specified by vector  $M$ , rotation angle and rotation axis  $alpha$ . Quaternions  $G$  provide a convenient mathematical notation of orientation of space and rotation of objects in that space [10]. Compared to Euler angles, quaternions allow combining rotations more easily, and avoiding the problem of not being able to rotate on an axis, regardless of the rotation made on other axes:

$$G = \left[ M \cdot \sin\left(\frac{alpha}{2}\right), \cos\left(\frac{alpha}{2}\right) \right]. \quad (4)$$

To get a mixture of matrix rotations, we need to get a rotation that is between quaternion  $G$  and quaternion multiplied by a scalar  $G'$  through operations on them, where  $(x, y, z, w)$  are coordinate axes of rotations, and  $(x', y', z', w')$  are the rotation angles of the axes:

$$G + G' = [x + x', y + y', z + z', w + w']. \quad (5)$$

$$G - G' = [x - x', y - y', z - z', w - w']. \quad (6)$$

To get a vector multiplied by a scalar  $G_s$  we need:

$$G_s = [xs, ys, zs, ws]. \quad (7)$$

Where  $(xs, ys, zs, ws)$  are those rotational coordinate axes multiplied by a scalar.

Multiplication by a scalar  $s$  has no effect on rotation.

The rotation of the three-dimensional quaternion vector  $M'$  is calculated as [11]:

$$M' = G \cdot m \cdot G^{-1}. \quad (8)$$

Vector is converted to a quaternion as:

$$G = [x, y, z, 0]. \quad (9)$$

The quaternion back to the vector as:

$$m = [x, y, z]. \quad (10)$$

One of the most useful operations is similar to the multiplication of two rotation matrices [12]. The final quaternion is a combination of rotations - first the object is

rotated by  $G$ , and then by  $G'$ . Where  $mm'$  is the vector product,  $m \cdot m'$  is the scalar product of vectors.

$$GG' = [mm' + wm' + w'm, ww' - m \cdot m']. \quad (11)$$

The rotation matrix is expressed in terms of quaternion components as follows:

$$\begin{bmatrix} 1 - 2(y^2 + z^2) & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & 1 - 2(x^2 + z^2) & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz - wx) & 1 - 2(x^2 + y^2) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Let's substitute the sine of half of the rotation angle from the previous formulas, where  $x = \sin\left(\frac{alpha}{2}\right)$ ,  $y = \sin\left(\frac{alpha}{2}\right)$ ,  $z = \sin\left(\frac{alpha}{2}\right)$ ,  $w = \cos\left(\frac{alpha}{2}\right)$ . Thus, a three-dimensional rotation with quaternions was implemented.

Next, we need to calculate the formula that will allow to add light to our scene that can be properly diffused over the dome [13].

$$I = k_a C I_a + k_j I_j \max(0, l, n) + k_s I_s \max(0, (n, h))^p, \quad (13)$$

where  $(k_a, k_j, k_s)$  are scalar coefficients.  $C$  is the color of the surface at a point.  $I_j$  is the color of the light source. Now the basic mathematical software is set up to get started creating three-dimensional models.

The activity diagram of the developed software for the 3D model creation is given on the fig. 1.

**Overview of system functionality.** The following will demonstrate the developed software that allows the end user to create a highly detailed three-dimensional model of a person, which will be used later to try on clothes from the online store where the user uses this application. To begin, the user must select one of the two genders. After that, the main window of interaction with the model opens in front of the user.

There are two main windows in the program: the setup window on the left and the model itself on the right. In the left window, the person can customize the model by himself or create various interesting variations of digital people for fun. Many combinations for customization, the results of all selected elements and colors the user will see immediately in the right window (fig. 2).

A wide range of customization is given to the user (fig. 3).

It is possible to configure each of the above items using responsible buttons and windows (fig. 4).

The user can move or rotate the 3D model using 360 degrees of free rotation around axis of coordinates. A method of zooming in and out of the camera for a better view of the model is also implemented. The user can save his model and give it a unique name. The number of the saved models in unlimited.

The software product was created as a means to increase sales and profits for the business, so it becomes necessary to evaluate the effectiveness of the web application before and after the implementation of the developed program. Statistics was measured by free analytical tool Google Analytics.

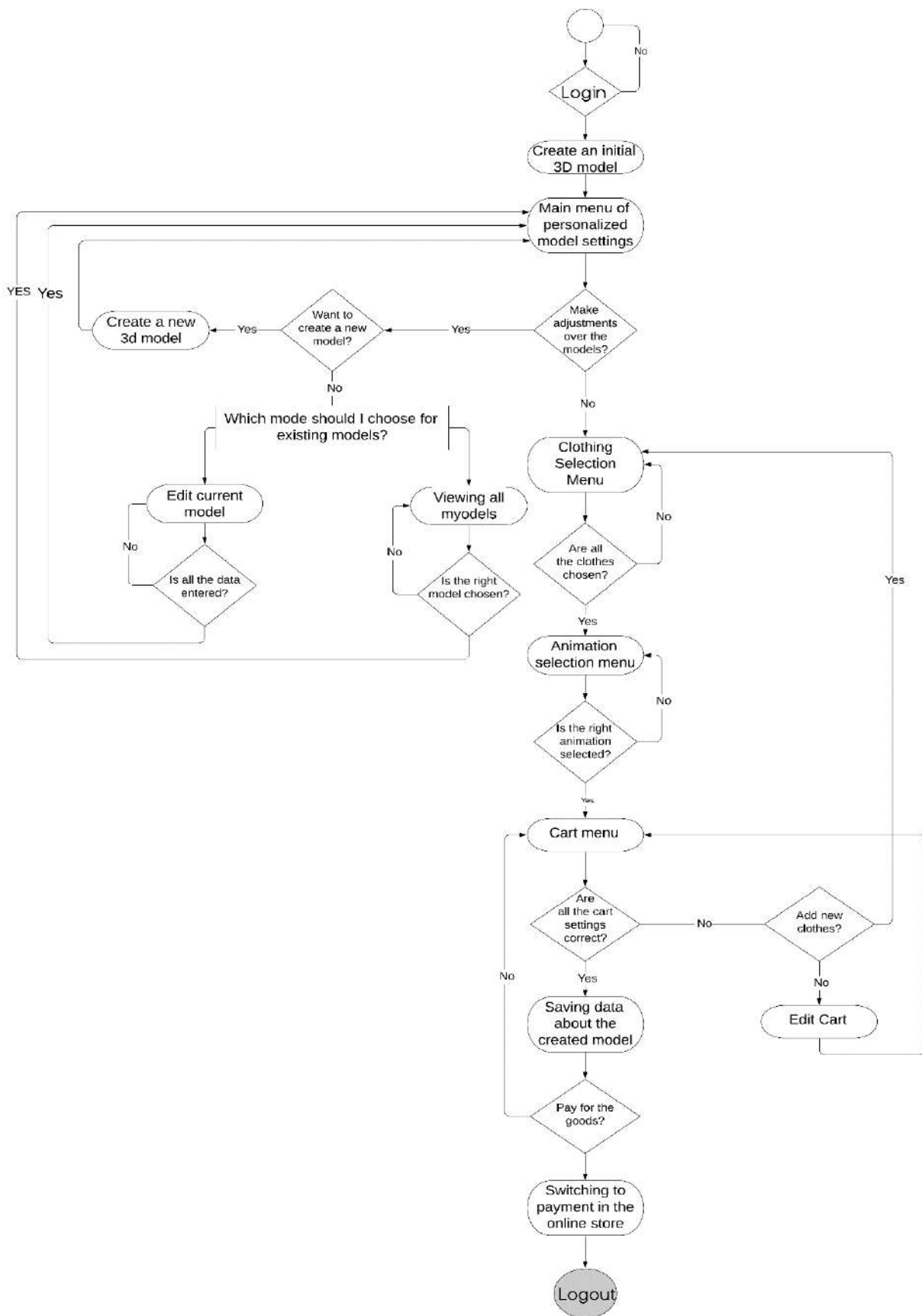


Fig. 1. Activity diagram of the developed software from the user's point of view



Fig. 2. Main interaction window

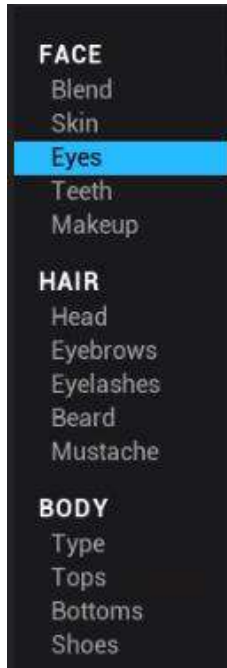


Fig. 3. Menu of customization



Fig. 4. Eye customization menu

This service has a large number of tools, but in this research, we took into account only the main ones. These are the number of unique users who visited the page during the week, the number of sessions during the same period, the percentage of users leaving the site, as well as the average duration of time spent on the site by each user (fig. 5).

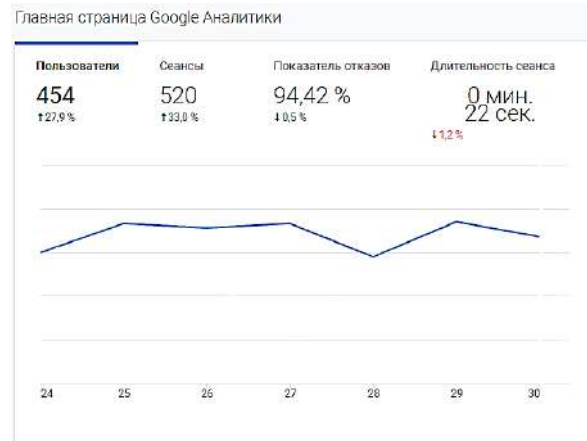


Fig. 5. Metrics before software implementation

After the software implementation on the selected site, two weeks later an active positive metrics growth began. The software product allowed in a short period to double the number of the site visitors, prolong the time spent on the site in seven times, which in combination has a positive impact on increasing the growth of earnings from the site (fig. 6).

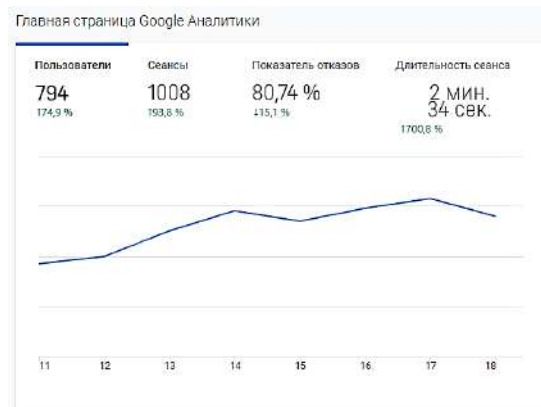


Fig. 6. Metrics before software implementation

**Conclusions.** On the base of technology for creating and editing 3D models, it was possible to develop software that will allow its implementation in e-commerce, thereby raising the levels of business earnings. In addition, such software product will allow separating the business from competitors at the expense of the modern technologies use. Such technological symbiosis will allow the market of e-commerce, namely, online stores to attract more customers that are new. Embedding this software on their pages via an API allows the end user to try clothes before ordering, which greatly increase the sales conversion rate and online traffic to the store page.

**References**

1. Simona J., Stjepanović Z., Rudolf A. 3D Virtual Prototyping of Garments: Approaches, Developments and Challenges. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*. 2017. № 10 (1). P. 51–63.
2. Zhu X., Rättsch M., Lu H. An interactive clothing design and personalized virtual display system. *Multimedia Tools and Applications*. 2018. № 77. P. 27163–27179.
3. Lage A., Ancutiene K. Virtual try-on technologies in the clothing industry: basic block pattern modification. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2019. № 31 (6). P. 51–63.

4. Ancutiene K. Simulation of mechanical behavior of fibrous materials using 3d virtual prototyping. *Proceedings IRF2020: 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure*. 2020. P. 77–78.
5. Liu Zh. L. S., Zhao X. Big data and digital design models for fashion design. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2021. № 16. P. 51–63
6. Leiming L., Wenyao Zh., Hongwei H. Multivisual Animation Character 3D Model Design Method Based on VR Technology. Hindawi Complexity. *Complexity Problems Handled by Advanced Computer Simulation Technology in Smart Cities*. 2021. № 2021. Available at <https://doi.org/10.1155/2021/9988803> (access date: 23.10.2021).
7. Abrash M. *Graphics Programming Black Book*. Coriolis Group, 2002. 1342 p.
8. Мацуда К., Ли П. *WebGL: программирование трехмерной графики*. М., ДМК Пресс, 2019. 493 с.
9. Arshad M. R., Manaf A., Yoon K. H. Physical Rigging Procedures Based on Character Type and Design in 3D Animation. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. № 8(3). P. 4138–4147.
10. Pettineo M. *Using Bindless Resources with DirectX Raytracing*. Available at [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4842-7185-8\\_17](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4842-7185-8_17) (access date: 24.10.2021).
11. Гайдук С. А. *OpenGL. Профессиональное программирование трехмерной графики на C++*. БХВ-Петербург, 2004. 736 с.
12. Jason L. McKesson Learning Modern 3D Graphics Programming. Arcsynthesis.org, 2012. 316 p.
13. Боресков А. В., Харламов А. А. *Основы работы с технологией CUDA*. Москва, ДМК Пресс, 2016. 230 с.
3. Lage A., Ancutiene K. Virtual try-on technologies in the clothing industry: basic block pattern modification. *International Journal of Clothing Science and Technology*. 2019. no 31 (6). pp. 51–63.
4. Ancutiene K. Simulation of mechanical behavior of fibrous materials using 3d virtual prototyping. *Proceedings IRF2020: 7th International Conference Integrity-Reliability-Failure*. 2020. pp. 77–78.
5. Liu Zh. L. S., Zhao X. Big data and digital design models for fashion design. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2021. no 16. pp. 51–63
6. Leiming L., Wenyao Zh., Hongwei H. Multivisual Animation Character 3D Model Design Method Based on VR Technology. Hindawi Complexity. *Complexity Problems Handled by Advanced Computer Simulation Technology in Smart Cities*. 2021. no 2021. Available at <https://doi.org/10.1155/2021/9988803> (access date: 23.10.2021).
7. Abrash M. *Graphics Programming Black Book*. Coriolis Group, 2002. 1342 p.
8. Matsuda K., Li P. *WebGL: programmirovaniye trekhmeroy grafiki [WebGL: 3D graphics programming]*. М., ДМК Пресс, 2019. 493 p.
9. Arshad M. R., Manaf A., Yoon K. H. Physical Rigging Procedures Based on Character Type and Design in 3D Animation. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. no 8(3). pp. 4138–4147.
10. Pettineo M. *Using Bindless Resources with DirectX Raytracing*. Available at [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4842-7185-8\\_17](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4842-7185-8_17) (access date: 24.10.2021).
11. Gaydukov S. A. *OpenGL. Professional'noye programmirovaniye trekhmeroy grafiki na C++ [Professional 3D graphics programming using C++]*. BKHV-Peterburg, 2004. 736 p.
13. Boreskov A. V., Kharlamov A. A. *Osnovy raboty s tekhnologiyey CUDA [Basics of working with CUDA technology]*. М., ДМК Пресс, 2016. 230 p.

#### References (transliterated)

1. Simona J., Stjepanović Z., Rudolf A. 3D Virtual Prototyping of Garments: Approaches, Developments and Challenges. *Journal of Fiber Bioengineering and Informatics*. 2017. no 10 (1). pp. 51–63.
2. Zhu X., Rättsch M., Lu H. An interactive clothing design and personalized virtual display system. *Multimedia Tools and Applications*. 2018. no 77. pp. 27163–27179.

Received 13.10.2021

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

**Литвінов Богдан Русланович** – бакалавр технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра програмної інженерії та інформаційних технологій управління, студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5280-3938>; e-mail: [beatsbydoctordre1@gmail.com](mailto:beatsbydoctordre1@gmail.com)

**Блова Марія Олексіївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)

**Литвинов Богдан Русланович** – бакалавр технических наук, студент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», кафедра программной инженерии и информационных технологий управления, студент; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5280-3938>; e-mail: [beatsbydoctordre1@gmail.com](mailto:beatsbydoctordre1@gmail.com)

**Белова Мария Алексеевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)

**Litvinov Bogdan Ruslanovich** – Bachelor of Technical Sciences, Student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Department of Software Engineering and Management Information Technologies, student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5280-3938>; e-mail: [beatsbydoctordre1@gmail.com](mailto:beatsbydoctordre1@gmail.com)

**Bilova Mariia Oleksiivna** – PhD, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)



*С. Ф. ЧАЛИЙ, В. О. ЛЕЩИНСЬКИЙ, І. О. ЛЕЩИНСЬКА*

### **КОНТРАФАКТУАЛЬНА ТЕМПОРАЛЬНА МОДЕЛЬ ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВИХ ЗВ'ЯЗКІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ПОЯСНЕНЬ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ**

Предметом дослідження є процеси побудови пояснень на основі причинно-наслідкових зв'язків між станами або діями інтелектуальної системи. Пояснення представляє собою знання про послідовність причин та наслідків, які визначають процес та результат роботи інтелектуальної інформаційної системи. Мета роботи полягає в розробці контрфактуальної темпоральної моделі причинно-наслідкових зв'язків у складі пояснення процесу функціонування інтелектуальної системи з тим, щоб забезпечити виявлення каузальних залежностей на основі аналізу журналів поведінки такої системи. Для досягнення сформульованої мети вирішуються такі задачі: визначення темпоральних властивостей контрфактуального опису причинно-наслідкових зв'язків між діями або станами інтелектуальної інформаційної системи; розробка темпоральної моделі каузальних зв'язків, що враховує як факти виникнення подій в інтелектуальній системі, так і можливість виникнення подій, що не впливають на формування поточного рішення. Висновки. Виконано структурування темпоральних властивостей каузальних зв'язків для пар подій, які виникають послідовно в часі, або мають проміжні події. Такі зв'язки представлено альтернативними причинно-наслідковими зв'язками з використанням темпоральних операторів «Next» та «Future», що дає можливість реалізувати контрфактуальний підхід до представлення причинності. Запропоновано контрфактуальну темпоральну модель причинно-наслідкових зв'язків, яка визначає детерміновані каузальні зв'язки для пар послідовних подій та пар подій, між якими є інші події, що визначає властивість транзитивності таких залежностей і, відповідно, створює умови для опису послідовності причин та наслідків у складі пояснення в інтелектуальній системі з заданим ступенем деталізації. Модель забезпечує можливість визначення причинно-наслідкових зв'язків, між якими є проміжні події, які не впливають на кінцевий результат роботи інтелектуальної інформаційної системи.

**Ключові слова:** пояснення; інтелектуальна інформаційна система; темпоральні правила; каузальність, причинно-наслідкові зв'язки.

*С. Ф. ЧАЛЫЙ, В. А. ЛЕЩИНСКИЙ, И. А. ЛЕЩИНСКАЯ*

### **КОНТРАФАКТУАЛЬНАЯ ТЕМПОРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЯСНЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

Предметом исследования являются процессы построения объяснений на основе причинно-следственных связей между состояниями или действиями интеллектуальной системы. Объяснение представляет собой знания о последовательности причин и следствий, определяющих процесс и результат работы интеллектуальной информационной системы. Цель работы состоит в разработке контрфактуальной темпоральной модели причинно-следственных связей в составе разъяснения процесса функционирования интеллектуальной системы с тем, чтобы обеспечить выявление каузальных зависимостей на основе анализа журналов поведения такой системы. Для достижения сформулированных целей решаются следующие задачи: определение темпоральных свойств контрфактуального описания причинно-следственных связей между действиями или состояниями интеллектуальной информационной системы; разработка темпоральной модели каузальных связей, учитывающей как факты возникновения событий в интеллектуальной системе, так и возможность возникновения событий, не влияющих на формирование текущего решения. Выводы. Выполнена структуризация темпоральных свойств каузальных связей для пар событий, которые возникают последовательно во времени или имеют промежуточные события. Такие связи представлены альтернативными причинно-следственными отношениями с использованием темпоральных операторов «Next» и «Future», что позволяет реализовать контрфактуальный подход к представлению причинности. Предложена контрфактуальная темпоральная модель причинно-следственных связей, которая определяет детерминированные каузальные связи для пар последовательных событий и пар событий, между которыми есть другие события, что определяет свойство транзитивности таких зависимостей и, соответственно, создает условия для описания последовательности причин и следствий в составе объяснения в интеллектуальной системе с заданной степенью детализации. Модель обеспечивает возможность определения причинно-следственных связей, между которыми есть промежуточные события, не влияющие на конечный результат работы интеллектуальной информационной системы.

**Ключевые слова:** объяснение; интеллектуальная информационная система; темпоральное правило; каузальность, причинно-следственная связь.

*S. CHALYI, V. LESHCHYNSKYI, I. LESHCHYNSKA*

### **COUNTERFACTUAL TEMPORAL MODEL OF CAUSAL RELATIONSHIPS FOR CONSTRUCTING EXPLANATIONS IN INTELLIGENT SYSTEMS**

The subject of the research is the processes of constructing explanations based on causal relationships between states or actions of an intellectual system. An explanation is knowledge about the sequence of causes and effects that determine the process and result of an intelligent information system. The aim of the work is to develop a counterfactual temporal model of cause-and-effect relationships as part of an explanation of the process of functioning of an intelligent system in order to ensure the identification of causal dependencies based on the analysis of the logs of the behavior of such a system. To achieve the stated goals, the following tasks are solved: determination of the temporal properties of the counterfactual description of cause-and-effect relationships between actions or states of an intelligent information system; development of a temporal model of causal connections, taking into account both the facts of occurrence of events in the intellectual system, and the possibility of occurrence of events that do not affect the formation of the current decision. Conclusions. The structuring of the temporal properties of causal links for pairs of events that occur sequentially in time or have intermediate events is performed. Such relationships are represented by alternative causal relationships using the temporal operators "Next" and "Future", which allows realizing a counterfactual approach to the representation of causality. A counterfactual temporal model of causal relationships is proposed, which determines deterministic causal relationships for pairs of consecutive events and pairs of events between which there are other events, which determines the transitivity property of such dependencies and, accordingly, creates conditions for describing the sequence of causes and effects as part of the explanation in intelligent system with a given degree of detail. The model provides the ability to determine cause-and-effect relationships, between which there are intermediate events that do not affect the final result of the intelligent information system.

**Keywords:** explanation; intelligent information system; temporal rules; causality, cause-and-effect relationships.

**Вступ.** Сучасні інтелектуальні технології та системи застосовують методи обчислювального інтелекту для вирішення складних задач, що містять невідомості або є стохастичними за своєю природою.

Використання таких методів передбачає навчання моделей, що забезпечують подальшу підтримку процесу формування рішень в інтелектуальній системі. Для навчання використовують набори вхідних даних, що характеризують предметну область та процеси вирішення відповідних завдань для користувача [1].

Однак, внаслідок особливостей процесу машинного навчання, алгоритм прийняття рішень при використанні навчених моделей зазвичай не є зрозумілим для користувача. Усунення даної невідповідності потребує додаткового використання пояснень щодо причинно-наслідкових зв'язків між діями інтелектуальної системи, які й призвели до представленого рішення. Використання пояснень дає можливість обґрунтувати отримане інтелектуальною системою рішення на основі представлення причин як рішення в цілому, так і окремих дій з його досягнення, а також його переваг та недоліків. Тому пояснення створює підґрунтя для розуміння користувачем наслідків використання отриманого рішення [2].

В цілому, пояснення дає можливість користувачеві зрозуміти процес отримання рішення та його переваги через представлену інформацію щодо каузальних зв'язків між сутностями предметної області, а також між діями із його досягнення. Це забезпечує користувачеві можливість обґрунтованого застосування сформованого рішення, або ж відмови від запропонованих інтелектуальною системою рекомендацій [3, 4]. Наприклад, пояснення щодо популярності запропонованих предметів в системах електронної комерції дає можливість користувачеві спростити вибір цільового товару або послуги серед широкого спектру аналогічних товарів. Тобто пояснення обґрунтовує причину вибору певного предмету через сукупність таких його важливих для використання характеристик, які призводять до популярності цього товару у інших споживачів [4].

Таким чином, побудова пояснень в інтелектуальних системах базується на визначенні підмножини актуальних у процесі прийняття рішення причинно-наслідкових залежностей в рамках множини можливих каузальних зв'язків. Отримані ланцюжки з причин та їх наслідків дають можливість обґрунтувати послідовність кроків прийняття рішення, починаючи з вводу та обробки вхідних даних, й до формування кінцевого результату, який є суттєвим для вирішення задач користувача. Представлення каузального ланцюжка може бути виконано з різним ступенем деталізації причин і наслідків, що дає можливість однотипним чином надати пояснення як для процесу прийняття рішень, так і для сформованої інтелектуальною системою рекомендації.

Пояснення відображає послідовність станів або дій з прийняття рішення у часі, тому ключовий елемент пояснення, множина каузальних залежностей, характеризується темпоральною асиметричністю [5]. Тобто кожна пара подій (причина, наслідок) є строго упорядкованою у часі. Однак упорядкованість у часі для декількох пар подій не завжди є строгою. Причина такої властивості полягає в тому, що процес прийняття рішення може бути описаний різними

підмножинами причинно-наслідкових залежностей. Також слід враховувати варіативність самого процесу отримання рішення. Тому пояснення має наводити відмінності альтернативних каузальних залежностей: як фактичної, так і тих, що не можуть бути реалізовані у поточному процесі прийняття рішення, оскільки лише одна з можливих залежностей відображає фактичну послідовність дій з отримання результату в інтелектуальній системі.

Представлення каузальності з урахуванням розглянутої особливості реалізовано в рамках контрфактуального аналізу. Згідно даного підходу, причинно-наслідковий зв'язок між двома подіями існує лише в тому випадку, коли друга подія завжди виникає після виникнення першої, і є відсутнім в тому випадку, якщо перша подія не існує [6]. Відмінність між фактичними і потенційними каузальними зв'язками з урахуванням нестрогої упорядкованості у часі каузальних залежностей із різних альтернатив потребує урахування аспекту часу виникнення фактичних подій, які відображають послідовність прийняття рішення.

Зазначене свідчить про актуальність проблеми формалізації каузальних залежностей для відображення процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі з урахуванням множини можливих потенційних альтернатив, а також змін причинно-наслідкових залежностей з часом. Темпоральна формалізація причинно-наслідкових зв'язків дає можливість побудувати динамічні пояснення, які відображають поточний процес прийняття рішення в інтелектуальній системі у вигляді послідовності каузальних залежностей із заданим ступенем деталізації. Використання таких пояснень забезпечує умови для підвищення довіри користувача до запропонованих інтелектуальною системою рішень та, відповідно, підвищення ефективності використання останніх.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Традиційний підхід до представлення пояснень, який передбачає опис процесу роботи експертної системи шляхом інтерпретації причинно-наслідкових залежностей у формі правил, наведено в роботі [3]. Контрфактуальний аналіз причинно-наслідкових залежностей був представлений в роботах [5, 6] та уточнений і доповнений ймовірнісними можливостями, а також врахуванням ланцюжків подій в роботі [7]. Ключова ідея аналізу полягає у визначенні каузальності не лише на основі послідовності фактичних подій, але й з врахуванням контрфактуальних послідовностей, які потенційно можуть бути істинними, але не є реалізованими по факту. На сьогодні даний підхід є базовим при формалізації каузальності, однак він має ряд недоліків. Зокрема, не завжди вирішується питання транзитивності каузальних зв'язків, а також питання випередження причин, що не дає можливість однозначно описати причини відповідних подій. Підхід до вирішення даного питання на основі врахування аспектів подій було запропоновано в роботах [8, 9]. Головна ідея аспектного підходу полягає у співставленні аспектів подій для визначення каузальних зв'язків між ними. Подальший розвиток контрфактуального аналізу каузальності пов'язаний із

роботами [10–12], в яких запропоновано визначати каузальні зв'язки з використанням фреймворку структурних рівнянь (SEF). Такі залежності задаються на основі направленої графу, вершинами якого є змінні, що відповідають причинам або наслідкам, а дугами – відношення між цими змінними. Виділяються екзогенні та ендогенні змінні. Перші визначаються зовнішніми факторами, а другі відношенням між змінними. Значення змінних визначають контекст причинно-наслідкових залежностей. Однак структурні рівняння не враховують темпоральний фактор. В той же час, дослідження в сфері сприйняття інформації людьми [13] показали, що при описі послідовності подій важливо враховувати час їх виникнення, оскільки попередні події вважаються більш значимими порівняно з наступними подіями.

Темпоральний аспект пояснень розглядається в роботах [14–17]. В роботах [14, 15] представлено підходи до побудови пояснень з використанням темпоральних правил, що базуються на операторах темпоральної логіки. В роботах [16, 17] запропоновано модель та принципи використання причинно-наслідкових залежностей для побудови пояснень з урахуванням темпоральних зв'язків між фактами. Однак контрфактуальний опис каузальності, з можливими альтернативами причин та наслідків, потребує подальших досліджень.

Таким чином, існуючі можливості контрфактуального підходу до опису каузальності дають можливість сформулювати альтернативні варіанти пояснень, однак не приділяють уваги суттєвому для сприйняття пояснень користувачем темпоральному аспекту. Зазначене свідчить про важливість формалізації причинно-наслідкових залежностей з використанням темпоральних операторів.

**Метою цієї статті** є розробка темпоральної моделі причинно-наслідкових зв'язків у складі пояснення процесу функціонування інтелектуальної системи з тим, щоб забезпечити виявлення каузальних залежностей на основі аналізу журналів поведінки такої системи.

Для досягнення сформульованої мети вирішуються такі задачі:

- визначення темпоральних властивостей контрфактуального опису причинно-наслідкових зв'язків між діями або станами інтелектуальної інформаційної системи;

- розробка темпоральної моделі каузальних зв'язків, що враховує як факти виникнення подій в інтелектуальній системі, так і можливість виникнення подій, що не впливають на формування поточного рішення.

**Темпоральні властивості каузальних зв'язків в рамках контрфактуального аналізу причинності.**

Структуризацію темпоральних властивостей причинності проведемо для пари подій, які виникли послідовно в часі, або мають проміжні події.

Нехай існує множина упорядкованих у часі послідовностей подій  $E = \{E_i\}$ , які відображають послідовність прийняття рішення в інтелектуальній системі. Кожна з цих послідовностей подій може мати

вигляд (1) або (2), тобто складатись із пар подій  $e_{i,j}$ ,  $e_{i,k}$ , між якими можуть виникати інші події:

$$E_i^{(1)} = \langle e_{i,1}, \dots, e_{i,j}, e_{i,k}, \dots \rangle, \quad (1)$$

$$E_i^{(2)} = \langle e_{i,1}, \dots, e_{i,j}, \dots, e_{i,m}, \dots, e_{i,k}, \dots \rangle. \quad (2)$$

У послідовності  $E_i^{(1)}$  зв'язок між подіями  $e_{i,j}$ ,  $e_{i,k}$  представлено явно, а у  $E_i^{(2)}$  – опосередковано, оскільки між ними існує щонайменше одна інша подія. Тоді, згідно контрфактуального підходу, між подіями  $e_{i,j}$  та  $e_{i,k}$  у послідовності  $E_i^{(1)}$  існує каузальний зв'язок, якщо виконується умова:

$$(\forall i) e_{i,j} X e_{i,k}, \quad (3)$$

де  $X$  – темпоральний оператор типу «Next», який визначає, що безпосередньо за подією  $e_{i,j}$  виникає подія  $e_{i,k}$ .

Для послідовності  $E_i^{(2)}$  умова каузальності за контрфактуальним підходом має вигляд:

$$(\forall i) e_{i,j} F e_{i,k}, \quad (4)$$

де  $F$  – темпоральний оператор типу «Future», який визначає, що через деякий час за подією  $e_{i,j}$  виникає подія  $e_{i,k}$ .

Необхідною умовою каузальності у відповідності до (3) є виникнення події  $e_{i,k}$  безпосередньо за подією  $e_{i,j}$  на всіх послідовностях  $E_i^{(1)}$ , які описують можливі варіанти поведінки інтелектуальної системи.

Умова каузальності (4) встановлює, що подія  $e_{i,k}$  виникає після події  $e_{i,j}$  на всіх послідовностях  $E_i^{(2)}$  через одну або декілька проміжних подій  $e_{i,m}$ . За даною умовою, каузальний зв'язок між подіями  $e_{i,j}$  та  $e_{i,k}$  об'єднує декілька проміжних каузальних залежностей типу «Next»:

$$e_{i,j} F e_{i,k} \equiv e_{i,j} N \dots N e_{i,m} N \dots N e_{i,k}. \quad (5)$$

Тобто з використанням темпоральних операторів може бути отриманий ланцюжок подій, за допомогою якого було запропоновано представляти контрфактуальну каузальність у роботі [7].

Таким чином, представлення каузальності в рамках контрфактуального підходу з урахуванням темпорального аспекту (3) дає можливість визначити детерміновані причинно-наслідкові залежності для пари послідовних у часі подій. Представлення каузального

зв'язку (4) дає можливість визначити ланцюжок детермінованих причинно-наслідкових залежностей, який описує фрагмент процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі. Такий фрагмент є спільним для всіх можливих реалізацій даного процесу.

#### Контрфактуальна темпоральна модель каузальних зв'язків.

Узагальнене представлення каузальності  $C$  у темпоральному аспекті на множині послідовностей подій  $E = \{E_i\}$  містить множину каузальних залежностей  $c_k^j$ , так що кожна залежність задається для пари подій  $(e_{i,j}, e_{i,k})$ , що виникли на всіх послідовностях із множини  $E$ :

$$C = \{c_k^j : (\forall i) \exists (e_{i,j}, e_{i,k})\}. \quad (6)$$

Кожна каузальна залежність  $c_k^j$  поєднує представлення (3) та (4):

$$c_k^j = \begin{cases} \text{true, if } (\forall i) \exists e_{i,j} : \\ (e_{i,j} E e_{i,k}) \vee (e_{i,j} F e_{i,k}), \\ \text{false, otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

Вираз (7) визначає такі причинно-наслідкові зв'язки між подіями  $e_{i,j}$  та  $e_{i,k}$ , які реалізуються для всіх можливих послідовностей  $E_i$  прийняття рішень в інтелектуальній системі. Тому множина каузальних залежностей (6) задає «скелет» процесу прийняття рішення та може розглядатись як множина обмежень на можливі послідовності дій в інтелектуальній системі. Зазначене підтверджує детермінований характер каузальних залежностей  $c_k^j$ .

Представлення каузальних зв'язків на основі комбінації темпоральних операторів «Next» та «Future» дає можливість обґрунтувати властивість транзитивності каузальності в рамках контрфактуального підходу.

Проблема транзитивності у контрфактуальному представленні виникає внаслідок того, що не всі пари подій у визначеному ланцюжку містять каузальні зв'язки. Деякі події є проміжними і не впливають на ланцюжок причинно-наслідкових зв'язків. Класичний приклад недостатніх можливостей контрфактуального підходу щодо обґрунтування транзитивності каузальних зв'язків наведено в роботі [18]. У даному прикладі розглядається послідовність подій, що привела до підпалення від вогнища легкозаймистих предметів.

Така послідовність містить події: палаюче вогнище (1); внесення солі калію до вогнища (2); колір вогнища змінюється на фіолетовий (3); вогнище підпалює сусідні легкозаймисті предмети (4). Однак візуальна причина: зміна кольору вогнища не є причиною підпалу. Тобто порушується ланцюжок каузальних зв'язків і, відповідно, властивість транзи-

тивності для причинно-наслідкових залежностей, що складають даний ланцюжок. Для вирішення даної проблеми опису властивості транзитивності каузальних залежностей в роботах [9, 10] запропоновано враховувати різні аспекти вказаних подій. Тобто невідповідність аспектів 3-ї (зміна кольору вогнища) та 4-ї події (підпалення предметів) приводить до невірної визначення каузальності.

Запропонований темпоральний опис дає можливість обґрунтувати транзитивність таких залежностей за рахунок комбінування каузальних зв'язків, заданих за допомогою темпоральних операторів «Next» та «Future». Перший оператор визначає безпосередню каузальну залежність між двома подіями, а другий дає можливість «пропускати» події, які не є суттєвими для відображення каузальних зв'язків.

Розглянемо обґрунтування транзитивності каузальних зв'язків з урахуванням відмінності у їх представленні.

У відповідності до визначення темпорального оператора «Future», для довільної пари подій  $(e_{i,j}, e_{i,k})$ , таких що  $c_k^j = e_{i,j} F e_{i,k}$ , мають місце проміжні каузальні зв'язки  $e_{i,j} N e_{i,m}$ ,  $e_{i,m} N e_{i,k}$  типу (3), а також  $e_{i,m} F e_{i,k}$  або  $e_{i,j} F e_{i,m}$  типу (4) для кожної проміжної події  $e_{i,m}$ :

$$\begin{aligned} & (\forall c_k^j = e_{i,j} F e_{i,k}) \exists e_{i,m} : \\ & : (e_{i,j} N e_{i,m} F e_{i,k}) \vee (e_{i,j} F e_{i,m} N e_{i,k}) \vee \\ & \vee (e_{i,j} N e_{i,m} N e_{i,k}). \end{aligned} \quad (8)$$

Графічне представлення виразу (8) при деталізації каузальної залежності у вигляді  $e_{i,j} N e_{i,m} F e_{i,k}$ ,  $e_{i,j} F e_{i,m} N e_{i,k}$  та  $e_{i,j} N e_{i,m} N e_{i,k}$  наведено на рис. 1, рис. 2 та рис. 3 відповідно.

Наведена деталізація  $c_k^j = e_{i,j} F e_{i,k}$  через пару залежностей  $c_{j,m} = e_{i,j} N e_{i,m}$  та  $c_{m,k} = e_{i,m} N e_{i,k}$  типу «Next» безпосередньо свідчить про властивість транзитивності (рис. 1):

$$c_m^j \wedge c_k^m \Rightarrow c_k^j. \quad (9)$$

Аналогічно, деталізація  $c_k^j$  через залежності  $c_m^j = e_{i,j} N e_{i,m}$  та  $c_k^m = e_{i,m} F e_{i,k}$  або  $c_m^j = e_{i,j} F e_{i,m}$  та  $c_k^m = e_{i,m} N e_{i,k}$  не лише відображає властивість транзитивності, але й забезпечує можливість подальшої деталізації ланцюжка подій (рис. 2, рис. 3).

Тоді у випадку відсутності каузальних зв'язків згідно прикладу [19] достатньо задати каузальну залежність типу «Future», що дає можливість не визначати зв'язок для подій (3) та (4).

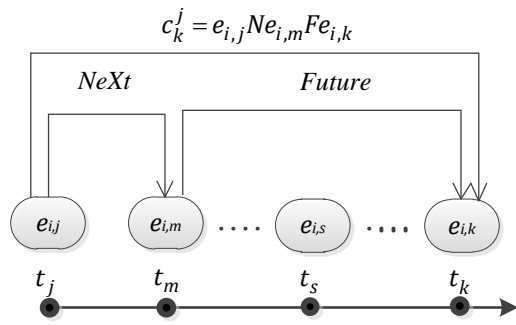


Рис. 1. Зв'язок з проміжною подією  $e_{i,m}$  для каузальної залежності, представлені оператором «Future», та деталізованої у вигляді  $e_{i,j}Ne_{i,m}Fe_{i,k}$

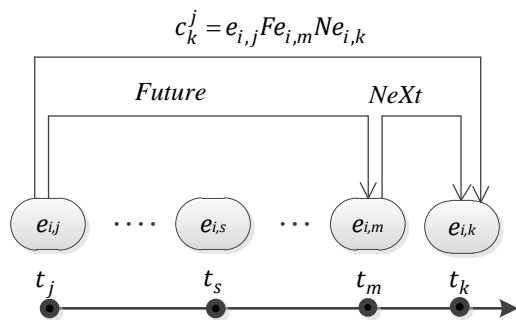


Рис. 2. Зв'язок з проміжною подією  $e_{i,m}$  для каузальної залежності, представлені оператором «Future», та деталізованої у вигляді  $e_{i,j}Fe_{i,m}Ne_{i,k}$

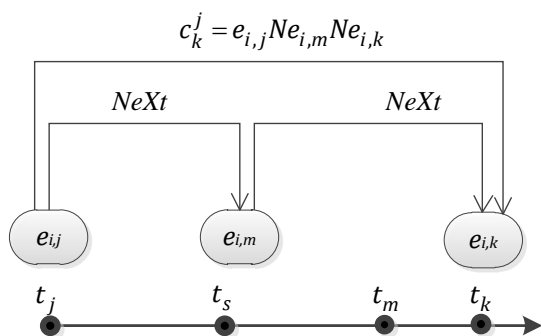


Рис. 3. Зв'язок з проміжною подією  $e_{i,m}$  для каузальної залежності, представлені оператором «Future», та деталізованої у вигляді  $e_{i,j}Ne_{i,m}Ne_{i,k}$

Якщо ж проміжні зв'язки існують, то виконується подальша деталізація залежностей  $c_k^m = e_{i,m}Fe_{i,k}$  або  $c_m^j = e_{i,j}Fe_{i,m}$  за схемою (8).

Дану модель було використано при побудові причинно-наслідкових зв'язків між подіями логу процесу сервісного обслуговування фірми «Вольво-ІТ». Лог складається із множини слідів виконання різних варіантів процесу сервісного обслуговування (трас). Ці альтернативи виконуються різними виконавцями, в різних країнах. Кожна траса складається із

лінійної послідовності подій, що відображають дії процесу. Побудова причинно-наслідкових зв'язків дала можливість порівняти виконання дій із сервісного обслуговування для виконавців з різних країн, що створює умови для модернізації альтернативних послідовностей дій згідно з кращими варіантами процесу сервісного обслуговування.

**Висновки.** Виконано структурування темпоральних властивостей каузальних зв'язків для пар подій, які виникають послідовно в часі, або мають проміжні події. Такі зв'язки представлено альтернативними причинно-наслідковими зв'язками з використанням темпоральних операторів «Next» та «Future», що дає можливість реалізувати контрфактуальний підхід до представлення причинності.

Запропоновано контрфактуальну темпоральну модель причинно-наслідкових зв'язків, яка визначає детерміновані каузальні зв'язки для пар послідовних подій та пар подій, між якими є інші події, що визначає властивість транзитивності таких залежностей і, відповідно, дає можливість описати послідовність причин та наслідків у складі пояснення в інтелектуальній системі з заданим ступенем деталізації.

#### Список літератури

- Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
- Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. № 40(2). P. 44-58.
- 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.
- Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *The 3rd international workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSIUT'07)*. 2007. P. 801-810.
- Lewis D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. 1979. Vol. 13, № 4. P. 455-476.
- Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973. № 70 (17). P. 556-567.
- 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.
- Paul L. A., Hall. N. *Causation: A User's Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 259 p.
- 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 I: Causes. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005. № 56 (4). P. 843-887.
- 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.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Інформаційна технологія побудови пояснень з урахуванням темпоральних змін у вимогах користувачів рекомендаційної системи. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2020. № 3. С. 99-103.
- Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах. *Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип. Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2(4). С. 51-56.

16. Chalyi S., Leshchynskiy 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.
17. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Використання темпоральних властивостей каузальних залежностей у поясненнях в рекомендаційних системах. *VI Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем»*. 2020. С. 169-170.
18. Ehring D. Causal Relata. *Synthese*. 1987. № 73(2). P. 319–28.
12. 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.
13. 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.
14. Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Informatsiina tekhnolohiia pobudovy poiasnen z urakhuvanniam temporalnykh zmin u vymohakh korystuvachiv rekomendatsiinoi systemy [Information technology of construction of explanations considering temporal changes in requirements of the recommender system's users]. *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku* [Control, navigation and communication systems]. 2020, no 3, pp. 99-103.
15. Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Deklaratyvno-temporalnyi pidkhd do pobudovy poiasnen v intelektualnykh informatsiynykh 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.
16. Chalyi S., Leshchynskiy V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. 2020, vol. 4, no 3, pp. 113-117.
17. Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I. Vykorystannia temporalnykh vlastyvoستي каузальних залежностей u poiasnenniakh v rekomendatsiynykh systemakh [Use of temporal properties of causal dependences in explanations in recommendation systems]. *VI Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia «Kompiuterne modeliuвання ta optymizatsiia skladnykh system»* [VI International Scientific and Technical Conference "Computer Modeling and Optimization of Complex Systems"]. 2020, pp. 169-170.
18. Ehring D. Causal Relata. *Synthese*. 1987, no 73(2), pp. 319–28.

#### References (transliterated)

1. Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
2. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. no 40(2), pp. 44-58.
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. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *The 3rd International workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSUI'07)*. 2007, pp. 801-810.
5. Lewis D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. 1979. Vol. 13, no. 4, pp. 455-476.
6. Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973, no 70 (17), pp. 556-567.
7. Lewis D. Causation as influence. *Journal of Philosophy*. 2000., vol. 97, no. 4, pp. 182–97.
8. Paul L. A. *Aspect Causation*. In Collins, Hall & Paul. 2004, pp. 205–24.
9. Paul L. A., Hall. N. *Causation: A User's Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 259 p.
10. Halpern J. Y. Axiomatizing causal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000, no 12, pp. 317-337.
11. 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.

1. Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
2. Gunning D., Aha D. DARPA's Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program. *AI Magazine*. 2019. no 40(2), pp. 44-58.
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. Tintarev N., Masthoff J. A survey of explanations in recommender systems. *The 3rd International workshop on web personalisation, recommender systems and intelligent user interfaces (WPRSUI'07)*. 2007, pp. 801-810.
5. Lewis D. Counterfactual Dependence and Time's Arrow. *Counterfactuals and Laws*. 1979. Vol. 13, no. 4, pp. 455-476.
6. Lewis D. Causation. *Journal of Philosophy*. 1973, no 70 (17), pp. 556-567.
7. Lewis D. Causation as influence. *Journal of Philosophy*. 2000., vol. 97, no. 4, pp. 182–97.
8. Paul L. A. *Aspect Causation*. In Collins, Hall & Paul. 2004, pp. 205–24.
9. Paul L. A., Hall. N. *Causation: A User's Guide*. Oxford: Oxford University Press, 2013. 259 p.
10. Halpern J. Y. Axiomatizing causal reasoning. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2000, no 12, pp. 317-337.
11. 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.

Надійшла (received) 01.11.2021

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / 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](mailto:serhii.chalyi@nure.ua)

**Лещинський Володимир Олександрович** – 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.leshchynskiy@nure.ua](mailto:volodymyr.leshchynskiy@nure.ua)

**Лещинська Ірина Олександрівна** – 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](mailto:iryna.leshchynska@nure.ua)

**Чалий Сергій Федорович** – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры информационных управляющих систем, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9982-9091>; e-mail: [serhii.chalyi@nure.ua](mailto:serhii.chalyi@nure.ua)

**Лещинский Владимир Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-5702>; e-mail: [volodymyr.leshchynskiy@nure.ua](mailto:volodymyr.leshchynskiy@nure.ua)

**Лещинская Ирина Александровна** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры программной инженерии, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8737-4595>; e-mail: [iryna.leshchynska@nure.ua](mailto: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](mailto:serhii.chalyi@nure.ua)

**Leshchynskiy 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.leshchynskiy@nure.ua](mailto:volodymyr.leshchynskiy@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](mailto:iryna.leshchynska@nure.ua)

**О. М. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, М. О. НАДУЄВА, А. І. БУБНОВ**

### **МОДЕЛЮВАННЯ РОЗВИТКУ ЕПІДЕМІЇ НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ**

Розроблені та досліджені математичні моделі епідемії для прогнозу розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 на основі інформаційної технології оптимізації складних динамічних систем. Розглянуті математичні моделі епідемії SIR, SIRS, SEIR, SIS, MSEIR у вигляді нелінійних систем диференціальних рівнянь та проведено аналіз використання математичних моделей для дослідження розвитку епідемії коронавірусу COVID-19. На основі статистичних даних епідемії коронавірусу COVID-19 у Харківській області обчислені початкові значення параметрів моделей останньої хвилі епідемії. З використанням цих моделей програмою системного методу першого ступеня з модуля методів інтегрування інформаційної технології для розв'язання нелінійних систем диференціальних рівнянь проведено імітаційне моделювання процесів розвитку останньої хвилі епідемії. Імітаційне моделювання показує, що кількість здорових людей буде зменшуватись, а кількість інфікованих людей буде зростати. За 12 місяців кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись. Інформаційною технологією оптимізації динамічних систем виконана ідентифікація параметрів моделей епідемії COVID-19 на основі статистичних даних захворювань у Харківській області. З використанням отриманих моделей проведено прогнозування розвитку останньої хвилі епідемії COVID-19 у Харківській області. Наведено процеси розвитку епідемії за SIR-моделлю з імунітетом, що слабшає, зі значеннями параметрів моделі, отриманих в результаті ідентифікації. Приблизно за 13 місяців від початку хвилі епідемії кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись. За 10 місяців все населення Харківської області буде інфіковано. Ці результати дозволяють передбачити можливі варіанти розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 у Харківській області для вчасного проведення адекватних протиепідемічних заходів.

**Ключові слова:** епідемія, математична модель, диференціальні рівняння, ідентифікація, інформаційна технологія, імітаційне моделювання.

**Е. Н. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, М. А. НАДУЕВА, А. И. БУБНОВ**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ**

Разработаны и исследованы математические модели эпидемии для прогноза развития эпидемии коронавируса COVID-19 на основе информационной технологии оптимизации сложных динамических систем. Рассмотрены математические модели эпидемий SIR, SIRS, SEIR, SIS, MSEIR в виде нелинейных систем дифференциальных уравнений и проведен анализ использования математических моделей для исследования развития эпидемии коронавируса COVID-19. На основе статистических данных эпидемии коронавируса COVID-19 в Харьковской области вычислены исходные значения параметров моделей последней волны эпидемии. С использованием этих моделей программой системного метода первой степени из модуля методов интегрирования информационной технологии для решения нелинейных систем дифференциальных уравнений проведено имитационное моделирование процессов развития последней волны эпидемии. Имитационное моделирование показывает, что количество здоровых людей будет уменьшаться, а количество инфицированных будет расти. Через 12 месяцев количество инфицированных людей достигнет своего максимума, а затем начнет уменьшаться. Информационной технологией оптимизации динамических систем выполнена идентификация параметров моделей эпидемии COVID-19 на основе статистических данных заболеваний Харьковской области. При использовании полученных моделей проведено прогнозирование развития последней волны эпидемии COVID-19 в Харьковской области. Приведены процессы развития эпидемии по SIR-модели со слабеющим иммунитетом со значениями параметров модели, полученных в результате идентификации. Приблизительно за 13 месяцев от начала волны эпидемии количество инфицированных людей достигнет своего максимума, а затем начнет уменьшаться. Через 10 месяцев все население Харьковской области будет инфицировано. Эти результаты позволят предусмотреть возможные варианты развития эпидемии коронавируса COVID-19 в Харьковской области для своевременного проведения адекватных противоэпидемических мероприятий.

**Ключевые слова:** эпидемия, математическая модель, дифференциальные уравнения, идентификация, информационная технология, имитационное моделирование.

**O. M. NIKULINA, V. P. SEVERYN, M. O. NADUIEVA, A. I. BUBNOV**

### **MODELING THE DEVELOPMENT OF EPIDEMIS BASED ON INFORMATION TECHNOLOGIES OF OPTIMIZATION**

Mathematical models of the epidemic have been developed and researched to predict the development of the COVID-19 coronavirus epidemic on the basis of information technology for optimizing complex dynamic systems. Mathematical models of epidemics SIR, SIRS, SEIR, SIS, MSEIR in the form of nonlinear systems of differential equations are considered and the analysis of use of mathematical models for research of development of epidemic of coronavirus epidemic COVID-19 is carried out. Based on the statistics of the COVID-19 coronavirus epidemic in the Kharkiv region, the initial values of the parameters of the models of the last wave of the epidemic were calculated. Using these models, the program of the first-degree system method from the module of information technology integration methods for solving nonlinear systems of differential equations simulated the development of the last wave of the epidemic. Simulation shows that the number of healthy people will decrease and the number of infected people will increase. In 12 months, the number of infected people will reach its maximum and then begin to decline. The information technology of optimization of dynamic systems is used to identify the parameters of the COVID-19 epidemic models on the basis of statistical data on diseases in the Kharkiv region. Using the obtained models, the development of the last wave of the COVID-19 epidemic in Kharkiv region was predicted. The processes of epidemic development according to the SIR-model with weakening immunity are given, with the values of the model parameters obtained as a result of identification. Approximately 13 months after the outbreak of the epidemic, the number of infected people will reach its maximum and then begin to decline. In 10 months, the entire population of Kharkiv region will be infected. These results will allow us to predict possible options for the development of the epidemic of coronavirus COVID-19 in the Kharkiv region for the timely implementation of adequate anti-epidemic measures.

**Keywords:** epidemic, mathematical model, differential equations, identification, information technology, simulation.

**Вступ.** Епідемія – це поширення інфекційної і значно перевищує нормально зареєстрований рівень хвороби, яка прогресує в часі та просторі серед людей захворюваності на певній території [1–3]. Епідемії

смертельно небезпечні для людства з давніх часів. Сучасна епідеміологія базується на системному підході й приділяє велику увагу передбаченню можливих варіантів розвитку епідемії для своєчасного проведення адекватних протіепідемічних заходів. Для того, щоб медичні працівники могли краще протистояти епідеміям, створюються математичні моделі для прогнозування розвитку захворювання. Математичні моделі відіграють величезну роль у медичній науці, вони дозволяють передбачати розвиток епідемії і є дуже важливими в наш час [4–7]. Математичні моделі розвитку епідемії широко використовуються для дослідження епідемії коронавірусу COVID-19 у різних країнах [8].

Процеси розвитку епідемії динамічні. Тож актуальним є питання побудови моделей прогнозування динаміки розвитку епідемії. Для цього доцільно використати інформаційну технологію оптимізації (ІТО) складних динамічних систем, що включає модуль інтегрування систем диференціальних рівнянь (СДР), модуль критеріїв ідентифікації та оптимізації, блок методів оптимізації та інші [9–11].

Мета даної статті полягає в розробці та дослідженні математичних моделей розвитку епідемії для прогнозу розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 на основі інформаційної технології оптимізації.

Для досягнення поставленої мети проведено аналіз різних моделей епідемії, наводяться статистичні дані розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 у Харківській області, виконується ідентифікація параметрів моделей епідемії на основі інформаційної технології оптимізації, за отриманими моделями проводиться імітаційне моделювання розвитку епідемії COVID-19 у Харківській області.

**Аналіз моделей епідемії.** Проаналізуємо різні моделі епідемії. Найбільш розповсюджена модель епідемії SIR має вигляд СДР [1]:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta SI, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $t$  – час;

$S$  – кількість сприйнятливих осіб;

$I$  – кількість інфікованих осіб;

$R$  – кількість людей, які були інфіковані;

$\beta$  – швидкість захворювання;

$\gamma$  – швидкість одужання інфікованих осіб.

Модель (1) описує незмінність популяції та не враховує смертність від хвороби. Отже для неї виконується умова

$$\frac{dS}{dt} + \frac{dI}{dt} + \frac{dR}{dt} = 0.$$

Розвитком моделі SIR є, зокрема, такі моделі:

SIRS – «сприйнятливий – інфікований – вилікуваний – сприйнятливий», модель для опису динаміки захворювання з тимчасовим імунітетом (особи,

які вилікувалися, зрештою знову стають сприйнятливими);

SEIR – «сприйнятливий – експонований – інфікований – вилікуваний», модель для опису поширення захворювань з інкубаційним періодом;

SIS – «сприйнятливий – інфікований – сприйнятливий», модель поширення захворювання, до якого не виробляється імунітет;

MSEIR – «Імунітет, отриманий від матері – чутливий – підданий впливу – інфікований – вилікуваний», модель, яка враховує імунітет дітей набутий в утробі матері.

Модель SIS, коли перенесене інфекційне захворювання надає нетривалий імунітет, має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \gamma I - \beta SI, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I. \end{aligned} \quad (2)$$

Для визначення динаміки інфекційного захворювання в достроковій перспективі враховують демографічні процеси з припущенням, що є природний період тривалості життя  $1/\mu$  років. Швидкість, з якою особи вмирають від природних причин, задається параметром  $\mu$ , що представляє «грубу» оцінку народжуваності населення. З цим припущенням, отримана узагальнена SIR-модель:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \mu - \beta SI - \mu S, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I - \mu I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \mu R. \end{aligned} \quad (3)$$

SIR та SIS моделі з точки зору епідеміології є двома крайніми моделями інфекцій, де імунітет або є протягом усього життя, або його немає зовсім. Проміжним є припущення, що імунітет триває протягом обмеженого періоду перед тим, як почне слабшати, а індивід знову стає сприйнятливим до нових випадків інфікування, що виражається у СДР:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\beta SI + wR, \\ \frac{dI}{dt} &= \beta SI - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - wR, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $w$  – швидкість, з якою втрачається імунітет.

**Аналіз розвитку епідемії за статистичними даними.** Як приклад моделювання процесу розвитку епідемії розглянуто розвиток епідемії COVID-19 у Харківській області. За статистичними даними усе населення Харківської області складає 2612 тисяч людей, усього заражень – 8,8 %, померли – 2,3 %, одужали – 82,4 % [12]. Відносні значення змінних величин епідемії приведені в табл. 1, де  $I$  – відносна кількість захворювань,  $R$  – відносна кількість одужань,  $S$  – відносна кількість здорових людей,  $dI$ ,  $dR$  і



Таблиця 1 – Відносні значення змінних величин епідемії

Місяці/рік	$I$	$R$	$S$	$dI$	$dR$	$dS$
Березень, 2020	3,82848E-07	0	1	0	0	0
Квітень, 2020	9,49464E-05	9,19E-06	0,999896	9,45636E-05	9,18836E-06	-0,0001
Травень, 2020	0,000312787	0,000147	0,999541	0,000217841	0,000137443	-0,00036
Червень, 2020	0,000408882	0,000291	0,999301	9,60949E-05	0,000143951	-0,00024
Липень, 2020	0,000603752	0,000426	0,99897	0,00019487	0,000135528	-0,00033
Серпень, 2020	0,002053982	0,000454	0,997492	0,00145023	2,79479E-05	-0,00148
Вересень, 2020	0,00367611	0,000472	0,995852	0,001622129	1,7611E-05	-0,00164
Жовтень, 2020	0,006745406	0,000973	0,992281	0,003069296	0,000501531	-0,00357
Листопад, 2020	0,007290965	0,009931	0,982778	0,000545559	0,008957504	-0,0095
Грудень, 2020	0,00537366	0,009366	0,98526	-0,0019173	-0,00056432	0,002482
Січень, 2021	0,003279096	0,004979	0,991742	-0,00209456	-0,00438783	0,006482
Лютий, 2021	0,002248469	0,002917	0,994835	-0,00103063	-0,00206202	0,003093
Березень, 2021	0,007652757	0,003247	0,989101	0,005404288	0,000330015	-0,00573
Квітень, 2021	0,012337289	0,00894	0,978723	0,004684533	0,005693338	-0,01038
Травень, 2021	0,004129403	0,010717	0,985154	-0,00820789	0,001776799	0,006431
Червень, 2021	0,000658116	0,003641	0,995701	-0,00347129	-0,0070758	0,010547
Липень, 2021	0,000352986	0,000426	0,999221	-0,00030513	-0,00321478	0,00352
Серпень, 2021	0,000985835	0,000461	0,998553	0,000632848	3,52221E-05	-0,00067
Вересень, 2021	0,00514242	0,001438	0,99342	0,004156585	0,000976646	-0,00513
Жовтень, 2021	0,015678407	0,007633	0,976688	0,010535988	0,006195253	-0,01673

$dS$  – відповідні прирости. Графік відносної кількості заражень по місяцям показано на рис. 1. Остання хвиля епідемії почалася у липні 2021 року.

За даними останніх двох місяців з таблиці шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь обчислені початкові значення параметрів моделей епідемії (1)–(4):  $\beta = 1,09623$ ,  $\gamma = 0,395146$ ,  $\mu = 0,014085$ ,  $w = 0,08$ .

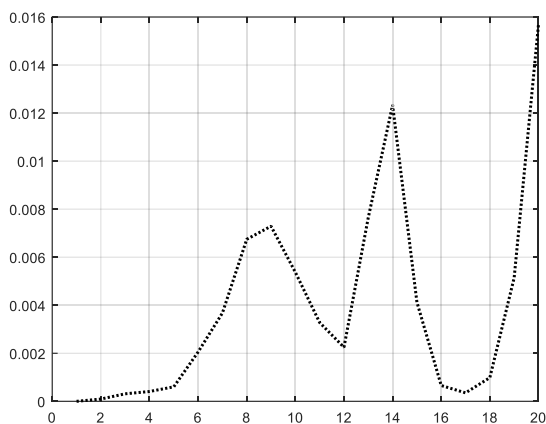


Рис. 1. Динаміка відносної кількості заражень COVID-19 у Харківській області

За даними останніх двох місяців з таблиці шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь обчислені початкові значення параметрів моделей епідемії (1)–(4):  $\beta = 1,09623$ ,  $\gamma = 0,395146$ ,  $\mu = 0,014085$ ,  $w = 0,08$ .

З використанням блоку подання інформації розв'язання задач ІТО отримані процеси розвитку епідемії на основі різних моделей епідемії програмою системного методу першого ступеня з модуля методів інтегрування для розв'язання нелінійних СДР. Початкові дані для усіх моделей відповідають даним за липень 2021 року.

Процеси на рис. 2 представляють динаміку змінних стану SIR-моделі зі сталою популяцією в залежності від часу в місяцях:  $S$  – відносна кількість здорових людей,  $I$  – відносна кількість інфікованих людей. Ці графіки показують, що кількість здорових людей буде зменшуватись, а кількість інфікованих людей буде зростати. За 12 місяців кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись.

Процеси на рис. 3 представляють динаміку змінних стану SIR-моделі з імунітетом, що слабшає, в залежності від часу в місяцях:  $S$  – відносна кількість здорових людей,  $I$  – відносна кількість інфікованих людей,  $R$  – відносна кількість людей, що одужали. Ці графіки показують, що кількість здорових людей буде

зменшуватись трохи швидше ніж за попередньої моделлю, а кількість інфікованих людей буде зростати менше, також буде менше зростати кількість людей, що одужали. За 12 місяців кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись.

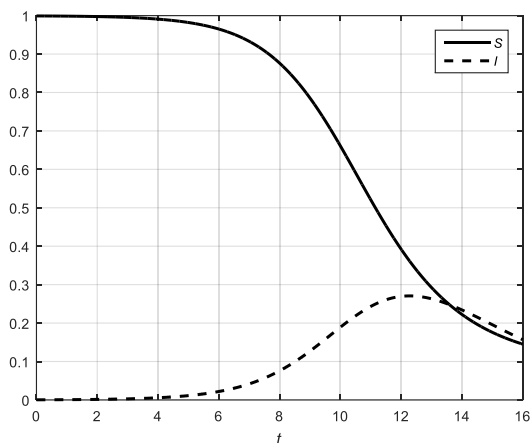


Рис. 2. Розвиток епідемії за SIR-моделлю зі сталою популяцією

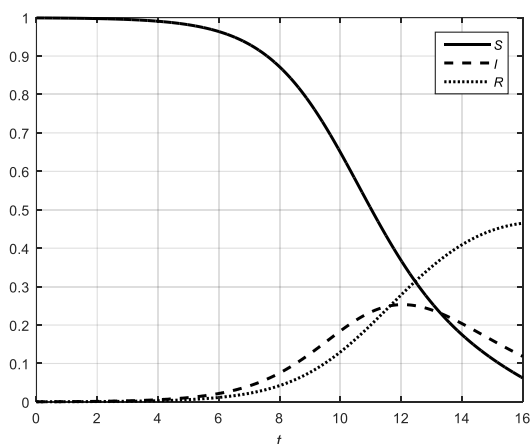


Рис. 3. Розвиток епідемії за SIR-моделлю зі сталою популяцією

### Ідентифікація параметрів моделей епідемії.

Для підвищення точності моделей розвитку епідемії поставлена задача ідентифікації параметрів моделей. За натурні дані процесу епідемії обрані дані відносної кількості інфікованих людей за 4 місяці останньої хвилі епідемії, тобто з липня по жовтень 2021 року. За цими даними і за конкретною моделлю епідемії сформована функція нев'язки, яка мінімізується програмою метода оптимізації з блоку методів оптимізації ІГО.

На рис. 4 показаний процес ідентифікації параметрів SIR-моделі зі сталою популяцією методом Нелдера – Міда за змінною кількості хворих  $I$  у просторі двох змінних параметрів  $x_1 = \beta$  і  $x_2 = \gamma$ , що складається з кращих точок пошуку, отриманий з використанням модуля `viewgraph` з блоку подання інформації розв'язання задач інформаційною системою OPTLAB. Початкова точка пошуку

$x_0(1,0926; 0,3951)$  позначена колом, кінцева точка позначена ромбом.

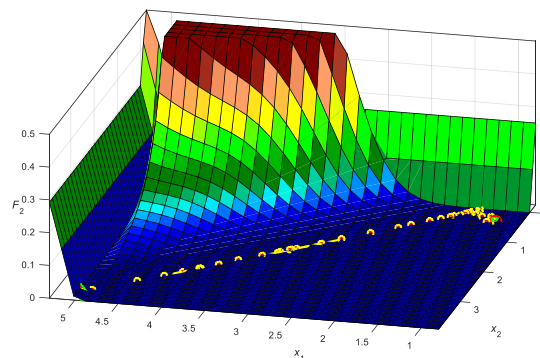


Рис. 4. Розвиток епідемії за SIR-моделлю зі сталою популяцією

На рис. 5 показані процеси за SIR-моделлю зі сталою популяцією:  $y_E$  позначає експериментальний процес,  $y_0$  – процес в початковій точці пошуку,  $y$  – процес в кінцевій точці при ідентифікованих значеннях параметрів. По горизонтальній осі відкладено час у місяцях, по вертикальній – відносна величина кількості захворілих.

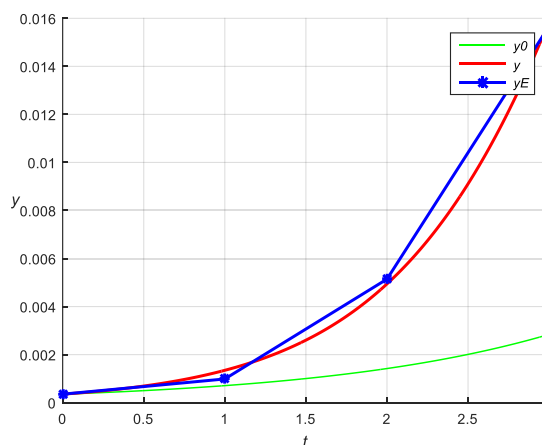


Рис. 5. Початковий, кінцевий та експериментальний процеси зміни кількості захворілих за SIR-моделлю зі сталою популяцією

### Прогнозування епідемії COVID-19.

На основі проведеного системного підходу до моделювання процесів розвитку епідемії COVID-19 у Харківській області розроблені адекватні математичні моделі, які відповідають експериментальним даним та можуть бути використані для прогнозування розвитку епідемії COVID-19 у Харківської області. Оскільки остання хвиля епідемії почалася у липні 2021 року, то початкові дані для усіх моделей відповідають даним за липень 2021 року і для відносних змінних стану моделей є нульовими.

На рис. 6 показано процеси розвитку епідемії за SIR-моделлю з імунітетом, що слабшає, зі значеннями параметрів моделі, отриманих в результаті ідентифікації. Ці графіки теж показують, що кількість здорових людей буде зменшуватись, а кількість інфікованих людей буде зростати. Приблизно за 13 місяців

від початку хвилі епідемії кількість інфікованих людей досягне свого максимуму, а потім почне зменшуватись. За 10 місяців все населення Харківської області буде інфіковано.

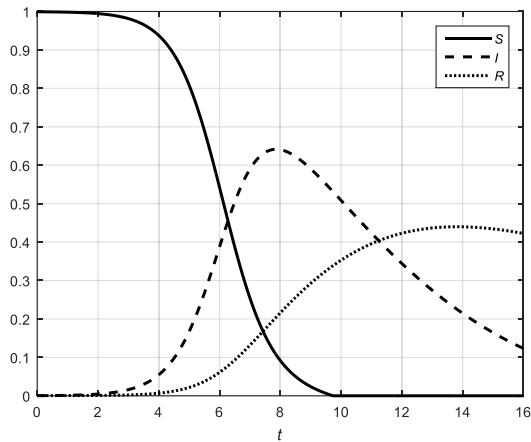


Рис. 6. Початковий, кінцевий та експериментальний процеси зміни кількості захворілих за SIR-моделлю зі сталою популяцією

Ці результати дозволять передбачити можливі варіанти розвитку епідемії для вчасного проведення адекватних протиепідемічних заходів.

**Висновки.** Дана стаття присвячена розробці та дослідженню математичних моделей епідемії для прогнозу розвитку епідемії коронавірусу COVID-19 на основі інформаційної технології оптимізації динамічних систем. Результати проведених досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Розглянуті різні математичні моделі епідемії у вигляді нелінійних систем диференціальних рівнянь та проведено аналіз використання математичних моделей для дослідження розвитку епідемії коронавірусу COVID-19.

2. На основі статистичних даних епідемії COVID-19 у Харківській області обчислені початкові значення параметрів моделей епідемії. З використанням цих моделей проведено імітаційне моделювання процесів розвитку останньої хвилі епідемії.

3. Інформаційною технологією оптимізації динамічних систем виконана ідентифікація параметрів моделей епідемії COVID-19 на основі статистичних даних захворювань у Харківській області. З використанням отриманих моделей проведено прогнозування розвитку останньої хвилі епідемії COVID-19 у Харківській області.

#### Список літератури

1. Kermack W. O., McKendrick A. G. A *Contribution to the mathematical theory of epidemics*. URL: <https://www.jstor.org/stable/94815> (дата звернення: 07.10.2021).
2. Begon M., Bennett M., Bowers R. G., French N. P. A *clarification of transmission terms in host-microparasite models: numbers, densities and areas*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12211582/> (дата звернення: 10.10.2021).
3. Anderson R., May R. *Infectious diseases of humans: dynamics and control*. <https://www.amazon.com/Infectious-Diseases-Humans-Dynamics-Control/dp/019854040X> (дата звернення: 11.11.2021).

4. Gray A., Greenhalgh D., Mao X., Pan J. *The SIS epidemic model with markovian switching*. URL: <http://strathprints.strath.ac.uk/41322> (дата звернення: 10.10.2021).
5. Иванов М. В. *Математическое моделирование процесса пандемии: теория и практика*. URL: <https://indsi.ru/2020/04/30/matematicheskoe-modelirovaniyeprocessa/> (дата звернення: 20.11.2021).
6. Авилков К. *Математическое моделирование в эпидемиологии как задача анализа сложных данных*. URL: <http://download.yandex.ru/company/experience/seminars/KAvilovm/atmodelirovanie.pdf> (дата звернення: 17.11.2021).
7. Allen L. J. S. *An Introduction to stochastic epidemic models*. URL: <http://eaton.math.rpi.edu/csums/papers/epidemic/allenstochasticepidemic.pdf> (дата звернення: 13.10.2021).
8. Іващенко Д. С., Куценко О. С. Огляд і аналіз методів моделювання процесу розвитку епідемії. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2021. № 1 (5). С. 16–19.
9. 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.
10. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В. Модуль представлення інформації для технології оптимізації систем автоматичного управління. *Тези доповідей XXVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2019. Ч. I*. Харків: НТУ «ХПІ», 2019. С. 36.
11. Никулина Е. Н., Северин В. П., Коцюба Н. В. Идентификация и анализ устойчивости контуров автоматического регулирования энергоблоков АЭС с реакторами ВВЭР-1000. *Тезисы докладов XXV Международная конференция з автоматического управления Автоматика-2018*. Львів: Львівська політехніка, 2018. С. 54–55.
12. *Статистичні дані* // <https://index.minfin.com.ua/reference/coronavirus/ukraine/harkovskaya/> (дата звернення: 10.11.2021).

#### References (transliterated)

1. Kermack W. O., McKendrick A. G. A *Contribution to the mathematical theory of epidemics*. URL: <https://www.jstor.org/stable/94815> (accessed 07.10.2021).
2. Begon M., Bennett M., Bowers R. G., French N. P. A *clarification of transmission terms in host-microparasite models: numbers, densities and areas*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12211582/> (accessed 10.10.2021).
3. Anderson R., May R. *Infectious diseases of humans: dynamics and control*. <https://www.amazon.com/Infectious-Diseases-Humans-Dynamics-Control/dp/019854040X> (accessed 11.11.2021).
4. Gray A., Greenhalgh D., Mao X., Pan J. The SIS epidemic model with markovian switching. URL: <http://strathprints.strath.ac.uk/41322> (accessed 10.10.2021).
5. Ivanov M. V. *Matematicheskoe modelirovanie processa pandemii: teoriya i praktika* [Mathematical modeling of the pandemic process]. Available at: <https://indsi.ru/2020/04/30/mathematical-modelingprocess/> (accessed 20.11.21).
6. Avilov K. *Matematychnye modelivannia v epidemiologii yak zavdannia analizu skladnykh danykh*. [Mathematical modeling in epidemiology as a problem in the analysis of complex data]. Available at: <https://indsi.ru/2020/04/30/matematicheskoe-modelirovaniyeprocessa/> (accessed 20.11.2021).
7. Allen L. J. S. *An Introduction to stochastic epidemic models*. URL: <http://eaton.math.rpi.edu/csums/papers/epidemic/allenstochasticepidemic.pdf> (accessed 13.10.2021).
8. Ivashchenko D. S., Kutsenko O. S. Oglyad i analiz metodov modeluvannya protsesu rozvetku epidemiyi [Overview and analysis of methods for modeling the epidemic development process]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2021, no. 1 (5), pp. 16–19.
9. 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.: Sistemy 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.
10. Nikulina O. M., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Modul predstavleniya informatsiyi dlya tehnologiyi optymizatsiyi system avtomatichnogo upravlinnya [Information presentation module for automatic control systems optimization technology]. *Tezy dopovidey XXVII mighnorodnoyi naurovo-praktychnoyi konferentsiyi MicroCAD–2019. Ch. I.* [Abstracts of the XXVII International Scientific and Practical Conference "MicroCAD–2019". Vol. 2]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, p. 36.
11. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Identifikatsiya s analiz ustoychivosti konturov avtomaticheskogo regulirovaniya energoblokov AES s reaktorami VVER-1000 [Identification and Analysis of stability of automatic control loops for NPP power units with VVER-1000 reactors.]. *Tezy dopovidey XXV mighnorodnoyi naurovo-praktychnoyi konferentsiyi Avtomatika–2018.* [Abstracts of the XXV International Scientific and Practical Conference "Automatics–2018"]. Lviv, Lviv Polytechnic Publ., 2018, pp. 54–55.
12. *Statistics* // <https://index.minfin.com.ua/reference/coronavirus/ukraine/harkovskaya/> (accessed 10.11.2021).

Надійшла (received) 29.10.2021

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

**Нікуліна Олена Миколаївна** – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: [elniknik02@gmail.com](mailto: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: [severinvp@gmail.com](mailto:severinvp@gmail.com)

**Надуєва Марія Олександрівна** – студентка кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6096-7112>; e-mail: [Mariia.Naduieva@cs.khpi.edu.ua](mailto:Mariia.Naduieva@cs.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](mailto:Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua)

**Нікуліна Елена Николаевна** – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри программной инженерии и информационных технологий управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: [elniknik02@gmail.com](mailto:elniknik02@gmail.com)

**Северин Валерій Петрович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: [severinvp@gmail.com](mailto:severinvp@gmail.com)

**Надуева Мария Алексеевна** – студентка кафедри программной инженерии и информационных технологий управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6096-7112>; e-mail: [Mariia.Naduieva@cs.khpi.edu.ua](mailto:Mariia.Naduieva@cs.khpi.edu.ua)

**Бубнов Антон Игоревич** – студент кафедри компьютерной математики и анализа данных Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: [Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua](mailto:Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua)

**Nikulina Olena Mykolaivna** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: [elniknik02@gmail.com](mailto: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: [severinvp@gmail.com](mailto:severinvp@gmail.com)

**Naduieva Mariia Oleksiivna** – Student of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6096-7112>; e-mail: [Mariia.Naduieva@cs.khpi.edu.ua](mailto:Mariia.Naduieva@cs.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](mailto:Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua)

*I. П. ГАМАЮН, С. В. ШАШКОВ*

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯМ СВІТЛОФОРА НА ПЕРЕХРЕСТІ МІСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ**

Предметом дослідження є процес моделювання функціонування світлофора, що забезпечує адаптивне управління транспортними засобами на перехрестях міської транспортної мережі. В процесі функціонування міських транспортних мереж виникають такі явища, як затори транспортних засобів (ТЗ), які призводять до значних економічних втрат, погіршенню екології, фрустрації учасників дорожнього руху та інших видів негативних впливів. Затори часто виникають у вузлах міської транспортної мережі, які є перехрестями – місцями перетину, прилягання або розгалуження доріг міської мережі одного рівня. Однією з причин виникнення заторів є неефективне управління транспортними потоками на перехрестях, що забезпечується таким елементом перехрестя як світлофор. Функцію управління потоками світлофор реалізує за допомогою мікропроцесорного контролера, який згідно заданого алгоритму перемикає кольори світлофора, що відповідають фазам дозволу та заборони руху ТЗ за напрямками доріг перехрестя. В рамках існуючої транспортної мережі світлофори, що реалізують адаптивне управління за допомогою відповідних локальних контролерів, і створюваних на їх основі більш складних системних контролерів, що забезпечують врахування ситуації в зовнішньому середовищі, яке представлено декількома взаємопов'язаними перехрестями, в даний час є одним з найважливіших напрямків вирішення проблеми заторів.

У статті запропоновано математичну модель для побудови алгоритму функціонування мікропроцесорного контролера світлофора, що забезпечує оперативне та адекватне відображення ситуацій на перехрестях. До основних особливостей моделі належать оперативність реагування на зміну ситуацій на перехресті шляхом зміни тривалості зеленої фази світлофора у кожному циклі функціонування світлофора пропорційно довжині черги транспортних засобів у відповідному напрямку руху; адекватне відображення зовнішнього середовища декількома виразами закону Пуассона, що відрізняються різними значеннями параметра, кожен з яких відповідає певному добовому інтервалу функціонування світлофора; динаміка зміни дорожньої ситуації, що обумовлена зменшенням кількості транспортних засобів у черзі за рахунок проїзду перехрестя транспортними засобами у період зеленої фази світлофора, визначається на основі виразів, які визначають переміщення тіл при рівноприскореному та рівномірному русі, а також на основі диференціального рівняння динаміки руху транспортних засобів в одному ряду з урахуванням затримки, зумовленої реакцією водіїв.

**Ключові слова:** математична модель, світлофор, адаптивне управління, перехрестя, мікроконтролер, програмний засіб.

*I. П. ГАМАЮН, С. В. ШАШКОВ*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ СВЕТОФОРА НА ПЕРЕКРЕСТКЕ ГОРОДСКОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ**

Предметом исследования является процесс моделирования функционирования светофора, обеспечивающего адаптивное управление транспортными средствами на перекрестках городской транспортной сети. В процессе функционирования городских транспортных сетей возникают такие явления, как пробки транспортных средств (ТС), которые приводят к значительным экономическим потерям, ухудшению экологии, фрустрации участников дорожного движения и других видов негативных воздействий. Пробки часто возникают в узлах городской транспортной сети, которые являются перекрестками – местами пересечения, примыкания или разветвления дорог городской сети одного уровня. Одной из причин возникновения заторов является неэффективное управление транспортными потоками на перекрестках, что обеспечивается таким элементом перекрестка как светофор. В рамках существующей транспортной сети светофоры, реализующие адаптивное управление с помощью соответствующих локальных контроллеров, и создаваемых на их основе более сложных системных контроллеров, обеспечивающих учет ситуации во внешней среде, которая представлена несколькими взаимосвязанными перекрестками, в настоящее время является одним из важнейших направлений решения проблемы пробок. Функцію управління потоками светофор реалізує с помощью мікропроцесорного контролера, який, согласно заданному алгоритму, переключает цвета светофора, соответствующие фазам разрешения и запрета движения ТС по направлениям дорог перекрестка.

В статье предлагается математическая модель для построения алгоритма функционирования микропроцессорного контролера светофора, который обеспечивает оперативное и адекватное отображение ситуаций на перекрестках. К основным особенностям модели относится оперативность реагирования на изменение ситуаций на перекрестке путем изменения продолжительности разрешительной фазы движения в каждом цикле функционирования светофора пропорционально длине очереди транспортных средств в соответствующем направлении движения; адекватное отображение внешней среды несколькими выражениями закона Пуассона, отличающимися различными значениями параметра, каждый из которых соответствует определенному суточному интервалу функционирования светофора; динамика изменения дорожной ситуации, обусловленная уменьшением числа транспортных средств в очереди за счет проезда перекрестка транспортными средствами в период зеленой фазы светофора, определяется на основе выражений, определяющих перемещение тел при равноускоренном и равномерном движении, а также на основе дифференциального уравнения динамики движения транспортных средств в одном ряду с учетом задержки, обусловленной реакцией водителей.

**Ключевые слова:** математическая модель, светофор, адаптивное управление, перекресток, микроконтроллер, программное средство.

*I. P. GAMAYUN, S. V. SHASHKOV*

## **MATHEMATICAL MODEL OF ADAPTIVE CONTROL OF THE FUNCTIONING OF A TRAFFIC LIGHT AT THE CROSSROADS OF A URBAN TRANSPORTATION NETWORK**

The subject of the research is the process of modeling the functioning of a traffic light, providing adaptive control of vehicles at the intersections of the city transport network. In the process of functioning of urban transport networks, such phenomena as traffic jams occur, which lead to significant economic losses, environmental degradation, frustration of road users and other types of negative impacts. Traffic jams often occur at the nodes of the urban transport network, which are intersections - the places of intersection, abutment or branching of roads of the urban network of the same level. One of the causes of congestion is the ineffective management of traffic flows at intersections, which is provided by such an element of the intersection as a traffic light. Within the framework of the existing transport network, traffic lights that implement adaptive control with the help of appropriate local controllers, and more complex system controllers created on their basis, ensuring that the situation in the external environment is taken into account, which is represented by several interconnected intersections, is currently one of the most important directions for solving the problem of traffic jams. ... The traffic light flow control function is implemented using a microprocessor controller, which, according to a given

© I.П. Гамаюн, С.В. Шашков, 2021

algorithm, switches the traffic light colors corresponding to the phases of allowing and prohibiting the movement of the vehicle in the directions of the intersection roads.

The article proposes a mathematical model for building an algorithm for the functioning of a microprocessor traffic light controller, which provides a prompt and adequate display of situations at intersections. The main features of the model include responsiveness to changes in situations at an intersection by changing the duration of the permissive phase of movement in each cycle of traffic light operation in proportion to the length of the queue of vehicles in the corresponding direction of travel; adequate display of the external environment by several expressions of Poisson's law, differing in different values of the parameter, each of which corresponds to a certain daily interval of traffic light functioning; the dynamics of changes in the traffic situation due to a decrease in the number of vehicles in the queue due to the passage of the intersection by vehicles during the green phase of the traffic light is determined on the basis of expressions that determine the movement of bodies with uniformly accelerated and uniform movement, as well as on the basis of the differential equation of the dynamics of movement of vehicles in one row taking into account the delay caused by the reaction of drivers.

**Key words:** mathematical model, traffic light, adaptive control, crossroads, microcontroller, software.

**Вступ.** В процесі функціонування міських транспортних мереж виникають такі явища, як затори транспортних засобів (ТЗ), які призводять до значних економічних втрат, погіршенню екології, фрустрації учасників дорожнього руху та інших видів негативних впливів.

Затори часто виникають у вузлах міської транспортної мережі, які є перехрестями – місцями перетину, прилягання або розгалуження доріг міської мережі одного рівня. Однією з причин виникнення заторів є неефективне управління транспортними потоками на перехрестях, що забезпечується таким елементом перехрестя як світлофор [1–2].

Функцію управління потоками світлофор реалізує за допомогою мікропроцесорного контролера, який згідно заданого алгоритму перемикає кольори світлофору, що відповідають фазам дозволу та заборони руху ТЗ за напрямками доріг перехрестя.

Згідно відомої класифікації виділяють локальні та системні контролери [3]. Локальні управляють без урахування ситуації на інших перехрестях. Системні контролери забезпечують управління з урахуванням ситуації на інших перехрестях. При цьому локальні контролери поділяються на такі, що реалізують управління з фіксованою тривалістю сигналів фаз дозволу та заборони руху у циклі роботи світлофору, а також на ті що реалізують адаптивне управління – коли тривалість фаз визначається в залежності від ситуації, яка склалась на перехресті (наприклад, в залежності від числа ТЗ в напрямках доріг перехрестя).

В рамках існуючої транспортної мережі світлофори, що реалізують адаптивне управління за допомогою відповідних локальних контролерів, і створюваних на їх основі більш складних системних контролерів, що забезпечують врахування ситуації в зовнішньому середовищі, яке представлено декількома взаємопов'язаними перехрестями, в даний час є одним з найважливіших напрямків вирішення проблеми заторів.

Для розробки алгоритмів функціонування контролерів, які реалізують адаптивне управління, використовується математична модель, яка віддзеркалює ситуації, що складаються на перехрестях, та динаміку їх змін. При виборі математичного апарату враховується, як зазвичай, характер процесів утворення ситуацій і динаміки їх змін. Оскільки фактор невідомості має істотне значення в процесах, що розглядаються, то в якості математичного апарату зазвичай використовують такі розділи теорії імовірності, як математична статистика, системи масово-

го обслуговування, а також нечітка математика. При цьому динаміка змін ситуації має обумовлюватися функціонуванням світлофорів спрямованим на зменшення заторів [4–6].

**Задача дослідження.** Розвиток направлення вирішення проблем заторів за допомогою світлофорів, які реалізують адаптивне управління, обумовлюється вдосконаленням математичних моделей, на основі яких розроблюються алгоритми функціонування світлофорів даного типу.

Вдосконалення передбачає збільшення оперативності реагування на виникаючі ситуації, а також збільшення адекватності відображення ситуацій і динаміки їх змін.

В статті запропоновано математичну модель, особливостями якої є оперативне реагування на зміну ситуацій на перехресті шляхом зміни значень довжини фази дозволу руху в кожному циклі його функціонування пропорційно значенням довжини черги ТЗ в кожному напрямку перехрестя; адекватне відображення зовнішнього середовища, невизначеність стану якого визначається декількома виразами закону Пуасона, що відрізняються значеннями параметрів, кожен з яких відповідає певному добовому інтервалу функціонування світлофору, що дозволяє більш чітко виразити умови стаціонарності; динаміка зміни дорожньої ситуації, яка обумовлена зменшенням числа ТЗ в черзі за рахунок проїзду перехрестя ТЗ у період зеленої фази світлофору визначається на основі виразів які визначають переміщення тіл при рівноприскореному та рівномірному русі, а також на основі диференційного рівняння динаміки руху ТЗ в одному ряду з урахуванням затримки обумовленою реакцією водіїв.

**Математична модель.** Об'єктом моделювання є перехрестя, прикладом якого є перехрестя, зображене на рис. 1 з напрямками руху А, В, С, D. Квадратами на рис. 1 позначаються умовні сигнали світлофору, що регулюють рух на перехресті.

Зафарбований квадрат відповідає зеленій фазі світлофору. Незафарбований квадрат відповідає червоній фазі світлофору.

В моделі використовуються наступні позначення числа ТЗ в черзі перед перехрестям:  $N_A, N_B, N_C, N_D$ . По кожному з даних напрямків значення  $N_A, N_B, N_C, N_D$  визначають довжину черги в заданих напрямках перед світлофором.

Затор обумовлюється довжиною черги. Чим більша довжина черги, тим більше часу ТЗ проведе

перед перехрестям. Тому для здолання затору необхідно передбачити можливість скорочення довжини черги, починаючи з напрямку (напрямків) з максимальним значенням довжини черги.

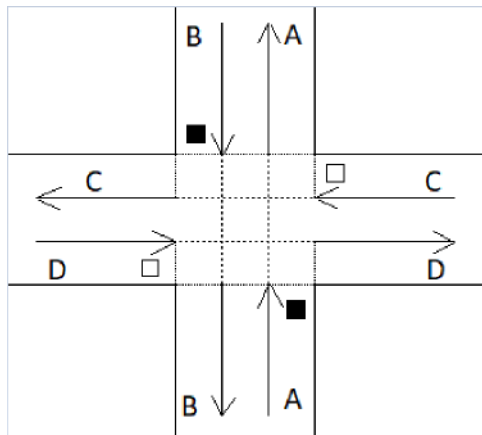


Рис. 1. Перехрестя з напрямками руху А, В, С, D

Така можливість може бути надана, якщо збільшити тривалість зеленої фази світлофора у напрямку з максимальною довжиною черги пропорційно значенню довжини цієї черги. При цьому світлофор у циклі свого функціонування продовжує обслуговувати всі інші напрямки перехрестя, призначаючи час зеленої фази для них пропорційно значенням довжини черги в цих напрямках.

Вид перехрестя, зображений на рисунку 1, передбачає одночасний проїзд перехрестя ТЗ на зеленій сигналі світлофора з двох напрямків: А і В або С і D. Тому визначення тривалості зеленої фази світлофора залежить від значень довжини черги, що представляють собою кожену пару напрямків:  $N_{AB} = \max\{N_A, N_B\}$ ,  $N_{CD} = \max\{N_C, N_D\}$ .

Часові інтервали тривалості зелених фаз світлофора у напрямках АВ і CD позначаються як  $T_{AB}$ ,  $T_{CD}$ .

Якщо через  $T$  позначити значення часового інтервалу повного циклу роботи світлофора, протягом якого даного випадку реалізується проїзд перехрестя ТЗ спочатку з напрямків А і В, а потім С і D (або навпаки), то

$$T_{AB} + T_{CD} = T, \quad (1)$$

де  $T$  є постійною величиною для управління на перехресті, що розглядається окремо, і змінною, коли управління реалізується з урахуванням ситуацій на інших перехрестях (системні контролери).

Значення  $T_{AB}$ ,  $T_{CD}$ , як складові значення  $T$ , обираються пропорційно значенням довжин черг у відповідних напрямках так, що

$$T_{AB} = \frac{N_{AB}}{N_{AB} + N_{CD}} T, \quad T_{CD} = \frac{N_{CD}}{N_{AB} + N_{CD}} T. \quad (2)$$

Такий вибір значень  $T_{AB}$ ,  $T_{CD}$  здовольняє відношенню (1) і забезпечує адаптивний характер управління процесом пропуску ТЗ через перехрестя, оскільки

ки значення тривалостей зелених фаз світлофора (2) визначається з урахуванням довжин черг у кожному циклі функціонування світлофора, що сприяє зменшенню заторів.

Динаміка зміни ситуації на перехресті у кожному циклі функціонування світлофора характеризується двома основними процесами: зменшення черг в результаті проїзду ТЗ перехрестя у період зелених фаз світлофора для даних напрямків і збільшення черг в результаті прибуття нових ТЗ.

Процес збільшення черг має стохастичний характер. Випадковий потік нових ТЗ, що прибувають у чергу в період зеленої фази роботи світлофора, вважається таким, що задовольняє властивостям ординарності, відсутності післядії та стаціонарності. У зв'язку з цим цей потік є найпростішим (Пуасонівським) [6]. При цьому для більш адекватного урахування властивостей стаціонарності пропонується добовий період функціонування світлофора розбити на частини, кожна з яких характеризується певним постійним значенням математичного очікування числа нових ТЗ, що прибувають в чергу.

Таким чином, процес прибуття нових ТЗ в чергу пропонується відобразити декількома кривими розподілу випадкового числа нових ТЗ, що прибувають в чергу, кожна з яких відповідає частині доби роботи світлофора і характеризується певним значенням параметра закону Пуасона, що дорівнює, як відомо, значенню математичного очікування.

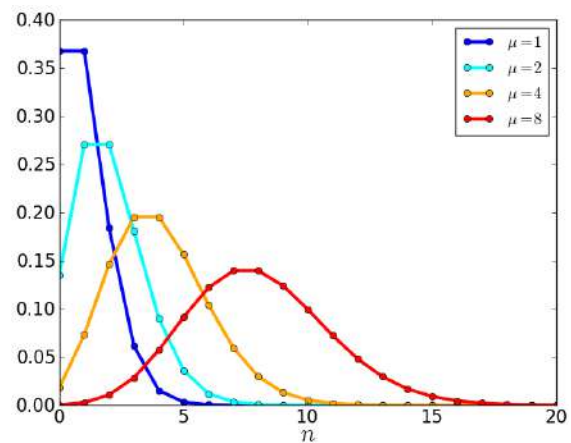


Рис. 2. Розподіл випадкової величини з різними параметрами

На рис. 2 зображено приклад декількох багатокутників розподілу випадкової величини  $n$  числа ТЗ, що прибувають в деякий інтервал часу, яка може приймати цілі невід'ємні значення  $0, 1, 2, \dots, m, \dots, n$ .

Кожен з багатокутників випадкової величини, що розглядається, розподіленої за законом Пуасона, відповідає певним значенням параметра  $a$ , який дорівнює значенню математичного очікування випадкової величини. При цьому індекс параметра на рис. 2 відповідає індексу частини доби роботи світлофора

$$P_m = \frac{a^m}{m!} e^{-a}.$$

Для визначення конкретного значення випадкової величини необхідно обрати певну криву закону розподілу, виходячи з моменту часу доби, і далі реалізувати відому процедуру жеребкування [7–8].

Реалізація вказаної процедури жеребкування дозволяє визначити значення числа нових ТЗ, що прибувають до черги в циклі  $T$  роботи світлофора за напрямками А, В, С, D. Далі ці значення позначаються як  $n_A, n_B, n_C, n_D$  і використовуються для корекції значень довжин черг  $N_A, N_B, N_C, N_D$  за напрямками, що розглядаються.

Така корекція визначає процес зміни черг за рахунок прибуття нових ТЗ протягом циклу роботи світлофора і виражається рекурентним співвідношенням

$$N_{\alpha}^i = N_{\alpha}^{i-1} + n_{\alpha}^i, (i \in \overline{1, I}; \alpha \in A, B, C, D), \quad (3)$$

де  $i$  – індекс поточного циклу роботи світлофора  $T^i$ ;  $I$  – загальна кількість циклів роботи світлофора в добу;

$\alpha$  – індекс напрямків, що розглядаються.

Зміна ситуації на перехресті у циклі роботи світлофора  $i \in \overline{1, I}$ , що розглядається, як відзначалось, характеризується також процесом зменшення черг шляхом проїзду перехрестя ТЗ за часові інтервали зелених фаз роботи світлофора  $T_{AB}^i$  і  $T_{CD}^i$ .

Значення  $T_{AB}^i$  і  $T_{CD}^i$  визначаються на основі виразу (2) на основі довжини черг за напрямками А, В, С, D у попередній  $(i - 1)$ -й цикл роботи світлофора, тобто

$$T_{AB}^i = \frac{N_{AB}^{i-1}}{N_{AB}^{i-1} + N_{CD}^{i-1}} T^{i-1}, \quad (4)$$

$$T_{CD}^i = \frac{N_{CD}^{i-1}}{N_{AB}^{i-1} + N_{CD}^{i-1}} T^{i-1}.$$

Для визначення числа ТЗ, що проїдуть перехрестя, і інтервалів  $T_{AB}^i$  і  $T_{CD}^i$ , необхідно скористатись виразами, що визначають динаміку руху ТЗ через перехрестя.

До таких виразів відноситься диференційне рівняння руху ТЗ в одному ряду з урахуванням затримки [9–10]:

$$\frac{d^2 x_k(t + \tau)}{dt^2} = \alpha \left( \frac{dx_{k-1}(t)}{dt} - \frac{dx_k(t)}{dt} \right),$$

де  $x_k(t), x_{k-1}(t)$  – положення  $k$ -го ТЗ і  $(k - 1)$ -го ТЗ, що рухається перед  $k$ -м в напрямку  $x$  в момент часу  $t$ ;

$\tau$  – затримка, з якою водій  $k$ -го ТЗ реагує на зміну швидкості  $(k - 1)$ -го ТЗ, що рухається перед ним;

$\alpha$  – коефіцієнт чутливості розмірності [1/сек].

Іншим способом вираження динаміки проїзду ТЗ перехрестя є використання співвідношень, що визначають переміщення тіл при рівноприскореному та рівномірному русі [7].

Реалізація цього способу передбачає використання характеристик перехрестя черги рекомендованого швидкісного режиму при русі ТЗ в один ряд через перехрестя та при під'їзді до нього.

На рис. 3 показано представлення черги ТЗ перед перехрестям як послідовності ділянок  $k \in \overline{1, N_{\alpha}^i}$  довжиною  $l$ , де  $k$  – відповідає порядковому номеру ТЗ в черзі, а довжина  $l$  включає середньостатистичну довжину ТЗ в черзі та рекомендовану дистанцію між ТЗ в черзі.



Рис. 3. Розподіл випадкової величини з різними параметрами

Стрілка на рисунку 3 показує напрямок руху ТЗ при включенні зеленого сигналу світлофора. Припустимо, що рух усіх ТЗ, що утворюють чергу, після включення зеленої фази світлофора за відповідними напрямками  $T_{\alpha}^i$  реалізується в 2 етапи – спочатку рівноприскорене на ділянці шляху руху ТЗ в черзі довжиною  $S'$  протягом інтервалу часу  $\Delta t$ , а потім рівномірне, після досягнення ТЗ деякої рекомендованої (встановленої) швидкості  $V$ . Відмітимо, що вказані параметри руху задовольняють добре відомому співвідношенню  $V = \frac{2S}{\Delta t}$ , за умови, що початкова швидкість рівна 0 для всіх ТЗ в черзі [11–12].

Також припускається, що початок руху кожного наступного ТЗ в черзі по відношенню до безпосередньо попереднього ТЗ реалізується із затримкою  $\tau$ . Таким чином, якщо перший в черзі ТЗ ( $k = 1$ ) починає рух в момент часу  $t = 0$ , то ТЗ з індексом  $k > 1$  в черзі починає рух в момент  $t = (k - 1)\tau$ .

ТЗ на початку черги можуть почати перетин перехрестя на етапі рівноприскореного руху, не досягнувши рекомендованої швидкості  $V$ , з якою виконується рівномірний рух. Число таких ТЗ визначається значенням індексу  $k_1 = \max\{\overline{1, N_{\alpha}^i}\}$ , для якого виконується співвідношення

$$\forall k \in \overline{1, k_1} (k - 1)l \leq S, \quad T_{\alpha}^i - (k - 1)\tau \geq \Delta t. \quad (5)$$

Якщо виявиться, що  $k_1 = N_{\alpha}^i$ , то усі ТЗ в черзі можуть почати перетин перехрестя реалізуючи лише рівноприскорений рух.

Якщо  $k_1 < N_{\alpha}^i$ , то ТЗ в черзі, які мають індекси  $k > k_1 + 1$ , можуть почати перетин перехрестя реалізуючи 2 види руху – рівноприскорений, а за ним рівномірний після досягнення швидкості  $V$ . Таким чином, рух ТЗ з індексами  $k \in \overline{k_1 + 1, N_{\alpha}^i}$  реалізується спочатку як рівноприскорений з прискоренням  $a$  протягом часу  $\Delta t$ .

Потім, після подолання відстані  $S$ , реалізується рівномірний рух зі швидкістю  $V$ , який може продовжуватись протягом часу  $(T_{\alpha}^i - (k - 1)\tau - \Delta t) > 0$ . За цей час  $k$ -й ТЗ подолає відстань  $V(T_{\alpha}^i - (k - 1)\tau - \Delta t)$ .



Число ТЗ, які можуть почати перетин перехрестя, реалізуючи два види руху, визначається значенням індексу  $k_2 = \max\{k_1 + 1, N_\alpha^i\}$ , для якого виконується співвідношення

$$\forall k \in \overline{k_1 + 1, N_\alpha^i}, \quad (6)$$

$$(k - 1)l \leq S + V(T_\alpha^i - (k - 1)\tau - \Delta t).$$

Нехай, наприклад, на одному з напрямків перехрестя  $\alpha$  в  $i$ -му циклі роботи світлофора утворилась черга з 15 ТЗ, тобто  $N_\alpha^i = 15$ . Тривалість зеленої фази світлофора в напрямку  $\alpha$ , що розрахована на основі (4), визначається значення  $T_\alpha^i = 20$  с. Статистично визначено, що  $l = 7$  м. Інші вказані вище параметри мають наступні значення:  $S = 20$  м,  $\Delta t = 4$  с,  $V = 10$  м/с,  $\tau = 1$  с.

Спочатку, на основі співвідношення (5) визначається значення  $k_1 = 3$ , тобто тільки перші три ТЗ з черги можуть почати перетин перехрестя, реалізуючи тільки рівноприскорений рух.

Оскільки  $k_1 < N_\alpha^i$ , то переходимо до визначення  $k_2$  на основі співвідношення (6). Для прикладу, що розглядається,  $k_2 = 11$ .

Таким чином з 15 ТЗ, що утворюють чергу, 11 ТЗ можуть почати перетин перехрестя, здійснюючи рівноприскорений та рівномірний рух. При цьому перші три з 11 можуть почати перетин перехрестя, реалізуючи тільки рівноприскорений рух.

Значення  $k_1$  та  $k_2$  для кожного напрямку  $\alpha$  перехрестя в  $i$ -му циклі функціонування світлофора, що позначені як  $k_1^i(\alpha)$ ,  $k_2^i(\alpha)$ , дозволяють остаточно скорегувати довжину черги перед розглядом наступного  $(i + 1)$ -го циклу:

$$N_\alpha^i = \begin{cases} N_\alpha^i - k_1^i(\alpha), & \text{якщо } k_1^i(\alpha) = N_\alpha^i \\ N_\alpha^i - k_2^i(\alpha), & \text{якщо } k_2^i(\alpha) < N_\alpha^i \end{cases} \quad (7)$$

Після корекції значень  $N_\alpha^i$  на основі (7) повторюються дії, пов'язані з визначенням довжин черг, тривалостей зелених фаз світлофора за напрямками перехрестя на основі виразів (3), (4), що реалізуються на наступному  $(i + 1)$ -му циклі роботи світлофора.

### Список літератури

1. *Адаптивное управление светофорными объектами*. URL: <https://spetsdor.ru/cases/adaptivnoe-upravlenie-svetoformymi-obektami/> (дата звернення: 28.10.2021).
2. *Адаптивная система управления светофорами теперь работает на 10 перекрестках Кемерово*. URL: <https://news.drom.ru/30855.html> (дата звернення: 17.10.2021).
3. Абрамов М. К., Прокопов А. Г. *Специальная техника в ОВД: учебно-методические рекомендации*. Белгород: Бел ЮИ МВД России, 2015. 176 с.
4. *163 светофора в Санкт-Петербурге будут оснащены адаптивными режимами управления*. URL: [https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/tr\\_infr\\_kom/news/59538/](https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/tr_infr_kom/news/59538/) (дата звернення: 28.10.2021).
5. Мирзай Х. Разработка адаптивного алгоритма контролера светофора с приоритетной выборкой в режиме реального

времени. *Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии*. Воронеж: 2016. № 1. С. 26-32.

6. *Алгоритмы адаптивного регулирования светофорной сигнализации*. URL: <http://surl.li/aysmg> (дата звернення: 12.10.2021).
7. *Распределение и формула Пуассона*. URL: [http://mathprofi.ru/raspredelenie\\_i\\_formula\\_puassona.html](http://mathprofi.ru/raspredelenie_i_formula_puassona.html) (дата звернення: 28.10.2021).
8. Билялов Р. Ф. *Теория вероятностей и математическая статистика. Лекционный курс и практические занятия*. Казань: Казанский государственный университет, 2004. 138 с.
9. Геворкян Э. А. *Дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом: учебно-методический комплекс*. Москва: Евразийский открытый институт, 2011. 155 с.
10. Бордовский Г. А., Кондратьев А. С., Чоудери А. *Физические основы математического моделирования. Учебник и практикум для бакалавриата и магистратуры*. Москва: Юрайт, 2017. 320 с.
11. *Перемещение тела при прямолинейном равноускоренном движении без начальной скорости*. URL: <https://100ballov.kz/mod/page/view.php?id=2576> (дата звернення: 28.10.2021).
12. *Рівноприскорений рух*. URL: <https://goo.su/9Qv8> (дата звернення: 17.10.2021).

### References (transliterated)

1. *Adaptivnoe upravlenie svetoformimi obektami* [Adaptive traffic light control]. URL: <https://spetsdor.ru/cases/adaptivnoe-upravlenie-svetoformymi-obektami/> (accessed 28.10.2021).
2. *Adaptivnaya sistema upravleniya svetoforami teper' rabotaet na 10 perekrestkah Kemerovo* [The adaptive traffic light control system now works at 10 intersections in Kemerovo]. URL: <https://news.drom.ru/30855.html> (accessed 17.10.2021).
3. Abramov M. K., Prokopov A. G. *Specialnaya tehnika v OVD: uchebno-metodicheskie rekomendacii* [Special equipment in the police department: educational and methodological recommendations]. Belgorod, Bel YUI MVD Rossii Publ., 2015. 176 p.
4. *163 svetofera v Sankt-Peterburge budut osnashcheny adaptivnymi rezhimami upravleniya* [163 traffic lights in St. Petersburg will be equipped with adaptive control modes]. URL: [https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/tr\\_infr\\_kom/news/59538/](https://www.gov.spb.ru/gov/otrasl/tr_infr_kom/news/59538/) (accessed 28.10.2021).
5. Mirzai H. *Razrabotka adaptivnogo algoritma kontrolera svetofera s prioritnoy viborkoi v rezhime realnogo vremeni* [Development of an adaptive algorithm for a traffic light controller with priority sampling in real time]. *Vestnik VGU, seriya: sistemnyy analiz i informacionnye tehnologii* [Voronezh State University Bulletin, series: system analysis and information technology]. Voronezh, 2016, no. 1, pp. 26-32.
6. *Algoritmy adaptivnogo regulirovaniya svetoformoy signalizacii* [Algorithms for adaptive control of traffic light signaling]. URL: <http://surl.li/aysmg> (accessed 12.10.2021).
7. *Raspredelenie i formula Puassona* [Distribution and Poisson's formula]. URL: [http://mathprofi.ru/raspredelenie\\_i\\_formula\\_puassona.html](http://mathprofi.ru/raspredelenie_i_formula_puassona.html) (accessed 28.10.2021).
8. Bilyalov R. F. *Teoriya veroyatnosti i matematicheskaya statistika. Lekcionnyy kurs i prakticheskie zanyatiya* [Probability theory and mathematical statistics. Lecture course and practical exercises]. Kazan, Kazanskii gosudarstvennii universitet Publ., 2004. 138 p.
9. Gevorkyan E. A. *Differentsial'nye uravneniya s zapazdyvayushchim argumentom: uchebno-metodicheskij kompleks* [Differential equations with lagging argument: educational-methodical complex]. Moscow, Evrazijskij otkrytyy institut Publ., 2011. 155 p.
10. Bordovskii G. A., Kondratev A. S., Chouderi A. *Fizicheskie osnovi matematicheskogo modelirovaniya. Uchebnik i praktikum dlya bakalavriata i magistratury* [Physical foundations of mathematical modeling. Textbook and workshop for undergraduate and graduate programs]. Moscow, Yurait Publ., 2017. 320 p.
11. *Peremeshchenie tela pri pryamolinejnom ravnouskorennom dvizhenii bez nachal'noj skorosti* [Moving a body in a rectilinear uniformly accelerated motion without an initial speed]. URL:

<https://100ballov.kz/mod/page/view.php?id=2576>  
28.10.2021).

(accessed 12. Rivnoprискoreniі ruh [Uniformly accelerated motion]. URL:  
<https://goo.su/9Qv8> (accessed 17.10.2021).

Надійшла (received) 02.11.2021

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

**Гамаюн Ігор Петрович** доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/00000-0003-2009-4658>; e-mail: [ipgamayun@kpi.kharkov.ua](mailto:ipgamayun@kpi.kharkov.ua).

**Шашков Сергій Віталійович** Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5193-954X>; e-mail: [serikshash@gmail.com](mailto:serikshash@gmail.com).

**Гамаюн Игорь Петрович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/00000-0003-2009-4658>; e-mail: [ipgamayun@kpi.kharkov.ua](mailto:ipgamayun@kpi.kharkov.ua).

**Шашков Сергей Витальевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент, г. Харьков, Украина, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5193-954X>; e-mail: [serikshash@gmail.com](mailto:serikshash@gmail.com).

**Gamayun Igor Petrovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Software Engineering and Information Management Technologies; Kharkov, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/00000-0003-2009-4658>; e-mail: [ipgamayun@kpi.kharkov.ua](mailto:ipgamayun@kpi.kharkov.ua).

**Shashkov Serhii Vitaliyovich** – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", student, Kharkov, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5193-954X>; e-mail: [serikshash@gmail.com](mailto:serikshash@gmail.com).

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

## INFORMATION TECHNOLOGY

UDC 681.518:658.519

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.02.10

*V. Y. SOKOL, V. O. KRYKUN, M. O. BILOVA, I. D. PEREPELYTSYA, V. V. PUSTOVAROV*

### TOPIC SEGMENTATION METHODS COMPARISON ON COMPUTER SCIENCE TEXTS

The demand for the creation of information systems that simplifies and accelerates work has greatly increased in the context of the rapid informatization of society and all its branches. It provokes the emergence of more and more companies involved in the development of software products and information systems in general. In order to ensure the systematization, processing and use of this knowledge, knowledge management systems are used. One of the main tasks of IT companies is continuous training of personnel. This requires export of the content from the company's knowledge management system to the learning management system. The main goal of the research is to choose an algorithm that allows solving the problem of marking up the text of articles close to those used in knowledge management systems of IT companies. To achieve this goal, it is necessary to compare various topic segmentation methods on a dataset with a computer science texts. Inspec is one such dataset used for keyword extraction and in this research it has been adapted to the structure of the datasets used for the topic segmentation problem. The TextTiling and TextSeg methods were used for comparison on some well-known data science metrics and specific metrics that relate to the topic segmentation problem. A new generalized metric was also introduced to compare the results for the topic segmentation problem. All software implementations of the algorithms were written in Python programming language and represent a set of interrelated functions. Results were obtained showing the advantages of the Text Seg method in comparison with TextTiling when compared using classical data science metrics and special metrics developed for the topic segmentation task. From all the metrics, including the introduced one it can be concluded that the TextSeg algorithm performs better than the TextTiling algorithm on the adapted Inspec test data set.

**Keywords:** topic segmentation, TextTiling, TextSeg, Inspec, IT Companies, computer science texts.

*V. Є. СОКОЛ, В. О. КРИКУН, М. О. БІЛОВА, І. Д. ПЕРЕПЕЛИЦЯ, В. В. ПУСТОВАРОВ*

### ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ СЕГМЕНТАЦІЇ ТЕМ ЗА ТЕКСТАМИ З КОМП'ЮТЕРНИХ НАУК

Попит на створення інформаційних систем, що спрощують і прискорюють роботу, значно зріс в умовах стрімкої інформатизації суспільства та всіх сфер діяльності. Це пов'язано з появою все більшої кількості компаній, що займаються розробкою програмних продуктів та інформаційних систем в цілому. З метою забезпечення систематизації, обробки та використання цих знань використовуються системи управління знаннями. Одним з головних завдань ІТ-компаній є постійне навчання персоналу. Для цього потрібно експортувати контент із системи управління знаннями компанії в систему управління навчанням. Основною метою дослідження є вибір алгоритму, який дозволяє вирішити задачу розмітки тексту статей, близьких до тих, що використовуються в системах управління знаннями ІТ-компаній. Для досягнення цієї мети необхідно порівняти різні методи сегментації тем на наборі даних з текстами з комп'ютерних наук. Inspec є одним із таких наборів даних, які використовуються для виділення ключових слів, і у цьому дослідженні він був адаптований до структури наборів даних, які використовуються для проблеми сегментації тем. Методи TextTiling і TextSeg були використані для порівняння деяких добре відомих показників науки про дані та конкретних показників, які стосуються проблеми сегментації тем. Також була введена нова узагальнена метрика для порівняння результатів для задачі сегментації тем. Усі програмні реалізації алгоритмів написані мовою програмування Python і представляють собою набір взаємопов'язаних функцій. Отримано результати, що демонструють переваги методу Text Seg у порівнянні з TextTiling з використанням класичних метрик науки про дані та спеціальних метрик, розроблених для завдання сегментації тем. З усіх метрик, включаючи введenu, можна зробити висновок, що алгоритм TextSeg працює краще, ніж алгоритм TextTiling на адаптованому наборі тестових даних Inspec.

**Ключові слова:** сегментація тем, TextTiling, TextSeg, Inspec, ІТ-компанії, тексти з комп'ютерних наук.

*V. E. SOKOL, V. A. KRYKUN, M. A. BELOVA, I. D. PEREPELICA, V. V. PUSTOVAROV*

### СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ТЕМ НА ТЕКСТАХ ПО КОМПЬЮТЕРНЫМ НАУКАМ

Спрос на создание информационных систем, упрощающих и ускоряющих работу, значительно возрос в условиях быстрой информатизации общества и всех его сфер деятельности. Это способствует появлению все большего числа компаний, занимающихся разработкой программных продуктов и информационных систем в целом. Для обеспечения систематизации, обработки и использования этих знаний используются системы управления знаниями. Одна из основных задач ИТ-компаний - непрерывное обучение персонала. Это требует экспорта контента из системы управления знаниями компании в систему управления обучением. Основная цель исследования - выбрать алгоритм, позволяющий решить задачу разметки текста статей, близких к тем, которые используются в системах управления знаниями ИТ-компаний. Для достижения этой цели необходимо сравнить различные методы тематической сегментации в наборе данных с текстами по компьютерным наукам. Inspec - один из таких наборов данных, используемых для извлечения ключевых слов, и в данном исследовании он был адаптирован к структуре наборов данных, используемых для тематической сегментации. Методы TextTiling и TextSeg использовались для сравнения некоторых хорошо известных показателей науки о данных и конкретных показателей, которые относятся к проблеме сегментации темы. Также была введена новая обобщенная метрика для сравнения результатов для задачи сегментации тем. Все

© V. Y. Sokol, V. O. Krykun, M. O. Bilova, I. D. Perepelytsya, V. V. Pustovarov, 2021

программные реализации алгоритмов написаны на языке программирования Python и представляют собой набор взаимосвязанных функций. Были получены результаты, показывающие преимущества метода TextSeg по сравнению с TextTiling при сравнении с использованием классических метрик науки о данных и специальных метрик, разработанных для задачи тематической сегментации. По всем показателям, включая предложенный, можно сделать вывод, что алгоритм TextSeg работает лучше, чем алгоритм TextTiling на адаптированном наборе тестовых данных Inspec.

**Ключевые слова:** тематическая сегментация, TextTiling, TextSeg, Inspec, ИТ-компания, тексты по компьютерным наукам.

**Introduction.** In the context of the rapid informatization of society and all its branches, both daily and professional activities, the demand for the creation of information systems that simplifies and accelerates work has greatly increased. This need provokes the emergence of more and more companies involved in the development of software products and information systems in general. Also, at the same time, there is a development of technologies, working tools in the whole market and the accumulation of practical experience of individual IT companies. In order to ensure the systematization, processing and use of this knowledge, knowledge management systems are used.

One of the main tasks of IT companies is continuous training of personnel to improve their qualifications and ensure greater work efficiency. For this purpose, content from the company's knowledge management system must be exported to the learning management system. To export this content, it must be marked up, which means segmented into different thematic areas with a specific set of keywords. In order to segment the text into thematic sections, it is necessary to solve the problem of topic segmentation, for which some well-known methods can be used. These methods have worked well when testing, mainly on news texts. But the main topics, knowledge of which is accumulating in IT companies, is computer science.

The purpose of this work is to compare the effectiveness of some well-known topic segmentation methods on a dataset on computer science topics, which will help in the future to implement an appropriate component for a knowledge management system when preparing content for export to a learning management

system.

**Topic segmentation methods classification.** The task of topic segmentation is to select from the text those parts that will describe only certain topics that are different in nature (the task of linear segmentation) or those parts that will be different in the degree of description detailing of a particular topic, in other words, to highlight some subtopics (hierarchical segmentation task) [1].

Topic segmentation methods classification is given on fig. 1.

Some methods use lexical cohesion or similarity metric that characterizes the similarity degree of some parts of the text, while looking for areas that are characterized by the least similarity and are perceived as segment boundaries or vice versa, group areas that are characterized by the greatest similarity using clustering [1]. Examples of these methods are:

- TextTiling (Hearst 1997) [2];
- LCSEg (Galley et al. 2005) that uses lexical chains and is applied mostly to dialogue data [3];
- some supervised classification approaches (Georgescu et al 2006) [4];
- Dot-Plotting (Reynar 1994) [5] that is the most famous one from clustering approaches.

Methods that use generative models involve the creation of a specific model that characterizes the text generated as a set of topics, which in turn generate the original vocabulary characteristic of this topic. Based on this, if it is possible to distinguish topics from the existing vocabulary in the text, you can determine the boundaries

of these existing generated topics in the same way [1]. Examples of these approaches are:

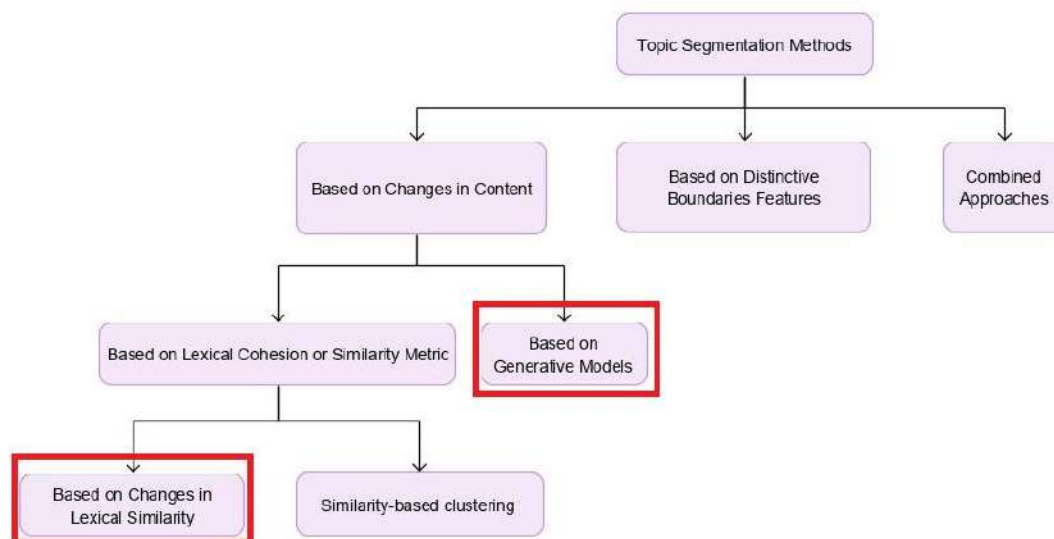


Fig. 1. Topic segmentation methods classification

- Hidden Markov Models methods (Mulbregt et al. 1999 [6]; Yamron et al. 1998 [7]);
- Latent Concept Modeling (Blei and Moreno 2001) [8], namely the Probabilistic Latent Semantic Indexing (pLSI) and Latent Dirichlet Allocation methods;
- Compact Language Modeling methods, such as TextSeg (Utiyama and Isahara 2001) [9] and its modification with LDA by Eisenstein and Barzilay (2008) [10].

**Evaluation metrics.** Many classification problems use a standard approach based on the calculation of precision, recall, and F-score metrics. This approach can be applied to the problem of topic segmentation, but it does not consider the degree of approximation of the correct answer from the actual segment boundaries. Therefore, in order to assess the quality of classification problems, several other approaches have been proposed [1].

The first measure was  $P_k$ , which indicates the probability of segmentation error, so the value of this measure can be obtained in the range from 0 to 1 [1, 11]. To calculate the value of  $P_k$ , the concept of a window the size of  $k$  sentences is used, which moves along the entire text. The indicative function  $\delta_s(i, j)$  is 1 if the sentences  $i$  and  $j$  belong to the same segment, and 0 - otherwise. To determine whether there is an error between the correct segmentation  $R$  and the predicted segmentation  $H$ , the XOR operator is used, which is equal to 1 in the case of discrepancy of binary operands. Thus, the value of  $P_k$  is calculated by the following formula, where  $N$  is the number of sentences, and  $k$  is the length of the window [1, 11]:

$$P_k = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} \delta_H(i, i+k) \oplus \delta_R(i, i+k)}{(N-k)}. \quad (1)$$

The value of  $P_k$  has significantly improved the quality of evaluation compared to classical metrics, but there are possible situations when either false negative boundaries or false positive ones go unnoticed [1, 12]. To solve this problem, a measure  $WD$  was proposed, in which  $b_H(i, j)$  determines the number of boundaries between the sentences  $i$  and  $j$ , which was provided by the algorithm. Based on this value,  $WD$  can be calculated as follows [1, 12]:

$$WD = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} [|b(i, i+k) - b_R(i, i+k)| > 0]}{(N-k)}. \quad (2)$$

**Methods. TextTiling.** One of the topic segmentation algorithms is TextTiling, which involves dividing the text into paragraphs depending on their thematic characteristics. To characterize the thematic structure, features based on the metrics of lexical co-occurrence patterns are used. The algorithm itself consists of three main stages [2]:

- tokenization (and appropriate pre-processing of the text);
- lexical score determination;
- segment boundaries identification.

The purpose of the first stage (tokenization stage) is

to bring the original data set to a single format, which includes pre-processing and data filtering. Also important points of the tokenization stage are bringing all words to one register, filtering stop words (which are frequent in the language and do not have any specific thematic characteristics of the text), as well as bringing words to the original morphological form (lemmatization). At the end of the pre-processing, pseudo-sentences containing  $w$  words are formed in order to bring the sizes of sentences to the same values. The obtained pseudo-sentences are called token-sequences in terms of the given algorithm [2].

In the second stage of the algorithm, lexical similarity metrics are determined for each gap between the token sequences, i.e. between some blocks of text before and after the gap. There are several approaches to determining this value. In the method based on the comparison of blocks, the general similarity between the lexical characteristics of adjacent blocks is calculated. The length of the block is marked as  $k$  and is the number of sentences that are compared with each other and characterizes the approximate size of the topic segment. If the gap between certain token sequences is denoted as  $i$ , then the value  $score(i)$  is assigned to it. The  $score(i)$  value characterizes how similar the blocks are from the token sequence  $i-k$  to  $i$  and from the token sequence  $i+1$  to  $i+k+1$ . The corresponding blocks are denoted as  $b1$  ( $b1 = \{token-sequence(i-k), \dots, token-sequence(i)\}$ ) and  $b2$  ( $b2 = \{token-sequence(i+1), \dots, token-sequence(i+k+1)\}$ ). Based on this, the  $score(i)$  value (from 0 to 1) is calculated by the following formula, where  $t$  includes all words that were processed at the tokenization stage, except all the stop words, and  $w_{t,b}$  denotes the value from the table (in this case the number of occurrences) for the word  $t$  in block  $b$  [2]:

$$score(i) = \frac{\sum_t w_{t,b_1} w_{t,b_2}}{\sqrt{\sum_t w_{t,b_1}^2 \sum_t w_{t,b_2}^2}} \quad (3)$$

The last third stage of the algorithm is to determine the boundaries between the segments. For each interval, a depth score is determined, i.e. it determines how evident are the signs of topic change between the two sides to the left and right of this gap. This depth score is calculated as the sum of the differences between the left and right similarity values between the largest vertex on each side of the gap (left and right, respectively) to the value in that gap. So, the deeper valleys on the diagram get higher values of this depth score. The depth scores are sort and boundaries are determined - the higher the value, the more likely the segment boundary is in this gap [2].

**Methods. TextSeg.** TextSeg is one of the examples of generative methods of topic segmentation, the essence of which is the assumption that the text is generated based on a certain sequence of topics, which in turn have their own models of language, i.e. the probabilities of meeting words. In this case, having such models, segmentation is performed in such a way as to maximize the likelihood, calculated from the data from which these language models were formed. This approach does not use data to train the model, building language models directly from

the data for which segmentation is performed [1, 9].

Assume that there is some text composed of n words ( $W=w_1w_2 \dots w_n$ ), while the desired segmentation is expressed as  $S=s_1s_2 \dots s_m$ , where m is the number of segments. Suppose that  $n_i$  is the number of words in the segment  $S_i$  and  $w_j^i$  defines the j-word in the segment  $S_i$ , then  $W_i = w_1^i w_2^i \dots w_{n_i}^i$ . Assume that  $f_i(w_j^i)$  denotes the number of words in  $W_i$  the same as  $w_j^i$ ; k – is the number of unique words in W.

To find the most likely segmentation, the cost of segmentation C(S) has to be minimized. The formula for calculating C(S) value is expressed as [9]:

$$C(S) = \sum_{i=1}^m c(w_1^i w_2^i \dots w_{n_i}^i | n, k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \log \frac{n_i + k}{f_i(w_j^i) + 1} + \log n. \quad (4)$$

It is possible to use words or individual sentences as structural units for algorithm. Assume that the sentences are chosen as structural units, then  $g_i$  defines the interval between several adjacent sentences i and i+1. In this case, it is possible to determine the graph  $G = \langle V, E \rangle$  (V is the set of vertices, E is the set of edges), where:

$$\begin{aligned} V &= \{g_i | 0 \leq i \leq n\} \\ E &= \{e_{ij} | 0 \leq i < j \leq n\} \end{aligned} \quad (5)$$

The edge  $e_{ij}$  begins in  $g_i$  and ends in  $g_j$ ,

respectively.

The algorithm can be divided into 2 stages [9]:

- 1) calculate the value of  $c_{ij} = c(w_{i+1}w_{i+2} \dots w_j | n, k)$  for all the corresponding edges  $e_{ij}$  where  $0 \leq i < j \leq n$ ;
- 2) find the least cost path between vertices  $g_0$  and  $g_n$ .

To find the least cost path, any algorithm that solves a given problem can be used. For example, an approach based on dynamic programming, one of which is the Dijkstra algorithm can be applied [9].

**Method adaptation and implementations for testing.** In order to compare the algorithms according to the given metrics, it is necessary to have their software implementations, in this case for the TextTiling and TextSeg methods. The algorithm of the TextTiling method is shown on fig. 2 and for the TextSeg method on fig. 3. Models are presented in the UML activity diagram notation.

The peculiarity of the TextSeg algorithm adaptation for the problem is the process of creating a matrix of estimates and its size. The original algorithm involves the input of text and the creation of a matrix of estimates that has the size of the number of words in the text. According to this original version, the boundaries of the segments are defined, which do not have to be at the end of the sentence, because they can also be in the middle of the sentences.

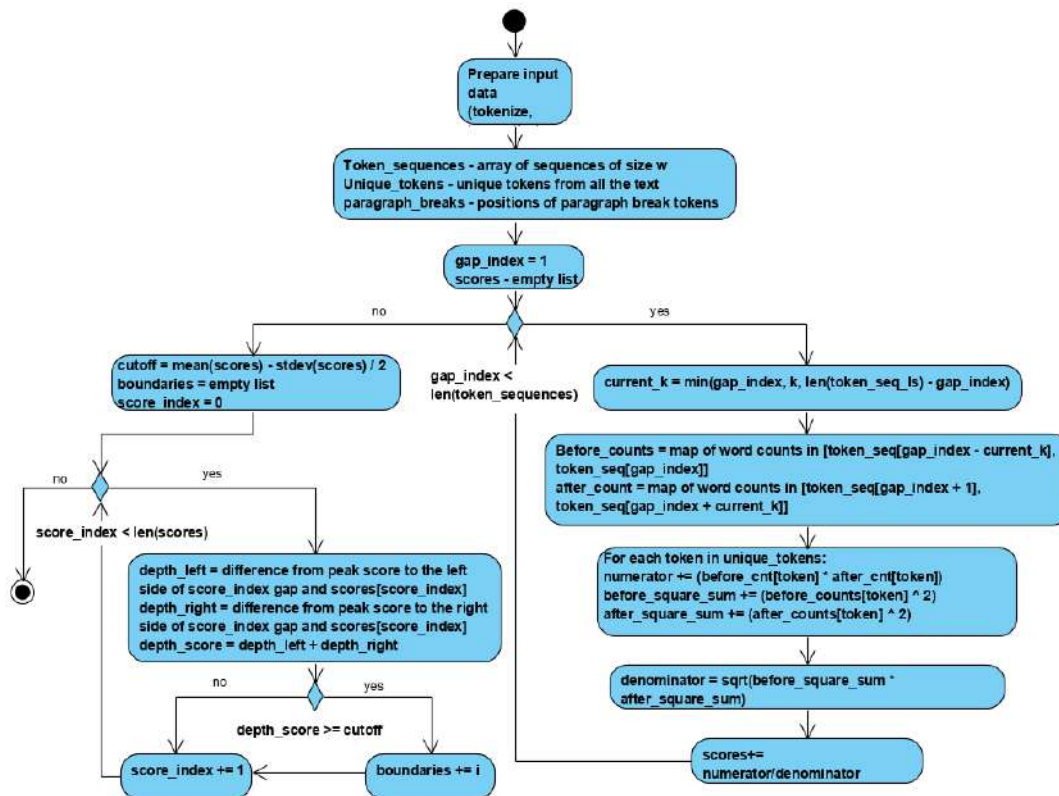


Fig. 2. TextTiling algorithm (algorithm)

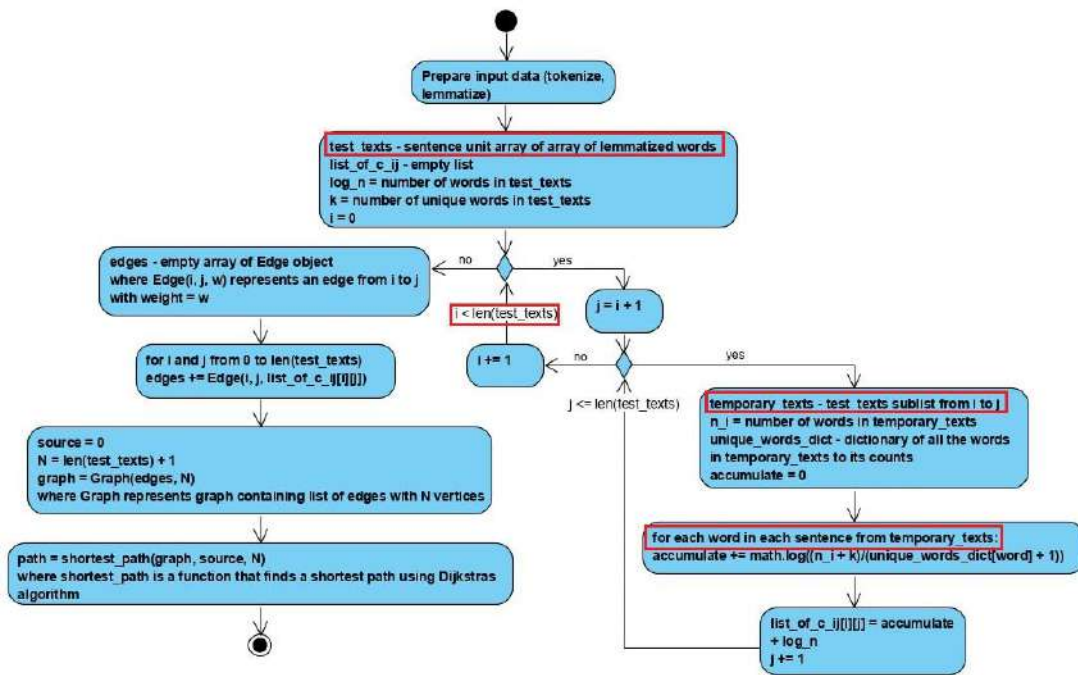


Fig. 3. TextSeg algorithm (algorithm)

Thus, in the given problem solution segment boundaries should be exclusively within the limits of the end of the previous sentence. The last available index in the rows and columns of the estimates matrix will be equal to the number of sentences fed to the input of the topic segmentation algorithm. Element  $c_{ij}$  of the estimates matrix corresponds to the segment estimate that begins before the sentence  $i$  beginning and ends after the sentence  $j$ . In the original algorithm, the process of pre-segmentation into sentences is absent, and that is why the number of words between the elements of the matrix  $i$  and  $j$  in the original algorithm is always equal to one.

It should be noted that in fig. 3 some elements are highlighted to describe points that show how this algorithm was adapted.

All software implementations of the algorithms are written in Python and represent a set of interrelated functions. In the future, the program code can be supplemented with logic that will allow deploying the component for topic text segmentation as a restful web service for its interconnection with the component of the knowledge management system.

**Results. Inspec Dataset Adaptation.** To test the effectiveness of these algorithms, we need to generate test data, for which the correct answers must be marked. For these purposes, in the field of topic segmentation, a large number of test data sets are used on various topics, including news broadcasts. However, for the purposes of this research, it is necessary to use data that are close to those used for organizations in the field of information technology. There are several such test data sets on the subject of computer science, which were created for the task of forming a set of keywords and phrases. For example, Inspec consists of 2,000 different abstracts of articles on computer science, taken from scientific

sources, and related keywords and phrases,

Accordingly, this test data set Inspec was adapted to the problem of topic segmentation of the text. This uses an approach similar to that used by Choi in his work and many others who took the same test data set or adapted it, based on the same data combination principle to check the quality of text segmentation according to their thematic content. The data set used in Choi's work consists of artificially generated documents based on documents from the Brown corpus. This approach involves random selection of a document from the Brown corpus, then the first 3–11 sentences are taken from this document and these sentence are perceived as a segment. A combination of 10 such segments creates a single text in the Choi dataset [13].

The final data set for testing algorithms consists of fifty texts, each of which is ten segments long, each of the segments is one of the abstracts included in the Inspec. Accordingly, the boundaries of the segments are considered as a transition between one text from Inspec to another.

Two approaches to the formation of text units were used for testing. The first one is that individual sentences are the input units of the algorithm. The second one is to combine the individual sentences of each segment into paragraphs with a maximum length of three sentences. For example, if the segment consists of 7 sentences, then the first unit will be 3 sentences long, the second one will be also 3 sentences long, and the third one will be 1 sentence long.

**Results. Algorithm efficiency comparison.** To determine the efficiency of the algorithms, 5 metrics were used, namely precision, recall, F-score,  $P_k$ , WD. Accordingly, lower values of  $P_k$  and WD indicate better results of topic segmentation. A comparison of these

metrics for algorithms is given in table 1 for the first test data approach (without combining sentences in paragraphs) and in table 2 for the second one (with combining some sentences of the segment in paragraphs).

Table 1 – Metric values comparison for the first test data approach

Algorithm	Precision	Recall	F-score	$P_k$	WD
TextTiling	0.2676	0.34	0.2995	0.3462	0.3973
TextSeg	0.8526	0.74	0.7923	0.1082	0.1110

Table 2 – Metric values comparison for the second test data approach

Algorithm	Precision	Recall	F-score	$P_k$	WD
TextTiling	0.5662	0.6178	0.5909	0.3054	0.2848
TextSeg	0.9417	0.8133	0.8728	0.0866	0.0866

It should be noted that in table 1 and table 2 the results of TextTiling are given with the parameters  $w = 30$ ,  $k = 5$ , and conservative measure for cutoff (HC). For better visualization of the results, the algorithms are compared using histograms for each metric (fig. 4–8).

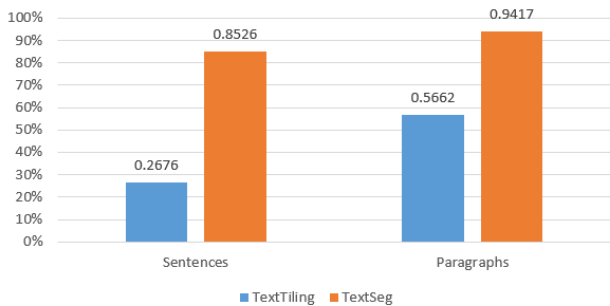


Fig. 4. Precision results comparison

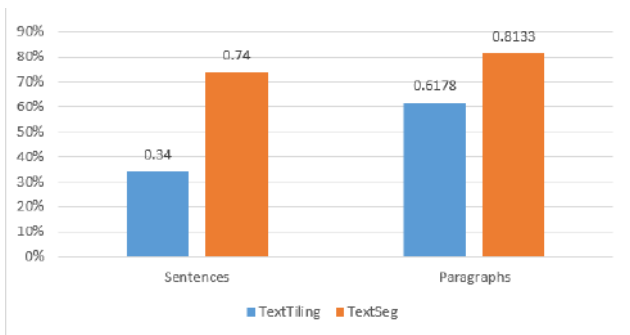


Fig. 5. Recall results comparison

In order to summarize the results, it was decided to introduce a new metric that considers each of the above, namely the F-metric in combination with the error probabilities of the classifier  $P_k$  and WD. If this metric is called  $T_{gen}$ , then its calculation can be expressed in the form given in the formula:

$$T_{gen} = \frac{\left( \frac{1}{3P_k'} + \frac{1}{3WD'} + \frac{F_{\beta}'}{3} \right)}{100} \quad (6)$$

where  $P_k' - P_k$  value in percentage;

$WD' - WD$  value in percentage;  
 $F_{\beta}' - F_{\beta}$  (F-score) value in percentage.

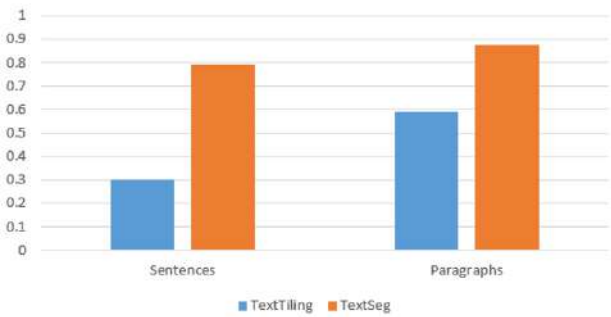


Fig. 6. F-score results comparison

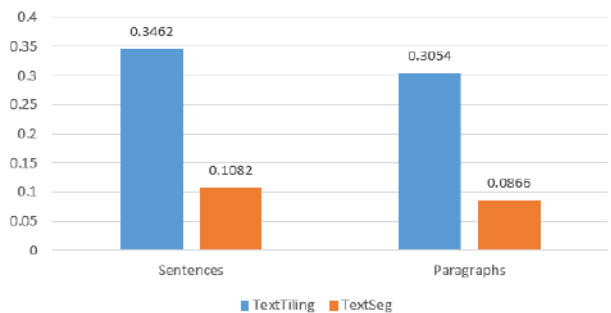


Fig. 7. Segmentation error probability ( $P_k$ ) results comparison

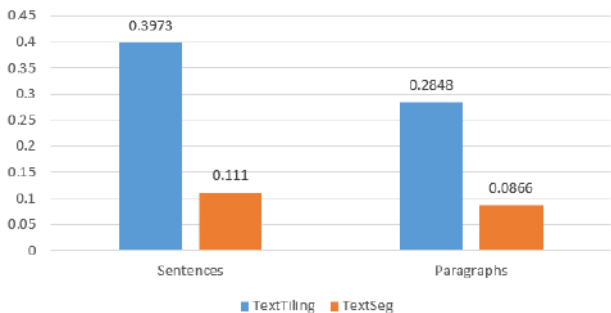


Fig. 8. Windows diff (WD) results comparison

Each of the metrics, which is generalized in  $T_{gen}$ , was given the same weighting factor. In this case, the error probability value was presented in reverse due to the fact that larger values of  $P_k$  and WD describe a worse algorithm, in contrast to the  $F_{\beta}$  value.

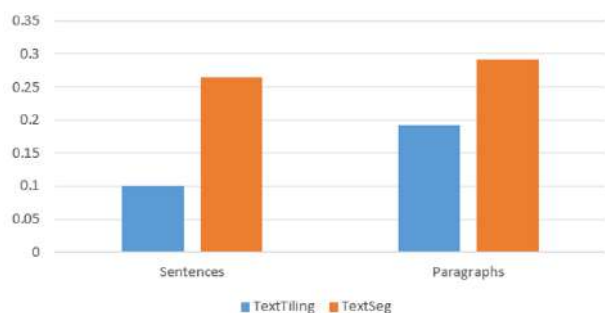
A comparison of this entered metric  $T_{gen}$  for algorithms is given in table 3 for two different test data approaches.

Table 3 –  $T_{gen}$  values comparison for different test data approaches

Algorithm	First test data approach (sentences level)	Second test data approach (paragraphs level)
TextTiling	0.1	0.1972
TextSeg	0.2647	0.2917

To better illustrate the difference in the indicator  $T_{gen}$ , the results of the algorithms are shown in fig. 9.



Fig. 9.  $T_{gen}$  results comparison

Therefore, from all the above metrics, including the introduced one it can be concluded that the TextSeg algorithm performs better than the TextTiling algorithm on the adapted Inspec test data set.

**Conclusions.** This paper includes the application of existing and well-known topic segmentation methods on computer science texts. To compare the performance of the algorithms, the Inspec dataset was adapted to a structure that is widely used in the topic segmentation problem. Results were obtained showing the advantages of the Text Seg method in comparison with TextTiling when compared using classical data science metrics and special metrics developed for the topic segmentation task.

#### References

1. Purver M. Topic Segmentation. *Spoken Language Understanding*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2011, P. 291–317.
2. Hearst M. A. TextTiling: Segmenting Text into Multi-paragraph Subtopic Passages. *Computational Linguistics*. 1997. № 23 (1). P. 33–64.
3. Galley M., McKeown K., Fosler-Lussier E., Jing H. Discourse segmentation of multi-party conversation. *Proceedings of the 41st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, 2003. P. 562–569.
4. Georgescu M, Clark A and Armstrong S. Word distributions for thematic segmentation in a support vector machine approach. *Proceedings of the 10th Conference on Computational Natural Language Learning (CoNLLX)*. New York City, New York, 2006. P. 101–108.
5. Reynar J. An automatic method of finding topic boundaries. *Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*. Association for Computational Linguistics, LasCruces, NM. 1994. P. 331–333.
6. Mulbregt P. V., Carp I., Gillick L., Lowe S., Yamron J. Segmentation of automatically transcribed broadcast news text. *Proceedings of the DARPA Broadcast News Workshop*. Morgan Kaufmann. 1999. P. 77–80.
7. Yamron J., Carp I., Gillick L., Lowe S., van Mulbregt P. A hidden Markov model approach to text segmentation and event tracking. *Proceedings of the IEEE Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1998. P. 333–336.
8. Blei D., Moreno P. Topic segmentation with an aspect hidden Markov model. *Proceedings of the 24th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. 2001. P. 343–348.

9. Utiyama M., Isahara H. A Statistical Model for Domain-Independent Text Segmentation. *Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2001. P. 499–506.
10. Eisenstein J., Barzilay R. Bayesian unsupervised topic segmentation *Proceedings of the 2008 Conference Empirical Methods in Natural Language Processing, Association for Computational Linguistics, Honolulu, Hawaii*. 2008. P. 334–343.
11. Beeferman D, Berger A., Lafferty JD. Statistical models for text segmentation. *Machine Learning*. 1999. № 34(1–3). P. 177–210.
12. Pevzner L and Hearst M. A critique and improvement of an evaluation metric for text segmentation. *Computational Linguistics*. 2002. № 28 (1). P. 19–36.
13. Choi F. Advances in Domain Independent Linear Text Segmentation *Proceedings of 1st Meeting of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, 2000. P. 26–33.

#### References (transliterated)

1. Purver M. Topic Segmentation. *Spoken Language Understanding*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2011, pp. 291–317.
2. Hearst M. A. TextTiling: Segmenting Text into Multi-paragraph Subtopic Passages. *Computational Linguistics*. 1997. no 23 (1). pp. 33–64.
3. Galley M., McKeown K., Fosler-Lussier E., Jing H. Discourse segmentation of multi-party conversation. *Proceedings of the 41st Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, 2003. pp. 562–569.
4. Georgescu M, Clark A and Armstrong S. Word distributions for thematic segmentation in a support vector machine approach. *Proceedings of the 10th Conference on Computational Natural Language Learning (CoNLLX)*. New York City, New York, 2006. pp. 101–108.
5. Reynar J. An automatic method of finding topic boundaries. *Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*. Association for Computational Linguistics, LasCruces, NM. 1994. pp. 331–333.
6. Mulbregt P. V., Carp I., Gillick L., Lowe S., Yamron J. Segmentation of automatically transcribed broadcast news text. *Proceedings of the DARPA Broadcast News Workshop*. Morgan Kaufmann. 1999. pp. 77–80.
7. Yamron J., Carp I., Gillick L., Lowe S., van Mulbregt P. A hidden Markov model approach to text segmentation and event tracking. *Proceedings of the IEEE Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 1998. pp. 333–336.
8. Blei D., Moreno P. Topic segmentation with an aspect hidden Markov model. *Proceedings of the 24th Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*. 2001. pp. 343–348.
9. Utiyama M., Isahara H. A Statistical Model for Domain-Independent Text Segmentation. *Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*. 2001. pp. 499–506.
10. Eisenstein J., Barzilay R. Bayesian unsupervised topic segmentation *Proceedings of the 2008 Conference Empirical Methods in Natural Language Processing, Association for Computational Linguistics, Honolulu, Hawaii*. 2008. P. 334–343.
11. Beeferman D, Berger A., Lafferty JD. Statistical models for text segmentation. *Machine Learning*. 1999. no 34(1–3). pp. 177–210.
12. Pevzner L and Hearst M. A critique and improvement of an evaluation metric for text segmentation. *Computational Linguistics*. 2002. no 28 (1). pp. 19–36.
13. Choi F. Advances in Domain Independent Linear Text Segmentation *Proceedings of 1st Meeting of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, 2000. pp. 26–33.

Received 13.10.2021

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

**Сокол Володимир Євгенович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>; e-mail: [vlad.sokol@gmail.com](mailto:vlad.sokol@gmail.com)

**Крикун Віталій Олександрович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2576-1001>; e-mail: [vetall1999real@gmail.com](mailto:vetall1999real@gmail.com)

**Білова Марія Олексіївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)

**Перепелиця Іван Дмитрович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7683-8780>; e-mail: [IvanPerepelytsya@gmail.com](mailto:IvanPerepelytsya@gmail.com)

**Пустоваров Володимир Володимирович** – кандидат технічних наук, начальник групи, Харківське представництво генерального Замовника - Державного космічного агентства України; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3944-5771>; e-mail: [Harkov11978@gmail.com](mailto:Harkov11978@gmail.com)

**Сокол Владимир Евгеньевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>; e-mail: [vlad.sokol@gmail.com](mailto:vlad.sokol@gmail.com)

**Крыкун Виталий Александрович** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2576-1001>; e-mail: [vetall1999real@gmail.com](mailto:vetall1999real@gmail.com)

**Белова Мария Алексеевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)

**Перепелиця Іван Дмитрович** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7683-8780>; e-mail: [IvanPerepelytsya@gmail.com](mailto:IvanPerepelytsya@gmail.com)

**Пустоваров Владимир Владимирович** – кандидат технических наук, начальник группы, Харьковское представительство генерального Заказчика – Государственного космического агентства Украины; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3944-5771>; e-mail: [Harkov11978@gmail.com](mailto:Harkov11978@gmail.com)

**Sokol Volodymyr Yevhenovych** – PhD, Associate Professor, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4689-3356>; e-mail: [vlad.sokol@gmail.com](mailto:vlad.sokol@gmail.com)

**Krykun Vitalii Oleksandrovich** – National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2576-1001>; e-mail: [vetall1999real@gmail.com](mailto:vetall1999real@gmail.com)

**Bilova Mariia Oleksiivna** – PhD, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7002-4698>; e-mail: [missalchem@gmail.com](mailto:missalchem@gmail.com)

**Perepelytsya Ivan Dmytrovich** – PhD, National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7683-8780>; e-mail: [IvanPerepelytsya@gmail.com](mailto:IvanPerepelytsya@gmail.com)

**Pustovarov Volodymyr Volodymyrovich** – PhD, group leader, Kharkiv office of the General Customer - State Space Agency of Ukraine.; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3944-5771>; e-mail: [Harkov11978@gmail.com](mailto:Harkov11978@gmail.com)

*A. M. KOPP, D. L. ORLOVSKYI, D. ERSOYLEYEN*

## **AN APPROACH TO ANALYSIS OF ARCHIMATE APPLICATION ARCHITECTURE MODELS USING THE SOFTWARE COUPLING METRIC**

Applications architecture is the baseline of any organizational activity, which main goal is to provide the executional environment for business processes in order to deliver products or services to satisfy customer needs and generate revenue. Nowadays, large software engineering projects always begin with the architecture design phase, despite the waterfall or agile methodology is used by a software development team. Applications architecture design is the most important and, at the same time, error-prone stage of the whole software engineering project. It is well-known that design shortcomings made on the design phase may increase drastically to testing and maintenance phases. Further costs to defects fixing may be hundred times higher in the later project stages in compare to the design stage on which applications architecture is defined. Common system design solutions, which were proven on practice and used in many projects, are known as architectural patterns. Software architecture patterns are considered as building block for system implementation. The most popular and efficient way to share architectural patterns are graphical models that used as any other blueprints of engineering solutions. Applications architecture models are built to represent system design, whereas, such models are already based on certain patterns as the industry best practices. Hence, in this paper we consider a relevant problem of applications architecture models analysis, which relevance is defined by those fact that designed blueprints of information systems and other software solutions should be carefully checked for all presumable inefficiencies in order to avoid extra efforts and related costs for defects fixing in the later project stages. It is proposed to use ArchiMate enterprise architecture modeling language, since it can be used not only to represent applications architecture, but is connection to business and technology layers. In order to evaluate applications architecture models, respective ArchiMate metamodel is considered and represented as labeled directed graph, and coupling software metric is selected for analysis. Sample calculations are demonstrated, obtained results are discussed, conclusion and future work directions are formulated.

**Keywords:** applications architecture, software engineering, software design, model analysis, software metrics, coupling metric.

*A. M. КОПП, Д. Л. ОРЛОВСЬКИЙ, Д. ЕРСОЙЛЕЄН*

## **ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ МОДЕЛЕЙ АРХІТЕКТУРИ ЗАСТОСУНКІВ ARCHIMATE З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТРИКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

Архітектура застосунків є основою будь-якої організаційної діяльності, головною метою якої є забезпечення середовища для виконання бізнес-процесів з метою надання продуктів або послуг для задоволення потреб клієнтів і отримання прибутку. На сьогоднішній день великі проекти програмної інженерії завжди починаються з фази проектування архітектури, незважаючи на те, що команда розробників програмного забезпечення використовує водоспад або ж гнучку методологію. Проектування архітектури застосунків є найважливішим і, водночас, найбільш вразливим до помилок етапом усього проекту з розробки програмного забезпечення. Добре відомо, що значущість недоліків, припущених на етапі проектування, може різко збільшитися при переході до етапів тестування та супроводу. Подальші витрати на виправлення дефектів можуть бути у сто разів вищими на більш пізніх стадіях проекту, ніж на етапі проектування, на якому визначається архітектура застосунків. Поширені рішення з проектування систем, які перевірені на практиці і використовуються в багатьох проектах, відомі як архітектурні шаблони. Шаблони архітектури програмного забезпечення розглядаються як будівельні блоки для реалізації усієї системи. Найпопулярнішим і ефективним способом обміну архітектурними шаблонами є графічні моделі, які використовуються як і будь-які інші креслення інженерних рішень. Моделі архітектури застосунків створені для представлення проектів системи, причому такі моделі вже базуються на певних шаблонах як найкращих галузевих практиках. Отже, в даній роботі розглядається актуальна проблема аналізу моделей архітектури застосунків, важливість якої визначається тим, що розроблені проекти інформаційних систем та інших програмних рішень повинні бути ретельно перевірені на наявність усіх імовірних неефективних рішень для того, щоб уникнути додаткових зусиль і пов'язаних з цим витрат, спрямованих на усунення дефектів на пізніх стадіях проекту. Пропонується використовувати мову моделювання архітектури підприємства ArchiMate, оскільки її можна використовувати для представлення не тільки архітектури застосунків, а і її зв'язку з рівнями бізнесу та технологій. Для аналізу моделей архітектури застосунків була розглянута відповідна метамодель ArchiMate та здійснено її подання у вигляді розміченого орієнтованого графа, а також для аналізу було обрано метрику зв'язності програмного забезпечення. Продемонстровано приклад розрахунків та проаналізовано отримані результати, сформувано висновки та визначено напрямки подальшої роботи.

**Ключові слова:** архітектура застосунків, програмна інженерія, проектування програмного забезпечення, аналіз моделей, метрики програмного забезпечення, метрика зв'язності.

*A. M. КОПП, Д. Л. ОРЛОВСКИЙ, Д. ЭРСОЙЛЕЕН*

## **ПОДХОД К АНАЛИЗУ МОДЕЛЕЙ АРХИТЕКТУРЫ ПРИЛОЖЕНИЙ ARCHIMATE С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТРИКИ СВЯЗАННОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Архитектура приложений является основой любой организационной деятельности, главной целью которой является обеспечение среды для выполнения бизнес-процессов с целью предоставления продуктов или услуг для удовлетворения потребностей клиентов и получения прибыли. На сегодняшний день крупные проекты программной инженерии всегда начинаются с фазы проектирования архитектуры, несмотря на то, что команда разработчиков программного обеспечения использует водопад или же гибкую методологию. Проектирование архитектуры приложений является важнейшим и одновременно наиболее уязвимым к ошибкам этапом всего проекта по разработке программного обеспечения. Хорошо известно, что значимость недостатков, предполагаемых на этапе проектирования, может резко увеличиться при переходе к этапам тестирования и сопровождения. Дальнейшие затраты на устранение дефектов могут быть в сто раз выше на более поздних стадиях проекта, чем на этапе проектирования, на котором определяется архитектура приложений. Распространенные решения по проектированию систем, проверенных на практике и используемых во многих проектах, известны как архитектурные шаблоны. Шаблоны архитектуры программного обеспечения рассматриваются как строительные блоки для реализации всей системы. Самым популярным и эффективным способом обмена архитектурными шаблонами являются графические модели, которые используются как и любые другие чертежи инженерных решений. Модели архитектуры приложений предназначены для представления проектов системы, причем такие модели уже базируются на определенных шаблонах как лучших отраслевых практиках. Следовательно, в данной работе рассматривается актуальная проблема анализа моделей архитектуры приложений, важность которой определяется тем, что разработанные проекты информационных систем и других программных решений должны быть тщательно проверены на наличие всех вероятных неэффективных

© A. M. Kopp, D. L. Orlovskiy, D. Ersoyleyen, 2021

решений для того, чтобы избежать дополнительных усилий и связанных с этим расходов, направленных на устранение дефектов на поздних стадиях проекта. Предлагается использовать язык моделирования архитектуры предприятия ArchiMate, поскольку его можно использовать для представления не только архитектуры приложений, но и ее связи с уровнями бизнеса и технологий. Для анализа моделей архитектуры приложений была рассмотрена соответствующая метамодель ArchiMate и осуществлено ее представление в виде размеченного ориентированного графа, а также для анализа была выбрана метрика связанности программного обеспечения. Продемонстрирован пример расчетов и проанализированы полученные результаты, сформированы выводы и определены направления дальнейшей работы.

**Ключевые слова:** архитектура приложений, программная инженерия, проектирование программного обеспечения, анализ моделей, метрики программного обеспечения, метрика связанности.

**Introduction.** Application architecture designs can be evaluated to ensure that quality attributes are met. Pre-implementation architectural approaches are used by system architects during the initial design and preparation stages before actual implementation begins. In contrast to implementation-oriented architecture compliance approaches, it is assessed whether the implemented system architecture matches the intended system architecture. Architectural conformance approach evaluates whether the implemented architecture is consistent with the proposed architecture specification and the objectives of the proposed architecture [1].

Architectural styles, approaches, or techniques are used within the software system design process to evaluate the software architecture in the pre-implementation phase. Approaches or techniques are design decisions that affect the control of the quality attribute response. Architectural styles or patterns describe the structure and interactions between system components [1].

There are software architecture methods in the systems design based on their quality attributes, such as Attribute Driven Design (ADD) [2] (see fig. 1).

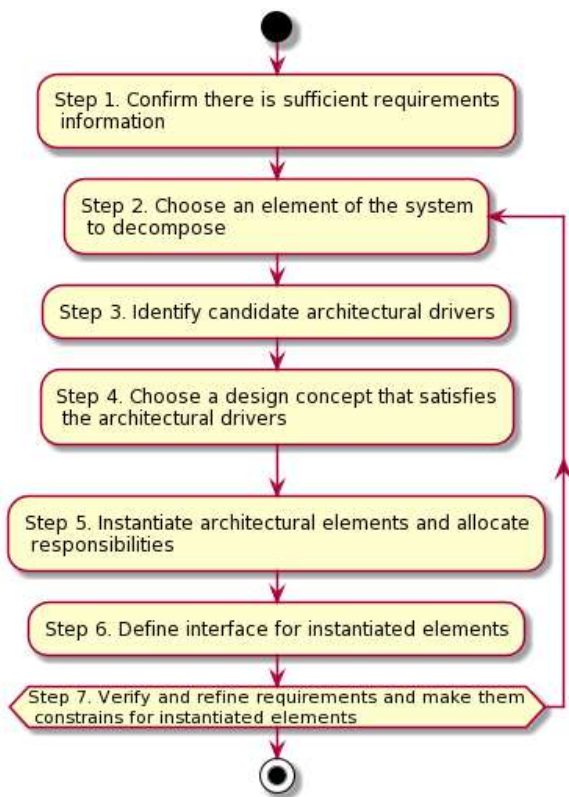


Fig. 1. ADD method steps [9].

The ADD method is an approach to the definition of software architecture, in which the design process is based on software quality attributes. ADD complies with the

recursive design process that decomposes the system or system element by applying the architectural tactics and models that satisfy its driving requirements. As shown in fig. 1 above, adding essentially follows the “plan, do, and check” cycle [3]:

- plan: quality attributes and design constraints are considered to select which types of elements will be used in the application architecture;
- do: elements are instantiated to satisfy quality attribute requirements (also referred as nonfunctional requirements) as well as functional requirements;
- check: the resulting design is analyzed to determine if the requirements are met.

This process is repeated until all architecturally significant requirements are met.

Also there are methods for assessing the conformity of quality attributes to software architecture design, such as the Architecture Tradeoff Analysis Method (ATAM) [4] (see fig. 2).

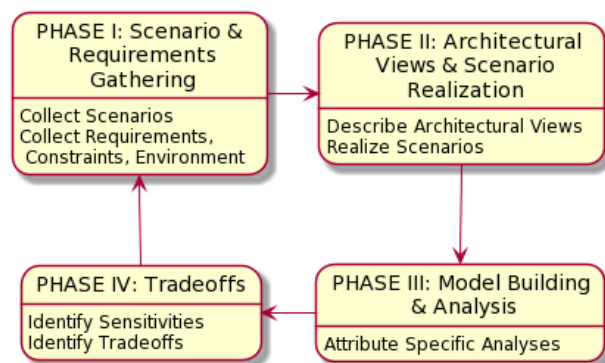


Fig. 2. ATAM method steps [11].

ATAM is a method for evaluating architecture-level designs that considers multiple quality attributes such as modifiability, performance, reliability and security in gaining insight as to whether the fully fleshed out incarnation of the architecture will meet its requirements. The method identifies trade-off points between these attributes, facilitates communication between stakeholders (such as user, developer, customer, maintainer) from the perspective of each attribute, clarifies and refines requirements, and provides a framework for an ongoing, concurrent process of system design and analysis [5].

**Problem statement.** It is well known that different architectural solutions have their strengths and weaknesses, which may affect development, testing, and maintenance stages of a software system. Therefore, the problem of applications architecture models analysis become relevant, since designed blueprints of the software system should be carefully checked for all presumable inefficiencies in order to avoid extra efforts and related costs for defects fixing in the later project stages.

This study aims on detection of strong and weak spots of software design solutions by analyzing applications architecture models. Research objective includes the process of applications architecture models analysis. Research subject considers the method for applications architecture models analysis. In order to achieve research goal, there should be selected applications architecture modeling language, defined its metamodel, and proposed measures for structural analysis of designed models.

**Materials and methods.** Methods ADD and ATAM follow a recursive process based on the quality attributes that the system must meet. At each stage, techniques and architectural patterns (or styles) are selected in case they satisfy certain qualities [1].

More holistic approach to architecture design and analysis (fig. 3) is proposed by the TOGAF (The Open Group Architecture Framework) [6]. The Architecture Development Methodology (ADM) is used to develop enterprise architecture (EA), which meets the needs of the organization of business and information technologies (IT).

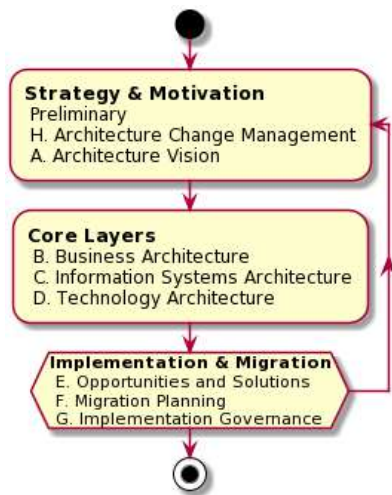


Fig. 3. TOGAF ADM method steps [13].

TOGAF is a mature approach for enterprise architecture and framework used by leading world organizations to improve business efficiency. This is the most outstanding and reliable architecture of the enterprise to ensure consistency of standards, methods and communications between professionals of the enterprise of architecture. Professionals working in TOGAF standards enjoy a higher sectorial reputation, efficiency and career capabilities. TOGAF helps practitioners, avoid entering patented methods, achieve more efficient use of resources and achieve a higher return on investment [6].

IT (Information Technology) architecture should carefully reflect the business goals of the organization. In fact, specific technologies (business scenarios) should be used to ensure that it is to correctly understand the business goals and are reflected in the IT architecture designed using TOGAF [6].

ADM is the result of a constant contribution of a large number of practicing architecture in the following goals [6]:

- it describes a method for developing and managing the life cycle of EA and forms the TOGAF core;

- it can be configured in accordance with the needs of the organization, and then used to implement measures for planning the management system structure.

Even though TOGAF ADM is not that different from the previously considered ADD and ATAM approaches, especially considering the cyclic nature of all of referred methods including ADM, it has significant advantages:

- ADM considers business architecture, strategy, and implementation activities, focusing not only on the software quality and functional attributes, but also taking into account the real business needs of customers therefore providing more holistic and reliable approach to application and IT architecture development;

- ADM could be formalized using the architectural modeling language proposed by TOGAF – ArchiMate [7].

In order to ensure a single presentation of architectural descriptions, the ArchiMate modeling language was developed, offering an integrated approach to the description and visualization of various organizational regions, their relationships and dependencies. The aim of the ArchiMate project is to provide architects to support tools and improve the process of developing an enterprise architecture. Currently, ArchiMate is the Open Group standard. Organizational areas in ArchiMate are associated with the help of a service-oriented paradigm, where each layer provides the functionality of the preceding layer in the form of services. As a formal language of visual design, ArchiMate supports different points of view for individual stakeholders, and is quite flexible for subsequent expansion. For example, for a more complete covering of the TOGAF methodology, in the second version of the ArchiMate language, were introduced new viewpoints – Motivation Extension and Implementation and Migration Extension (see fig. 3) [7].

Metamodel of ArchiMate active structure applications architecture elements, as well as their inter-relationships are demonstrated in fig. 4. All of the proposed elements and relationships are sufficient to design application and IT architectures.

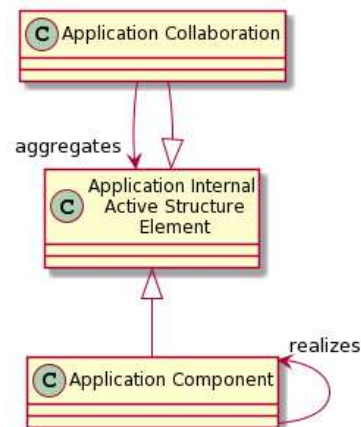


Fig. 4. Metamodel of ArchiMate active structure applications architecture elements [8].

In general ArchiMate metamodel [8] includes two main types of elements:

- structure elements that can be subdivided into active structure elements and passive structure elements: active structure elements can be further subdivided into external active structure elements (also called interfaces) and internal active structure elements;
- behavior elements that can be subdivided into internal behavior elements, external behavior elements (also called services), and events.

Let us clarify on this ArchiMate behavioral and structural building blocks [8], [9]:

- active structural elements to which interfaces as external active structure elements (e.g. application and generic or domain-specific internal active structure elements (e.g. application components) belong;
- behavior elements include services as external behavior elements (e.g. application services) and generic or domain-specific internal behavior elements (e.g. application functions);
- passive structure elements are structural elements that cannot perform behavior, they are often information or data objects, but they can also represent physical objects.

**Results.** Since ArchiMate language has its own specification and metamodel, architectures of application and IT systems described using this language could be formally described.

Generic framework for EA modeling [9] focused on behavior, active structure, and passive structure elements demonstration is shown in fig. 5.

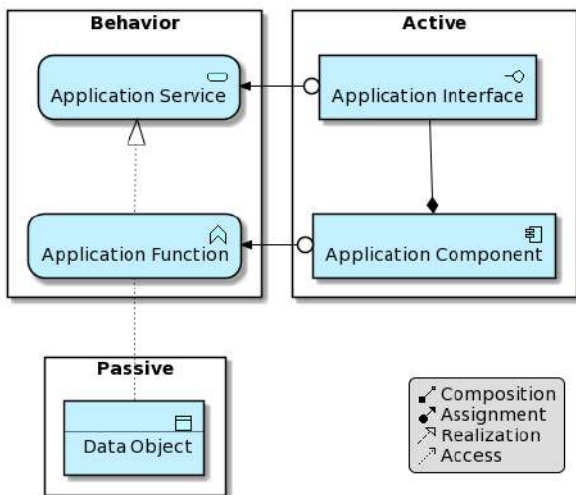


Fig. 5. Essential ArchiMate cross-layer reference model [9].

Outlined reference model demonstrates not only elements of different prospects (passive structure and behavior) together with active structure elements mentioned in fig. 4 earlier, but also possible types of relationships between such elements (e.g. composition, assignment, realization, and access) [8], [9].

In general ArchiMate model could be formally described using the following tuple [10]:

$$AM = \langle V, E, C, R, vc, er \rangle, \quad (1)$$

here  $V$  – is the set of vertices (define and describe architectural elements of applications and IT);

$E \subset V \times V$  – is the set of edges (define and describe relationships between architectural elements);

$C$  – is the set of types of architectural elements defined by the ArchiMate metamodel;

$R$  – is the set of types of relationships between architectural elements;

$vc: V \rightarrow C$  – is the function that maps types of architectural elements to the vertices of the graph  $AM$  (1);

$er: E \rightarrow R$  – is the function that maps types of relationships to the edges of the graph  $AM$  (1).

Hence, using this reference model (see fig. 5) and equation (1) for the first time shown in [10], we can easily apply software metrics to evaluate applications architecture models given in ArchiMate language.

A software coupling measure reflects the strength of interconnection between modules by considering incoming and outgoing connections [11]. As we know from software engineering basics [12]:

- “weak” or “low” coupling is a feature of software components that have small amount of external connections (both incoming and outgoing), since they autonomously solve distinct tasks, being efficient for modification, re-using, and testing; “low” coupling is a property of well-structured and properly designed system;

- “strong” or “high” coupling in contrast could be considered as a serious shortcoming; “high” coupling is a of bad-structured and poorly designed systems, which are hard for understanding and modification, while distinct components cannot be autonomously tested and re-used.

Therefore, we can formulate the following equation in order to calculate coupling of each applications architecture components:

$$C(v) = 1 - \frac{1}{1 + d_{in}(v) + d_{out}(v)}, v \in V, \quad (2)$$

here  $d_{in}(v)$  – is the number of incoming connections of a certain architecture component  $v \in V$ ;

$d_{out}(v)$  – is the number of outgoing connections of a certain architecture component  $v \in V$ .

Proposed metric (2) ranges approximately from 0 for “weak” coupling, see fig. 6, to 1 for “strong” coupling, see equations (3) and (4).

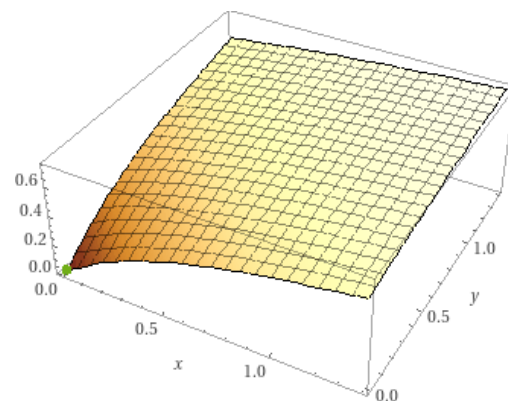


Fig. 6. Minimum of  $C(v)$  with  $d_{in}(v) \geq 0$  and  $d_{out}(v) \geq 0$

$$\lim_{d_{in}(v) \rightarrow +\infty} \left( 1 - \frac{1}{1 + d_{in}(v) + d_{out}(v)} \right) = 1, \quad (3)$$

$$\lim_{d_{out}(v) \rightarrow +\infty} \left( 1 - \frac{1}{1 + d_{in}(v) + d_{out}(v)} \right) = 1. \quad (4)$$

Let us also provide the following generalized metric that could be used in order to measure coupling of the whole applications architecture rather than for a distinct software component as is done by (2):

$$C_{avg} = \frac{1}{|V|} \cdot \sum_{v \in V} C(v), C_{max} = \max_{v \in V} C(v), \quad (5)$$

here  $C_{avg}$  – is the generalized coupling measure that can be used if compensation of certain poor-structured application components of “high” coupling by other well-structured application components of “low” coupling is allowed;

$C_{max}$  – is the generalized coupling measure that can be used if compensation of bad applications architecture decisions by good ones as it is mentioned above for  $C_{avg}$  is denied to achieve modifiable, maintainable, and re-usable software systems.

As well as (2), proposed generalized metric (5) ranges approximately from 0 for “weak” coupling to 1 for “strong” coupling of the whole applications architecture.

In order to verify proposed coupling metrics, let us analyze web presentation patterns presented in Martin Fowler’s “Catalog of Patterns of Enterprise Application Architecture” [13]:

- Model View Controller (MVC);
- Page Controller (PC);
- Front Controller (FC);
- Template View (TPV);
- Transform View (TFV);
- Two-Step View (TSV);
- Application Controller (AC).

Results obtained for each of these web presentation enterprise application architecture patterns are shown in table 1 below.

Table 1 – Coupling of web presentation patterns.

Pattern	Size	Min. $C(v)$	Max. $C(v)$	Avg. $C(v)$
MVC	3	0.67	0.80	0.71
PC	3	0.00	0.80	0.49
FC	4	0.00	0.86	0.21
TPV	3	0.00	0.67	0.44
TFV	3	0.00	0.67	0.44
TSV	5	0.00	0.80	0.43
AC	4	0.67	0.80	0.70

**Analysis and discussion.** According to the obtained results (see table 1 above), the “Model View Controller” web presentation pattern demonstrates the “highest” coupling, while the “Front Controller” web presentation pattern (which is considered as implementation of MVC pattern) shows the “lowest” coupling among application architecture components.

Therefore, the “Front Controller” pattern could be recommended as the best solution for enterprise web

application architecture design because of its low coupling and, hence, better modifiability, maintainability, and re-usability.

Obtained results are proved by almost twenty years of MVC and, in particular, FC dominance in enterprise applications development (see table 2) thank to its concept of never mixing data with presentation.

Table 2 – MVC-based development frameworks support [14].

Language	Frameworks
PHP	CodeIgniter, Laravel, Symfony, Yii, Zend etc.
Java	Spring
Python	Django, Flask
JavaScript	Angular, Express, React etc.
.NET	ASP.NET, Silverlight

**Conclusion and future work.** In order to summarize, we need to state that ADM and ArchiMate language are more preferable ways to describe and analyze software application and IT system architectures rather than ADD and ATAM methods, since the TOGAF baseline of ArchiMate considers all of the valuable aspects of customer’s business giving more holistic description that takes into account not only software attributes, but also their connections to the goals and strategy of a particular organization, which requires improvement through IT services implementation.

Introduced formalisms (1), (2), and (5) could be used to process ArchiMate models metadata in order to analyze applications architecture domain models, identify poorly-designed architecture fragments, and resolve inefficiencies in order to avoid further software implementation, testing, and maintenance errors, as well as related expenses caused by “strongly” coupled application components that cannot be properly modified, tested, and re-used [12].

Moreover, graph-based description of applications architecture models allows to use propagation cost analysis (i.e. which percent of all IT landscape will be affected by error fixing or other re-design efforts) used earlier in [15] for business architecture.

Future work in this field includes extension of the proposed approach in order to consider other ArchiMate enterprise architecture domains, such as business and technology layers, as well as information technology design and development in order to implement proposed approach as a tool for practicing system and software architects, researchers, and other stakeholders.

## References

1. Tekinerdogan B. et al. Quality concerns in large-scale and complex software-intensive systems. *Software Quality Assurance. Large Scale and Complex Software-Intensive Systems*. 2016. P. 1–17.
2. *Attribute Driven Design*. URL: <http://safordevs.blogspot.com/2015/07/attribute-driven-design.html> (accessed 10.02.2021).
3. Wojcik R. et al. *Attribute-Driven Design (ADD), Version 2.0*. Carnegie Mellon University, 2006. 55 p.
4. *Making Tradeoffs and Choices*. URL: <https://www.evolute.be/thoughts/atam.html> (accessed 18.02.2020).
5. Kazman R. et al. The Architecture Tradeoff Analysis Method. *Proceedings of ICECCS98*. 1998. P. 1–11.
6. *Read TOGAF Enterprise Architecture*. URL: <https://developpaper.com/read-togaf-enterprise-architecture> (accessed 03.03.2021).

7. Vicente M. et al. Using ArchiMate and TOGAF to Understand the Enterprise Architecture and ITIL Relationship. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2013. No. 148. P. 134–145.
8. ArchiMate Specification. URL: [https://pubs.opengroup.org/architecture/archimate3-doc/chap04.html#\\_Toc10045299](https://pubs.opengroup.org/architecture/archimate3-doc/chap04.html#_Toc10045299) (accessed 04.03.2021).
9. Aulkemeier F. et al. A Service-Oriented E-Commerce Reference Architecture. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*. 2016. Vol. 11. No. 1. P. 26–45.
10. Klimek R., Szwed P. Verification of ArchiMate process specifications based on deductive temporal reasoning. *Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2013. P. 1103–1110.
11. Ingeno J. *Software Architect's Handbook: Become a successful software architect by implementing effective architecture concepts*. Packt Publishing Ltd, 2018. 594 p.
12. *Software Engineering – Coupling and Cohesion*. URL: <https://www.geeksforgoeks.org/software-engineering-coupling-and-cohesion/> (accessed 20.04.2021).
13. *Catalog of Patterns of Enterprise Application Architecture*. URL: <https://martinfowler.com/eaCatalog/> (accessed 26.04.2021).
14. *Languages and Frameworks for Programming in 2021*. URL: <https://www.whoishostingthis.com/compare/languages-and-frameworks/> (accessed 28.04.2021).
15. Orlovskiy D., Kopp A. Enterprise architecture modeling support based on data extraction from business process models. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2608. P. 499–513.
4. *Making Tradeoffs and Choices*. Available at: <https://www.evolute.be/thoughts/atom.html> (accessed 18.02.2020).
5. Kazman R. et al. The Architecture Tradeoff Analysis Method. *Proceedings of ICECCS98*. 1998, pp. 1–11.
6. *Read TOGAF Enterprise Architecture*. Available at: <https://developpaper.com/read-togaf-enterprise-architecture> (accessed 03.03.2021).
7. Vicente M. et al. Using ArchiMate and TOGAF to Understand the Enterprise Architecture and ITIL Relationship. *Lecture Notes in Business Information Processing*. 2013, no. 148, pp. 134–145.
8. ArchiMate Specification. Available at: [https://pubs.opengroup.org/architecture/archimate3-doc/chap04.html#\\_Toc10045299](https://pubs.opengroup.org/architecture/archimate3-doc/chap04.html#_Toc10045299) (accessed 04.03.2021).
9. Aulkemeier F. et al. A Service-Oriented E-Commerce Reference Architecture. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*. 2016, no. 1 (11), pp. 26–45.
10. Klimek R., Szwed P. Verification of ArchiMate process specifications based on deductive temporal reasoning. *Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 2013, pp. 1103–1110.
11. Ingeno J. *Software Architect's Handbook: Become a successful software architect by implementing effective architecture concepts*. Packt Publishing Ltd, 2018. 594 p.
12. *Software Engineering – Coupling and Cohesion*. Available at: <https://www.geeksforgoeks.org/software-engineering-coupling-and-cohesion/> (accessed 20.04.2021).
13. *Catalog of Patterns of Enterprise Application Architecture*. Available at: <https://martinfowler.com/eaCatalog/> (accessed 26.04.2021).
14. *Languages and Frameworks for Programming in 2021*. Available at: <https://www.whoishostingthis.com/compare/languages-and-frameworks/> (accessed 28.04.2021).
15. Orlovskiy D., Kopp A. Enterprise architecture modeling support based on data extraction from business process models. *CEUR Workshop Proceedings*. 2020, vol. 2608, pp. 499–513.

#### References (transliterated)

1. Tekinerdogan B. et al. Quality concerns in large-scale and complex software-intensive systems. *Software Quality Assurance. Large Scale and Complex Software-Intensive Systems*. 2016, pp. 1–17.
2. *Attribute Driven Design*. Available at: <http://safordevs.blogspot.com/2015/07/attribute-driven-design.html> (accessed 10.02.2021).
3. Wojcik R. et al. *Attribute-Driven Design (ADD), Version 2.0*. Carnegie Mellon University, 2006. 55 p.

Надійшла (received) 20.06.2021

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

**Копп Андрій Михайлович** – доктор філософії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: [kopp93@gmail.com](mailto:kopp93@gmail.com)

**Орловський Дмитро Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: [orlovskiy.dm@gmail.com](mailto:orlovskiy.dm@gmail.com)

**Ерсоyleєн Дорукхан** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; e-mail: [ersoyleyen\\_1@hotmail.com](mailto:ersoyleyen_1@hotmail.com)

**Копп Андрей Михайлович** – доктор философии, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: [kopp93@gmail.com](mailto:kopp93@gmail.com)

**Орловский Дмитрий Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: [orlovskiy.dm@gmail.com](mailto:orlovskiy.dm@gmail.com)

**Эрсоyleєн Дорукхан** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; e-mail: [ersoyleyen\\_1@hotmail.com](mailto:ersoyleyen_1@hotmail.com)

**Kopp Andrii Mykhailovych** – PhD in Computer Sciences, National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Associate Professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3189-5623>; e-mail: [kopp93@gmail.com](mailto: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 Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8261-2988>; e-mail: [orlovskiy.dm@gmail.com](mailto:orlovskiy.dm@gmail.com)

**Ersoyleyen Dorukhan** – National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Student of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies; Kharkiv, Ukraine; e-mail: [ersoyleyen\\_1@hotmail.com](mailto:ersoyleyen_1@hotmail.com)



*M. M. KOZULIA, V. V. SUSHKO*

## **DETERMINE RECOMMENDATION SYSTEMS TO SEARCH FOR BOOKS BY PREFERENCES OF WEB USERS**

Currently, the question of state, formation and development of the information source interaction system, the scientific interaction and users' requests in certain fields of activity remains relevant under the conditions of the development of the use of Internet services. Recommendation systems are one of the types of artificial intelligence technologies for predicting parameters and capabilities.

Due to the rapid increase in data on the Internet, it is becoming more difficult to find something really useful. And the recommendations offered by the service itself may not always correspond to the user's preferences. The relevance of the topic is to develop a personal recommendation system for searching books, which will not only reduce time and amount of unnecessary information, but also meet the user's preferences based on the analysis of their assessments and be able to provide the necessary information at the right time. All this makes resources based on referral mechanisms attractive to the user. Such a system of recommendations will be of interest to producers and sellers of books, because it is an opportunity to provide personal recommendations to customers according to their preferences.

The paper considers algorithms for providing recommender systems (collaborative and content filtering systems) and their disadvantages. Combinations of these algorithms using a hybrid algorithm are also described. It is proposed to use a method that combines several hybrids in one system and consists of two elements: switching and feature strengthening. This made it possible to avoid problems arising from the use of each of the algorithms separately.

A literature web application was developed using Python using the Django and Bootstrap frameworks, as well as SQLite databases, and a system of recommendations was implemented to provide the most accurate suggestion. During the testing of the developed software, the work of the literature service was checked, which calculates personal recommendations for users using the method of hybrid filtering. The recommendation system was tested successfully and showed high efficiency.

**Keywords:** Artificial intelligence, Recommendation system, Collaborative filtration, Content filtration, Hybrid algorithm, literary service, web application, switching, feature enhancement.

*M. M. КОЗУЛЯ, В. В. СУШКО*

## **ВИЗНАЧЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОШУКУ КНИГ ЗА УПОДОБАННЯМ ВЕБКОРИСТУВАЧІВ**

В даний час питання про стан, формування і розвиток системи взаємодії джерел інформації, наукової взаємодії і запитів користувачів в окремих сферах діяльності залишається актуальним в умовах розвитку використання інтернет-сервісів. Рекомендаційні системи – один із видів технологій штучного інтелекту для передбачення параметрів та можливостей.

Через стрімке збільшення даних в мережі Інтернет стає складніше знайти щось справді корисне. А рекомендації, що пропонує сам сервіс, не завжди можуть відповідати вподобанням користувача. Актуальність теми полягає в тому, щоб розробити персональну рекомендаційну систему пошуку книг, що не тільки зменшить часові витрати та кількість непотрібної інформації, а й відповідатиме вподобанням користувача на основі аналізу їх оцінок та зможе надати необхідну інформацію в потрібний час. Все це робить ресурси, засновані на рекомендаційних механізмах, привабливими для користувача. Така система рекомендацій зацікавить виробників та продавців книг, бо це можливість надавати персональні рекомендації клієнтам за їх вподобаннями.

У статті розглядаються алгоритми надання рекомендаційних систем (коллаборативна та контентна системи фільтрації) і їх недоліки. Також описані комбінації цих алгоритмів з використанням гібридного алгоритму. Пропонується використовувати метод, який об'єднує кілька гібридів в одну систему і складається з двох елементів: перемикання і посилення ознак. Це дозволило уникнути проблем, що виникають при використанні кожного з алгоритмів окремо.

Було розроблено літературний вебдодаток за допомогою Python із застосуванням фреймворків Django та Bootstrap, а також баз даних SQLite, і впроваджено цю систему рекомендацій для надання найбільш точних пропозицій. У ході тестування розробленого програмного забезпечення було перевірено роботу літературного сервісу, що розраховує персональні рекомендації для користувачів, використовуючи метод гібридної фільтрації. Рекомендаційна система пройшла тестування успішно та показала високу ефективність.

**Ключові слова:** штучний інтелект, система рекомендацій, спільна фільтрація, контентна фільтрація, гібридний алгоритм, літературний сервіс, вебдодаток, перемикання, посилення ознак.

*M. M. КОЗУЛЯ, В. В. СУШКО*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕКОМЕНДАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПОИСКА КНИГ ПО ПРЕДПОЧТЕНИЮ ВЕБПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ**

В настоящее время вопрос о состоянии, формировании и развитии системы взаимодействия источников информации, научного взаимодействия и запросов пользователей в отдельных сферах деятельности остается актуальным в условиях развития использования интернет-сервисов. Рекомендательные системы – один из видов технологий искусственного интеллекта для предсказания параметров и возможностей.

Из-за стремительного увеличения данных в сети Интернет становится сложнее найти что-то действительно полезное. А рекомендации, которые предлагает сам сервис, не всегда могут соответствовать предпочтениям пользователя. Актуальность темы состоит в том, чтобы разработать персональную рекомендательную систему поиска книг, которая не только уменьшит временные затраты и количество ненужной информации, но и будет соответствовать пользовательским предпочтениям на основе анализа их оценок и сможет предоставить необходимую информацию в нужное время. Все это делает ресурсы, основанные на рекомендательных механизмах, привлекательными для пользователя. Такая система рекомендаций заинтересует производителей и продавцов книг, потому что это возможность предоставлять персональные рекомендации клиентам по их предпочтениям.

В статье рассматриваются алгоритмы предоставления рекомендательных систем (коллаборативная и контентная системы фильтраций) и их недостатки. Также описаны комбинации этих алгоритмов с использованием гибридного алгоритма. Предлагается использовать метод, объединяющий несколько гибридов в одну систему и состоящий из двух элементов: переключения и усиления признаков. Это позволило избежать проблем, возникающих при использовании каждого из алгоритмов в отдельности.

© M. M. Kozulia, V. V. Sushko, 2021

Было разработано литературное вебприложение с помощью Python с использованием фреймворков Django и Bootstrap, а также баз данных SQLite, и внедрена эта система рекомендаций для предоставления наиболее точных предложений. В ходе тестирования разработанного программного обеспечения была проверена работа литературного сервиса, рассчитывающего персональные рекомендации для пользователей, используя метод гибридной фильтрации. Рекомендательная система успешно прошла тестирование и показала высокую эффективность.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, система рекомендаций, общая фильтрация, контентная фильтрация, гибридный алгоритм, литературный сервис, вебприложение, переключение, усиление признаков.

**Introduction.** The beginning of the XXI century is a period of continuous increase in the number information and technology development. The World Wide Web provides everyone access to search engines, directories, various web services, thereby provides a comfortable life for each user. Many literary services provide user access to reading books online. Everyone can find the right book, read it and add to your library. Due to the rapid increase in data on the Internet, it is becoming more difficult to find something useful. However, the recommendations offered by the service itself are not always can match the user's preferences. Fortunately, information-filtering systems offer an excellent solution to this problem.

The relevance of the topic is to develop a personal a recommended book search system that will not only reduce time costs and the amount of unnecessary information, but will match the user's preferences based on the analysis of their assessments and will be able to provide the necessary information in the right time. All of this makes resources based on referral mechanisms attractive to the user. Such recommendation systems will interest producers and sellers of books, because it is an opportunity to provide personal recommendations to customers according to their preferences. Recommendations will be based on user's preferences using hybrid systems, which is what it is novelty of this work.

Thus, the purpose of the study is to analyze and determine the recommendation systems and the creation of a literary web application based on the combination of recommendation systems – collaborative and content filtration, which is for the first time for literary services.

According to the work aim it is necessary to solve the following tasks:

- description of the recommendation system and ensuring its effectiveness;
- selection and modification of the method for developing a recommendation system based on the analysis of literature sources;
- implementation of the selected recommendation system for program realization;
- development of literary service software.

**Literature Review.** Recommendation systems have been introduced to meet the needs of the user and save searching time for the literature he needs [1].

In the early 90s, the first works describing recommendation systems [2] appeared – collaborative [3, 4, 5] and content [6, 7] filtration systems.

The author [8] described in his work the methods of calculating recommendations for content and collaborative filtering, as well as named their advantages and disadvantages. And Amir Salihefendic in work [9] raises the issue of ranking objects, which partially avoids the problem of cold start.

Based on research, researchers [10, 11, 12] concluded that collaborative filtering is much more satisfying to the needs of users than content.

Recommendation systems (RS) are used both in the commercial [13] sphere and in the entertainment [14]. The study of RS in the music field was started in 2010 by [6]. Later, works were written [15, 16], which collected a description of various concepts and methodologies for such subject areas as data analysis, decision-making systems, news and marketing.

In [17], the authors reviewed 26 articles and found that in most cases, the recommendation systems use the Baew approach or the tree-based approach for movies, music, news, and products for web stores.

Xiang Li [18] proposed a multidimensional context-sensitive RS method to improve the random forest algorithm. Xibin Wang [19] uses a method to determine user preferences based on their interests in the field of films. And Mladen Marovic [20] compares methods for predicting movie ratings for users.

In the article [21] was investigated that to avoid problems of content and collaborative filtering is used their combination – hybrid recommendation systems. The first hybrid recommendation system combined two methods of recommendations to achieve excellent performance with a slight deficit of any individual [22].

In the work [21] are described different types of hybrid systems. The [23] considers hybrid systems based on probabilistic methods, such as neural networks, Bayesian networks, clustering, hidden features (eg, SVD), genetic algorithms.

Research on recommendation systems has been developing rapidly in recent years, which confirms their relevance and the need for further research. The use of hybrid approaches is not limited to the use of a single method of combining algorithms. If necessary, it can be used several hybrids in one system. And the area of reference systems of literature is insufficiently studied. Therefore, in this paper is used several hybrids in one system to predict the books rating for users.

The main problem in literary recommendation services is "cold start" – after registration, the user is provided with incorrect or no books for familiarization. In this article, it is recommended to come to a combination of recommendation systems by switching and enhancing features that will solve the problem of "cold start" and provide more accurate recommendations.

**Methods.** To predict the parameters and capabilities is used artificial intelligence technologies: recommendation systems, expert systems and decision support systems [24].

Expert systems are narrowly focused: they provide recommendations, analyze, classify and solve problems through the examination of a human specialist [25].

Decision Support System (DSS) is an interactive computer automated system (software package) designed to help and support various human activities in making decisions about solving structured or unstructured problems. The use of DSS provides a thorough and objective analysis of the subject area in decision-making in difficult conditions [26].

A recommendation system (RS) is a subclass of an information filtering system that builds a rating list of objects (movies, music, books, news, websites) that a user can prefer. The recommendation system generates a list individually for each user of the system based on a preliminary analysis of the user profile: gender, age, books reviewed, grades, etc. [25].

Based on the analysis of the collected sources of information, conclusions were made about the advantages and disadvantages of existing technologies and it was decided that recommendation systems are best suited for the task of researching model tools for determining the preferences of web users.

RS is a replacement for search algorithms, as RS finds objects based on the analysis of previous data, at a time when another system may not even offer the right one.

There are the following main approaches in creating RS (fig. 1) [27]:

- 1) collaborative filtering;
- 2) content-based filtering;
- 3) hybrid filtering.

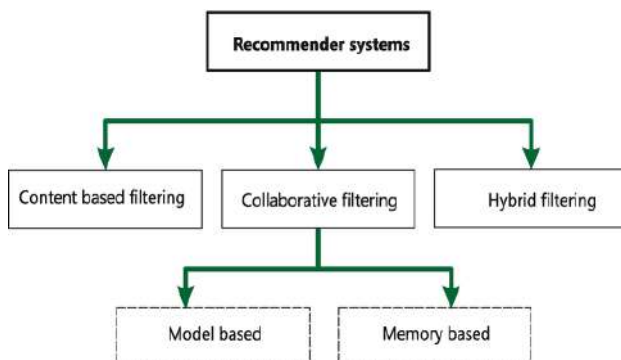


Fig. 1. Basic approaches to create recommendation systems

Collaborative filtering (CF) is a method of recommendation that analyzes only the reaction of users to objects: the ratings that users make to objects. Estimates can be either explicit (the user explicitly indicates how many "stars" he evaluates the object) or implicit (for example, the number of openings per book). The more estimates, the more accurate the recommendations will be. This helps users filter objects. Therefore, this method is also called joint filtering [28].

Content filtering or content filtering is based on information about system elements that the user has already evaluated in the past. This method analyzes data about the properties of objects, such as genre, author, publisher, and so on. The system can also use data on views and evaluations of items. The content of this method is that elements with similar content, users provide similar benefits [10].

Recommended systems, which are based on collaborative filtering, in contrast to content-based filtering, analyze user data for their work, not system elements. Each user is assigned a group of users with similar preferences. Based on this, it is hypothesized that users who have rated some objects in the past will evaluate other objects in the future in the same way [29].

One of the main problems of RS is the Cold-start Problem (CSP). It occurs when new elements appear in the system – either new users (User Cold-Start), whose preference history is empty, or new objects (Item Cold-Start), which do not yet have ratings and / or a set of features [21].

No less important problem of the recommendation system is the problem of the bubble filter. Classic recommendation systems offer users objects based only on their previous preferences. As a result, the user finds himself in an information environment in which he observes only a limited number of objects of the same type. The next problem is the considerable amount of information that complicates the situation. For example, some people are predictable and others are unpredictable, which can lead to inaccuracies and ineffective results in the recommendation system. Another problem can be considered scalability: the more data, the more difficult it is to find an accurate result [21].

Analyzing all the considered literature, it was decided that none of the methods is effective alone for creating recommendation system for program realization of literary service software.

To use the strengths of different methods, as well as to avoid the shortcomings of each of the algorithms, a hybrid RS was created (fig. 2).

Hybrid recommendation systems include:

1) Weighted: each of the algorithms is assigned a weighting factor, then a linear combination of ratings is calculated for each of the objects. For example, collaborative and content filtering types have been combined. In this case, a list of recommendations will be provided, which will list the books that were relatively highly rated by both methods.

2) Switching: choosing one option among the components of the recommendations depending on the circumstances. This approach allows, for example, to solve the problem of "cold start", which is one of the weaknesses of the method of collaborative filtration. For a "cold user" whose benefits are unknown to us, we can use to recommend the most popular documents or prepare a "universal" set [30].

3) Mixed: simultaneous use of the recommendation of different algorithms. Suppose we have several systems of recommendations that we would like to combine. In this case, you can set the mixing rules, and then show the user all the recommendations, alternating them. This method is suitable when the sources of recommendations for us act as black boxes. It does not require the objects rating calculation [31].

4) Cascade: The recommendations are given clear priority, with the lowest priorities breaking the links in winning the higher ones [31]. For example, using content filtering, we weed out books that don't interest the user at

all. And then, using collaborative filtering, we form a list of recommendations from the remaining books.

5) Feature combination: adds characteristics of the second to the first method. For example, we obtain recommendations based on contextual filtering, using such characteristics as title, author, genre, and supplement the list of characteristics through collaborative filtering.

6) Feature augmentation. This approach is similar to the previous one. In it is possible to allocate the basic and additional algorithms. But, unlike combining features, we do not add new features, but complement the values of existing ones [33]. For example, we will take collaborative filtering as a basis, and recommendations on the basis of content as an additional algorithm. This helps to avoid the problem of sparseness.

Hybridity is the combination of the results of two different approaches – content-based filtering and collaborative filtering. This can, to some extent, avoid the disadvantages of the above approaches. There are several basic options for combining filtering approaches [32]:

– *Inclusion of characteristics of elements in collaborative filtering.* The recommendation system primarily uses collaborative filtering, including some data on the elements used to find the degree of similarity of users. Benefits: increasing the relevance of recommendations; avoiding the problem of "cold start" and sparse data; taking into account the preferences of the user in the direction of the literature.

– *Inclusion of user characteristics in content filtering.* The most well-known method for implementing this approach is to reduce the dimensionality of profiles that use content filtering. One such method uses latent semantic analysis (LSA) to create collaborative user profile content. This approach is much more effective, as the recommendations are built not only due to the similarity of the elements [32].

– *Construction of a single model based on collaborative filtering and content filtering.* This approach is the most popular in the use of a hybrid system of recommendations. The essence of the algorithm is that the PC uses collaborative and content filtering simultaneously. It also helps to avoid the problem of "cold start" and sparse data and allows you to recommend elements not only for similar tastes, but also for your favorite genre or author.

The use of hybrid approaches is not limited to the use of a single method of combining algorithms. If necessary, it can be used several hybrids in one system. The proposed architecture of the hybrid RS is presented in fig. 2 [33].

There are two elements of a hybrid recommendation system:

1) Switching: for a new user, the system recommends recommendations for popularity, because it does not know its benefits and tastes.

2) Feature strengthening: if the user has already used the given literary service and has exposed estimations, the system forms for it recommendations, using the basic algorithm – collaborative filtering. But in order for the user to receive not only recommendations on similar grounds with other users, they use an additional algorithm

– recommendations on the content that will provide the user with recommendations and on the basis of the elements evaluated by him in the past.

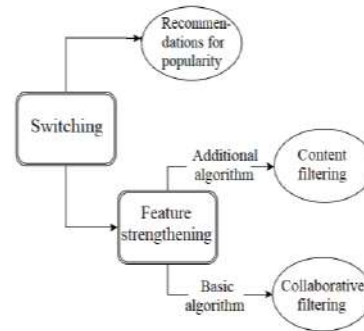


Fig. 2. Architecture of the recommendation system

Thus, the problems of “cold start” and sparse data for a new user, is solved by switching. As an algorithm for the new user, it was no coincidence that the recommendations on popularity were chosen: no additional information is required to calculate them, it is enough to evaluate the data on orders that are already available.

Each method has a separate function that builds the rating of books based on the deduction of the recommended weight and degree of proximity. Thus, we have the following algorithms for applying the hybrid system of recommendations:

Content filtering algorithm:

1) For each element, similar in characteristics (genre, year, author, etc.), the calculation of weights is performed using a measure of similarity:

$$\begin{aligned} \text{sim}(u, U') &= \cos(\vec{u}, \vec{U}') = \frac{\vec{u} \cdot \vec{U}'}{\|\vec{u}\| \cdot \|\vec{U}'\|} = \\ &= \frac{\sum_{s \in S_{uU'}} r_{us} \cdot r_{U's}}{\sqrt{\sum_{s \in S_{uU'}} r_{us}^2} \sqrt{\sum_{s \in S_{uU'}} r_{U's}^2}} \end{aligned} \quad (1)$$

where  $r_{us}$  – the estimated rating of the  $s$  object for the  $u$  user;

$U'$  – a set of users who have rated the  $s$  object and belong to the same group with the  $u$  user;

$k$  – parameter for normalization, which is calculated

$$\text{for the formula } k = \frac{1}{\sum_{u \in U'} \text{sim}[u, u']}$$

2) Next, from the list of objects, a group of elements is formed that are most similar to the object calculated on the basis of weights.

3) Finally, the projected rating of objects is formed using the method of similar elements evaluation:

$$\begin{aligned} h(u, s) &= \cos(\vec{w}_u, \vec{w}_s) = \frac{\vec{w}_u \cdot \vec{w}_s}{\|\vec{w}_u\| \cdot \|\vec{w}_s\|} = \\ &= \frac{\sum_{i=1}^K w_{ui} w_{is}}{\sqrt{\sum_{i=1}^K w_{ui}^2} \sqrt{\sum_{i=1}^K w_{is}^2}} \end{aligned} \quad (2)$$

Collaborative filtering algorithm:

1) For each user of the system weights are determined by analyzing their preferences in relation to this user by calculating the degree of similarity

$$\text{sim}(u, U') = \frac{\sum_{s \in S_{u, U'}} (r_{us} - \bar{r}_u)(r_{U's} - \bar{r}_{U'})}{\sqrt{\sum_{s \in S_{u, U'}} (r_{us} - \bar{r}_u)^2 \sum_{s \in S_{u, U'}} (r_{U's} - \bar{r}_{U'})^2}} \quad (3)$$

2) Form a group of the most similar users in relation to this user.

3) To form the forecasted rating of object, analyzing estimations of each of users from the previously formed group of users:

$$r_{Us} = k \sum_{u \in U'} \text{sim}(u, U') \cdot r_{Us} \quad (4)$$

Hybrid filtration method:

1) For each of the filtration methods described above, determine the weights. To do this, set the following system of equations:

$$\begin{cases} \gamma = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x}{2}}}, \\ \alpha = \beta = 1 - \frac{1}{1 + e^{-\frac{x}{2}}}, \end{cases} \quad (5)$$

where  $x$  is the number of user ratings in the system. And the values change dynamically depending on the available estimates.

2) The resulting projected rating of objects is formed:

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} + \frac{e^x}{e^x + 1} \quad (6)$$

Thus, in the work for the first time it is proposed to use a combination of collaborative and content filtration for literary services, which provides new users based on the assessment of one book to obtain a more accurate recommendation for receiving references to the following books.

**Results.** The operation of the system is given in the form of a sequence diagram in fig. 3. In this case, the sequence diagram showing the main precedents of the literary service is the basis for software design.

In order to obtain literature, the following inputs are required: user information that helps avoid the problem of "cold start", book information and user assessment information. The system uses the recommendation algorithm, takes into account the service requirements and provides personal guidelines for the user.

To implement the recommendation system, a hybrid algorithm, which combines two methods: a collaborative on the basis of neighbors and content filtration (fig. 4) was chosen.

The algorithm consists of six major stages; on which we must receive books for the end user. The algorithm input provides information about books, user and

estimates that have left users with these books. Next, the algorithms of content and collaborative filtration are performed, with which we receive lists of similar elements and similar users. And in the end, a list of recommendations is formed.

To check the work of this literary service and recommendation system, a matrix fragment of users and their ratings is given (table 1), where 5 is the highest rating.

For the user Igor, calculating the degree of proximity according to the formulas (1), (3), a set of neighbors is obtained and a similarity matrix is formed (table 2).

Expressions (2), (4) are used to predict the rating of the five new elements: multiply each user's score by the degree of similarity. The calculated sum of ratings of each book is divided by the sum of measures of similarity of the closest users are summarized in table 3.

Book1, Book5, Book8 and Book11 have already been rated by the user of the Games and it makes no sense to re-offer them to him. Book3, Book6, Book9 – books that are not included in the ranking of five books due to low coefficient.

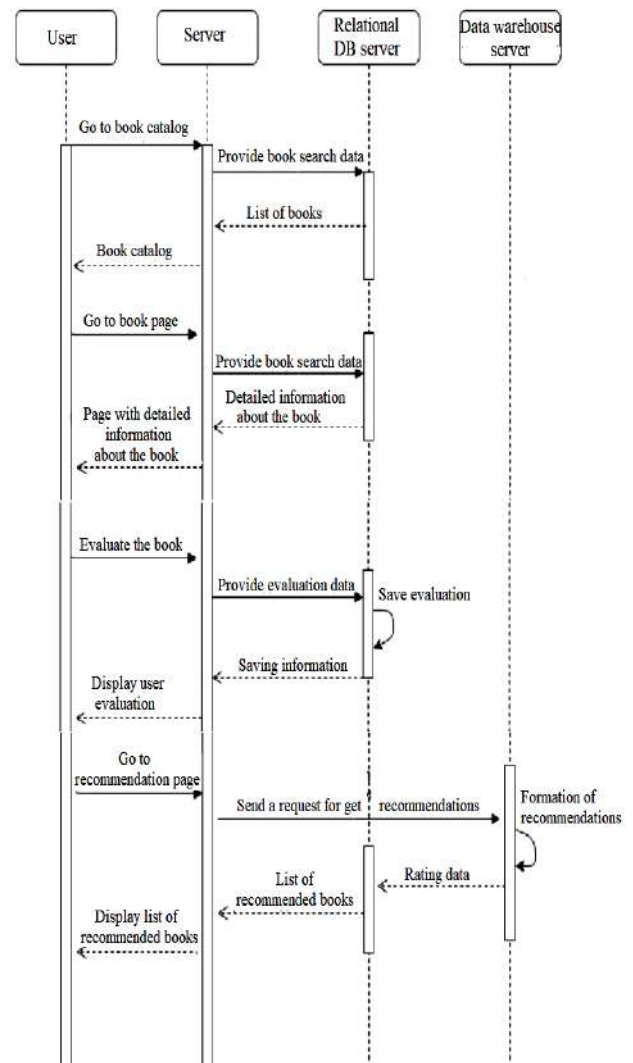


Fig. 3. Sequence diagram

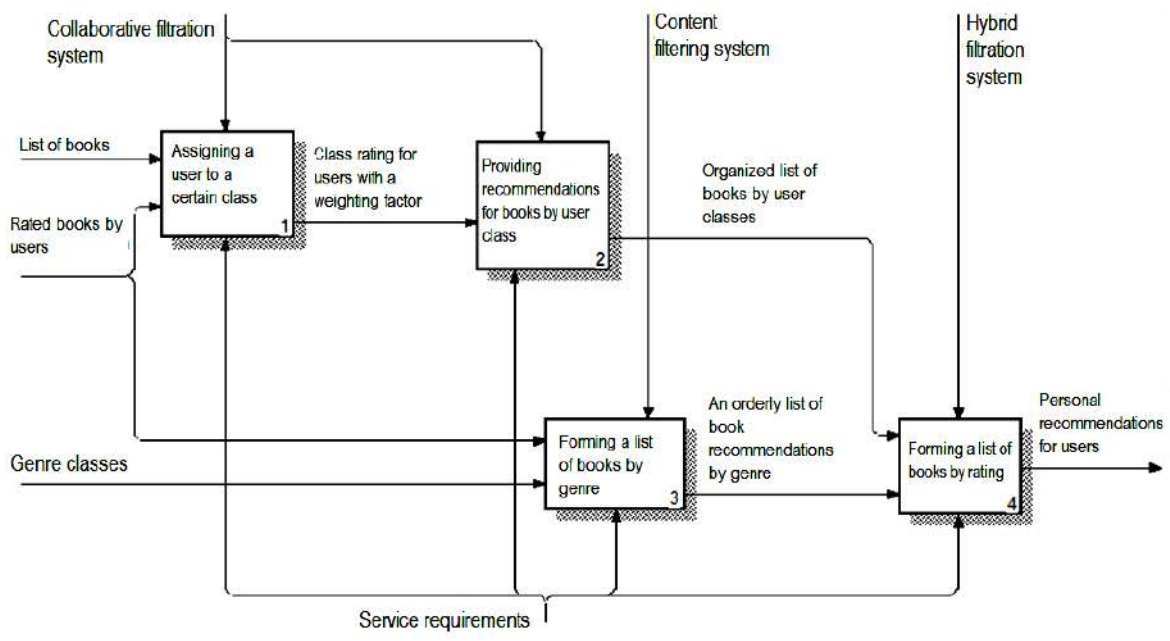


Fig. 4. Model of the system in the form of IDEF0 chart

Table 1 – Estimation matrix

	Book											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ivan	5	3		5	4		5	1		4		2
Igor	4				4			2	4			
Anna		1	5				4					
Nina			4	3		2	1				5	2
Nadiya	4	5		4	5			4			1	5
Artem			4	3	1		5	4	1			1

Table 2 – Similarity matrix

	Ivan	Anna	Nina	Nadiya	Artem	Summ
Igor	0,5831	0	0,1334	0,215	0,0359	0,9674

Table 3 – The results of calculations of personal recommendations

	Book											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ivan	2,92	1,75	-	2,92	2,33	-	2,92	0,58	-	2,33	-	1,17
Anna	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Nina	-	-	0,53	0,40	-	0,27	0,13	-	-	0,67	0,27	-
Nadiya	0,86	1,08	-	0,86	1,08	-	-	0,86	-	0,22	-	1,08
Artem	-	-	0,14	0,11	0,04	-	0,18	0,14	0,04	-	0,04	-
Summ	3,78	2,82	0,68	4,28	3,44	0,27	3,23	1,59	0,04	3,21	0,30	2,24
Result	3,90	2,92	0,70	4,43	3,56	0,28	3,34	1,64	0,04	3,32	0,31	2,32

To provide a set of book recommendations, the results are sorted in descending order and the number of books to display on the recommendation page is selected (in this case, five books will be displayed). Personal recommendations of the literature for the user Igor are entered in table 4.

Table 4 – Personal recommendations for the user Igor

№ Book	Rating
Book 4	Highest rating – 4,43
Book 7	rating – 3,34
Book 10	rating – 3,32
Book 2	rating – 2,92
Book 12	rating – 2,32

The results of testing the implemented system of personal recommendations in the developed web application for the user Igor are shown in fig. 5.

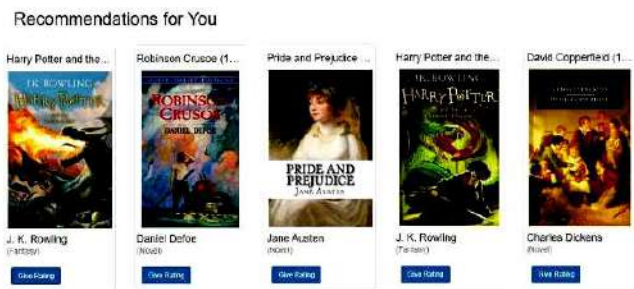


Fig. 5. Web-page of personal recommendations for the user Igor

In the event that a new user enters the system, the service analyzes his preferences on the basis of personal information and provides a list of recommendations based on it.

**Conclusions.** When the number of books provided by the electronic library is relatively large, it becomes difficult for the user to choose the right book. Thus, a solution to the problem is implemented and a hybrid algorithm is proposed, which is not just based on joint filtering and content-based algorithm, but also combines several hybrids. This approach helps to solve the problems

of each type of filtration, in particular the problem of "cold start".

During the testing of the developed software, the work of the literature service was checked, which calculates personal recommendations for users using the method of hybrid filtering. The recommendation system was tested successfully and showed high efficiency.

**Discussion.** The obtained results were checked on the work of the created literary service, namely books were uploaded to the service, accounts were created by real people and work on selection of the recommended literature on the basis of user preferences was started. Each user read several books and gave them a subjective assessment. The user also added his favorite genres to the settings, as a result of which personal recommendations were formed. As soon as the user read the book from the provided list and evaluated it, the list changed depending on the input data. Read books were not included in the list.

As a result of the experiment, recommendations were obtained for users that met their expectations and preferences.

#### References

- Isinkaye F. O., Folajimi Y. O., Ojokoh B. A. Recommendation systems: Principles, methods and evaluation. *Egyptian Informatics Journal*. 2015. Volume 16, issue 3. P. 261–273.
- Venkatesan M., Thangadurai K. History and overview of the recommender systems. *Collaborative Filtering Using Data Mining and Analysis*, 2016. P. 74–99.
- Shardanand U., Maes P. Social Information Filtering: Algorithms for Automating «Word of Mouth». *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. New York, NY, USA, 1995. P. 210–217.
- Hill W., Stead L., Rosenstein M., Furnas G. Recommending and Evaluating Choices in a Virtual Community of use. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. New York, NY, USA, 1995. P. 194–201.
- Resnick P., Iakovou N., Sushak M., Bergstrom P., Riedl J. GroupLens: An Open Architecture for Collaborative Filtering of Netnews. *Proceedings of the 1994 ACM conference on Computer supported cooperative work*, 1994. P. 175–186.
- Celma O. Music Recommendation and Discovery. *Springer*, Berlin, Heidelberg, 2010. P. 43–85.
- Adomavicius G., Tuzhilin A. Toward the next generation of recommender systems: A survey of the state-of-the-art and possible extensions. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. 2005. Volume 17, issue 6. P. 734–749.
- Burke R., Felfernig A., & Göker M. H. Recommender Systems: An Overview. *AI Magazine*. 2011. No. 32(3). P. 13–18.
- How Reddit ranking algorithms work, URL: <http://amix.dk/blog/post/19588> (accessed 27.03.2021).
- Shahbazi Z., Byun Y.C. Product Recommendation Based on Content-based Filtering Using XGBoost Classifier. *International Journal of Advanced Science and Technology*. No. 29(04). P. 6979–6988. URL: <http://sersc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/28099> (accessed 27.03.2021).
- Madadipouya K., Chelliah S. A Literature Review on Recommender Systems Algorithms, Techniques and Evaluations. *BRAIN*. 2017. Vol.8, issue 2. P. 109–124.
- Phys J. Summary of recommendation system development, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1187*. P. 1–5.
- Foreign online store of literature and training videos, URL: <http://shop.oreilly.com/> (accessed 25.03.2021).
- Free online cinema ivi.ru, <http://www.ivi.ru/> (accessed 25.03.2021).
- Ricci F., Rokach L., Shapira B., Kantor P.B. *Recommender Systems Handbook*. Springer US, 2011. 842 p.
- Aggarwal C. C. *Data mining*. Springer International Publishing, 2015. 734 p.
- Portugal I., Alencar P., Cowan D. The use of machine learning algorithms in recommender systems: A systematic review. *Expert Systems with Applications*. 2018. Vol. 97. P. 205–227.
- Li X., Wang Z., Wang L., Hu R., Zhu Q. A multidimensional context-aware recommendation approach based on improved random forest algorithm. *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. P. 45071–45085.
- Wang X., Wen J., Luo F., Zhou W., Ren H. Personalized recommendation system based on support vector machine and particle swarm optimization. *International Conference on Knowledge Science*. 2015. P. 489–495.
- Marović M., Mihoković M., Mikša M., Pribil S., Tus A. Automatic movie ratings prediction using machine learning. *34th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*, 2011. P. 1640–1645.
- Çano E., Morisio M. Hybrid recommender systems: a systematic literature review. *Intelligent Data Analysis*. 2017. Vol. 21, no. 6. P. 1487–1524.
- Fayyaz Z., Ebrahimian M., Nawara D. Recommendation Systems: Algorithms, Challenges, Metrics, and Business Opportunities. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020. Vol. 10, issue 21. P. 7748.
- Beladev M., Rokach L., Shapira, B. Recommender systems for product bundling. *Knowl. Based Syst.* 2015. Vol. 111. P. 193–206.
- Naveen G., Naidu A., Thirumala Dr. B. Comparative Study on Artificial Intelligence and Expert Systems *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2019. Vol. 6, issue 2. P. 1980–1986.
- Vilnius K. Intelligent Decision Support Systems. *Biometric and Intelligent Decision Making Support*. 2015. P. 31–85.
- Peter B. Keenan, Piotr J. Spatial Decision Support Systems: Three decades on. *Decision Support Systems*. 2019. Vol. 116. P. 64–76.
- Waila, P., Singh, V., Singh, M. A Scientometric Analysis of Research in Recommender Systems. *J Scientometric Res*. 2016. Vol. 5, issue 1. P. 71–84.
- Zhang Q., Jie Lu. Artificial intelligence in recommender systems. *Complex & Intelligent Systems*. 2020. Vol. 7. P. 439–457.
- Luy Z., Dou Z., Lianz J. Content-Based Collaborative Filtering for News Topic Recommendation. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2015. No. 29(1). P. 217–223.
- Li X., Xing J., Wang H., Zheng L., Jia S., Wang Q. A Hybrid Recommendation Method Based on Feature for Offline Book Personalization. *Journal of Computers*. 2019. Vol. 30, no. 5. P. 1–17.
- Lytvynenko, V., Lurie, I., Krejci, J. Two Step Density-Based Object-Inductive Clustering Algorithm. *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on "Mathematics. Information Technologies. Education"*, 2019. P. 117–135.
- Smith J., Weeks D., Freeman J., Jacob M., Magerko B., Towards a Hybrid Recommendation System for a Sound Library. *IUI Workshops '19*, 2019. Vol. 2327. 6 p.
- Chyrun L., Burov Y., Rusyn B. Web Resource Changes Monitoring System Development. *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on "Mathematics. Information Technologies. Education"*, 2019. P. 255–273.

#### References

- Isinkaye F. O., Folajimi Y. O., Ojokoh B. A. Recommendation systems: Principles, methods and evaluation. *Egyptian Informatics Journal*. 2015, vol. 16, issue 3, pp. 261–273.
- Venkatesan M., Thangadurai K. History and overview of the recommender systems. *Collaborative Filtering Using Data Mining and Analysis*. 2016, pp. 74–99.
- Shardanand U., Maes P. Social Information Filtering: Algorithms for Automating «Word of Mouth». *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. [Proceedings of the ACM CHI 95 Human Factors in Computing Systems Conference] New York, NY, USA.1995, pp. 210–217.
- Hill W., Stead L., Rosenstein M., Furnas G. Recommending and Evaluating Choices in a Virtual Community of use. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. [Proceedings of the ACM CHI 95 Human Factors in Computing Systems Conference] New York, NY, USA. 1995, pp. 194–201.

5. Resnick P., Iakovou N., Sushak M., Bergstrom P., Riedl J. GroupLens: An Open Architecture for Collaborative Filtering of Netnews. *Proceedings of the 1994 ACM conference on Computer supported cooperative work*, [CSCW '94 Computer Science]. 1994, pp. 175–186.
6. Celma O. Music Recommendation and Discovery. *Springer* [Springer. Computer science], Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 43–85.
7. Adomavicius G., Tuzhilin A. Toward the next generation of recommender systems: A survey of the state-of-the-art and possible extensions. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* [IEEE Computer Society]. 2005, Vol. 17, issue 6, pp. 734–749.
8. Burke, R., Felfernig, A., & Göker, M. H. Recommender Systems: An Overview. *AI Magazine*. 2011, no. 32(3), pp. 13–18.
9. How Reddit ranking algorithms work, URL: <http://amix.dk/blog/post/19588> (accessed 27.03.2021).
10. Shahbazi, Z. Byun, Y.C. Product Recommendation Based on Content-based Filtering Using XGBoost Classifier. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 29(04), pp. 6979–6988. URL: <http://serc.org/journals/index.php/IJAST/article/view/28099> (accessed 27.03.2021).
11. K. Madadipouya, S. Chelliah. A Literature Review on Recommender Systems Algorithms, Techniques and Evaluations. *BRAIN* [Broad Research in Artificial Intelligence and Neuroscience], 2017, vol. 8, issue 2, pp. 109–124.
12. Phys J. Summary of recommendation system development, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1187, pp. 1–5.
13. Foreign online store of literature and training videos, URL: <http://shop.oreilly.com/> (accessed 25.03.2021).
14. Free online cinema ivi.ru, <http://www.ivi.ru/> (accessed 25.03.2021).
15. Ricci F., Rokach L., Shapira B., Kantor P.B. *Recommender Systems Handbook*. Springer US, 2011. 842 P.
16. Aggarwal C. C. *Data mining*. Springer International Publishing, 2015. 734 p.
17. Portugal I., Alencar P., Cowan D. The use of machine learning algorithms in recommender systems: A systematic review. *Expert Systems with Applications*. 2018, vol. 97, pp. 205–227.
18. Li X., Wang Z., Wang L., Hu R., Zhu Q. A multidimensional context-aware recommendation approach based on improved random forest algorithm. *IEEE Access*. 2018, vol. 6, pp. 45071–45085.
19. Wang X., Wen J., Luo F., Zhou W., Ren H. Personalized recommendation system based on support vector machine and particle swarm optimization. *International Conference on Knowledge Science* [International Conference on Knowledge Science, Engineering and Management]. 2015, pp. 489–495.
20. Marović M., Mihoković M., Mikša M., Pribil S., Tus A. Automatic movie ratings prediction using machine learning. *34th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics*. 2011, pp. 1640–1645.
21. Çano E., Morisio M. Hybrid recommender systems: a systematic literature review. *Intelligent Data Analysis*. 2017, vol. 21, no. 6, pp. 1487–1524.
22. Fayyaz Z., Ebrahimian M., Nawara D. Recommendation Systems: Algorithms, Challenges, Metrics, and Business Opportunities. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*. 2020, vol.10, issue 21, p. 7748.
23. Beladev M., Rokach L., Shapira, B. Recommender systems for product bundling. *Knowl. Based Syst.* 2015, vol. 111, pp. 193–206.
24. Naveen G., Naidu A., Thirumala Dr. B. Comparative Study on Artificial Intelligence and Expert Systems. *International Research Journal of Engineering and Technology* 2019, vol. 6, issue 2, pp. 1980–1986.
25. Vilnius K. Intelligent Decision Support Systems. *Biometric and Intelligent Decision Making Supporto* 2015, pp 31–85.
26. Peter B. Keenan, Piotr J. Spatial Decision Support Systems: Three decades on. *Decision Support Systems*. 2019, vol. 116, pp. 64–76.
27. Waila, P., Singh, V., Singh, M. A Scientometric Analysis of Research in Recommender Systems. *J Scientometric Res*. 2016, vol. 5, issue 1, pp. 71–84.
28. Zhang Q., Jie Lu. Artificial intelligence in recommender systems. *Complex & Intelligent Systems*. 2020, vol. 7, pp. 439–457.
29. Luy Z., Dou Z., Lianz J. Content-Based Collaborative Filtering for News Topic Recommendation. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*. 2015, no. 29(1), pp. 217–223.
30. Li X., Xing J., Wang H., Zheng L., Jia S., Wang Q. A Hybrid Recommendation Method Based on Feature for Offline Book Personalization. *Journal of Computers*. 2019, vol. 30, no. 5, pp. 1–17.
31. Lytvynenko V., Lurie I., Krejci J. Two Step Density-Based Object-Inductive Clustering Algorithm. *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on "Mathematics. Information Technologies. Education"*. 2019, pp. 117–135.
32. Smith J., Weeks D., Freeman J., Jacob M., Magerko B., Towards a Hybrid Recommendation System for a Sound Library. *IUI Workshops'19* [Joint Proceedings of the ACM IUI 2019 Workshops]. 2019, vol. 2327, 6 p.
33. Chyrun L., Burov Y., Rusyn B. Web Resource Changes Monitoring System Development. *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on "Mathematics. Information Technologies. Education"*. 2019, pp. 255–273.

Received 07.11.2021

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

**Козуля Марія Михайлівна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4090-8481>; e-mail: [mariia.kozulia@khp.edu.ua](mailto:mariia.kozulia@khp.edu.ua)

**Сушко Владислава Володимирівна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент, магістр; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8759-6203>; e-mail: [sushko.kn36a@gmail.com](mailto:sushko.kn36a@gmail.com)

**Козуля Марія Михайлівна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» доцент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4090-8481>; e-mail: [mariia.kozulia@khp.edu.ua](mailto:mariia.kozulia@khp.edu.ua)

**Сушко Владислава Владимировна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент, магистр; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8759-6203>; e-mail: [sushko.kn36a@gmail.com](mailto:sushko.kn36a@gmail.com)

**Kozulia Mariia Mikhailovna** – candidate of engineering science, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", associated professor of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies, Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4090-8481>; e-mail: [mariia.kozulia@khp.edu.ua](mailto:mariia.kozulia@khp.edu.ua)

**Сушко Владислава Владимировна** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student, master; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8759-6203>; e-mail: [sushko.kn36a@gmail.com](mailto:sushko.kn36a@gmail.com)



*N. A. MARCHENKO, G. YU. SYDORENKO, R. O. RUDENKO*

## USING OF MULTILAYER NEURAL NETWORKS FOR THE SOLVING SYSTEMS OF DIFFERENTIAL EQUATIONS

The article considers the study of methods for numerical solution of systems of differential equations using neural networks. To achieve this goal, the following interdependent tasks were solved: an overview of industries that need to solve systems of differential equations, as well as implemented a method of solving systems of differential equations using neural networks. It is shown that different types of systems of differential equations can be solved by a single method, which requires only the problem of loss function for optimization, which is directly created from differential equations and does not require solving equations for the highest derivative. The solution of differential equations' system using a multilayer neural networks is the functions given in analytical form, which can be differentiated or integrated analytically. In the course of this work, an improved form of construction of a test solution of systems of differential equations was found, which satisfies the initial conditions for construction, but has less impact on the solution error at a distance from the initial conditions compared to the form of such solution. The way has also been found to modify the calculation of the loss function for cases when the solution process stops at the local minimum, which will be caused by the high dependence of the subsequent values of the functions on the accuracy of finding the previous values. Among the results, it can be noted that the solution of differential equations' system using artificial neural networks may be more accurate than classical numerical methods for solving differential equations, but usually takes much longer to achieve similar results on small problems. The main advantage of using neural networks to solve differential equations' system is that the solution is in analytical form and can be found not only for individual values of parameters of equations, but also for all values of parameters in a limited range of values.

**Keywords:** systems of differential equations, artificial neural networks, multilayer neural network, numerical methods, gradient descent method, solution's error function

*Н. А. МАРЧЕНКО, Г. Ю. СИДОРЕНКО, Р. О. РУДЕНКО*

## ВИКОРИСТАННЯ БАГАТОШАРОВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ

В статті розглядається дослідження методів чисельного розв'язку систем диференціальних рівнянь з використанням нейронних мереж. Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні взаємозалежні задачі: проведений огляд галузей, що потребують розв'язання систем диференціальних рівнянь, а також реалізований метод розв'язання систем диференціальних рівнянь за допомогою багатошарових нейронних мереж. В роботі показано, що різні типи систем диференціальних рівнянь можуть бути розв'язані одним методом, який потребує лише завдання функції втрат для оптимізації, що цілком створюється з диференціальних рівнянь та не потребує розв'язання рівнянь відносно найвищої похідної. Розв'язок систем диференціальних рівнянь за допомогою нейронних мереж є функції задані у аналітичній формі, що можуть бути диференційовані або інтегровані також аналітично. В ході виконання даної роботи була знайдена покращена форма побудови пробного розв'язку систем диференціальних рівнянь, що задовольняє початковим умовам за будовою, але має менший вплив на помилку розв'язку на відстані від початкових умов у порівнянні з формою побудови такого розв'язку. Також було знайдено спосіб модифікації розрахунку функції втрат для випадків, коли процес розв'язання зупиняється в локальному мінімумі, що спричиняється великою залежністю наступних значень функції від точності знаходження попередніх значень. Серед результатів можна зазначити, що розв'язання систем диференціальних рівнянь за допомогою штучних нейронних мереж може мати точність порівняну з класичними чисельними методами розв'язання диференціальних рівнянь, але зазвичай потребує значно більшого часу для досягнення близьких результатів на задачах малих розмірностей. Основною перевагою використання нейронних мереж для розв'язання систем диференціальних рівнянь є те, що розв'язок знаходиться в аналітичній формі та може бути знайдений не тільки для окремих значень параметрів системи рівнянь, але й для всіх значень параметрів в обмеженій області значень.

**Ключові слова:** системи диференціальних рівнянь, штучні нейронні мережі, багатошарова нейронна мережа, чисельні методи, метод градієнтного спуску, функція похибки розв'язку

*Н. А. МАРЧЕНКО, А. Ю. СИДОРЕНКО, Р. А. РУДЕНКО*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМ ДИФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

В статье рассматривается исследование методов численного решения систем дифференциальных уравнений с использованием нейронных сетей. Для достижения поставленной цели были решены следующие взаимосвязанные задачи: проведен обзор отраслей, требующих решения систем дифференциальных уравнений, а также реализован метод решения систем дифференциальных уравнений с помощью многослойных нейронных сетей. В работе показано, что различные типы систем дифференциальных уравнений могут быть решены единственным способом, который требует только задания функции потерь для оптимизации, создаваемой напрямую из систем дифференциальных уравнений и не требует решения систем уравнений относительно наивысшей производной. Решением систем дифференциальных уравнений с помощью нейронных сетей являются функции, заданные в аналитической форме, и могут быть дифференцированы или интегрированы также аналитически. В ходе выполнения данной работы была найдена улучшенная форма построения пробного решения систем дифференциальных уравнений, что удовлетворяет начальным условиям построения, но имеет меньшее влияние на ошибку решения на расстоянии от начальных условий по сравнению с формой построения такого решения. Также был найден способ модификации расчета функции потерь для случаев, когда процесс решения останавливается в локальном минимуме, что приводит к большой зависимости следующих значений функций от точности нахождения предыдущих значений. Среди результатов можно отметить, что решение систем дифференциальных уравнений с помощью искусственных нейронных сетей может иметь точность сравнимую с классическими численными методами решения дифференциальных уравнений, но обычно требует значительно большего времени для достижения более точных результатов на задачах малых размерностей. Основным преимуществом использования нейронных сетей для решения дифференциальных уравнений является то, что решение находится в аналитической форме и может быть найдено не только для отдельных значений параметров уравнений, но и для всех параметров в ограниченной области значений.

**Ключевые слова:** системы дифференциальных уравнений, искусственные нейронные сети, многослойная нейронная сеть, многочисленные методы, метод градиентного спуска, функция погрешности решения

**Introduction.** Differential equations and their systems are widely used in mathematical modeling to describe a variety of real processes: physical, environmental, biological, and other. Solving some equations in partial derivatives in cases that allow the separation of variables is also reduced to problems for ordinary differential equations. These are, as a rule, boundary value problems (problems of natural oscillations of elastic beams and plates, determination of the spectrum of natural values of particle energy in spherically symmetric fields, etc.). In addition, higher-order differential equations lead to the solution of systems of differential equations. It is known that solutions of differential equations and their systems can be found analytically or numerically. Finding analytical solutions is a very time consuming process, and in most cases impossible. Therefore, at present, traditional numerical methods are widely used to solve differential equations and their systems, among which the most well-known are Runge – Kutta methods, finite-difference methods, prediction and correction methods [1, 2].

The general problem of classical numerical methods is the need to choose their parameters to ensure a compromise between computational costs and the accuracy of the result. Therefore, in this work it is forbidden to use artificial multilayer neural networks, where, in contrast to classical methods, the solution is presented in analytical form, from which you can repeatedly take derivatives [3, 4]. Solutions are stored as neural network parameters, which requires much less memory than storing a solution as a discrete array in traditional numerical methods [5, 6]. The method is also universal and can therefore be used to solve different types of differential equations and their systems, both ordinary and partial derivatives [7-8].

The main advantage of using neural networks to solve differential equations' systems is that the solution is in analytical form and can be found not only for individual values of parameters of equations, but also for all values of parameters in a limited range of values.

A review of the literature showed the relevance of the problem and the feasibility of creating software. Therefore, the aim of this article is to solve systems of differential equations using a multilayer neural network.

**The article's objective** is to study the methods of numerical solution of ordinary differential equations' systems and to develop software for their solution using multilayer neural networks.

#### **The mathematical formulation of the problem.**

Suppose we need to solve a system of differential equations in the form [1, 2]:

$$F(x, Y(x), Y'(x)) = 0, \quad (1)$$

with initial conditions

$$Y(x_0) = A,$$

where  $x$  is the vector of variable values;

$Y(x) = (y_1(x), y_2(x), \dots, y_N(x))$  – required function;

$Y(x_0) = y_1(x_0), y_2(x_0), \dots, y_N(x_0)$  – coordinates of initial conditions;

$A = a_0, a_1, a_2$  – their matching values.

To solve this problem, the solution is presented in the form [3, 5]:

$$Y^*(x) = N(x, p), \quad (2)$$

where  $N$  – neural network function with  $p$  parameters and input values  $x$ .

In this case, the initial conditions are not satisfied by the creation and therefore are studied gradually during the learning of the neural network.

The construction of the solution of differential equations' systems can be written in a form that satisfies the initial conditions from the beginning:

$$Y^*(x) = A(x) + Z(x) \cdot N(x, p), \quad (3)$$

where  $A(x)$  is a function that satisfies the initial conditions in advance;

$Z(x)$  – function what construct as the points corresponding which are equal to zero to the coordinates of the initial conditions

$N(x, p)$  – output of backforward neural network with input  $x$  the weights  $p$ .

The task of a building function  $A(x)$  is reduced to the task of the function that takes a certain values in the given points, and can take any value at all other points. To find the function, for example, an interpolation polynomic of Lagrange can be used in this case that looks like:

$$Pol(x) = \sum_{i=1}^n y_i l_i(x),$$

where  $l_i(x)$  - basic polynomials are determined by the formula:

$$l_i(x) = \frac{x - x_0}{x_i - x_0} \dots \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \dots \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}} \dots \frac{x - x_n}{x_i - x_n}$$

To reduce the influence of the shape of the error of the approximation of the solution, we write the expression for  $Z(x)$  in the form:

$$Q(x) = \prod_{i=1}^s \text{th}(x - x_i)^{d_i+1} \quad (4)$$

A multilayer neural network of direct propagation is chosen as the structure of the neural network for solving differential equations' systems. The number of layers and the number of neurons in each layer are chosen based on the structure of the problem and the complexity of the form of the solution. These parameters are chosen after the experiments, because it is impossible to know in advance the optimal parameters of the neural network structure for each task.

#### **The description of a multilayer neural network.**

An artificial neural network is a structure that consists of a large number of processor elements, each of which has local memory and can interact with other elements [3, 4, 6, 9, 12]. This interaction takes place through communication channels in order to transmit data that can be interpreted in any way. Processor elements independently in time process the local data arriving to them through input channels. Changing the parameters of the algorithms of such processing depends only on the characteristics of the data. If we consider an artificial

neural network as an environment for information processing, then it can be set by defining the elements of this environment and the rules of their interaction.

Multilayer artificial neural networks can be considered as a serial connection of single-layer artificial neural networks of direct propagation. The structure of weights in these networks is organized in such a way that more complex classes are processed on layers of high-level neurons by combining and intersecting simple classes, which are formed at lower levels of artificial neural networks. There is strong evidence that two-layer artificial neural networks are able to recognize any class of convex shape, provided that it is possible to use a sufficient number of hidden layer neurons, and the weights are adjusted accordingly [8-9].

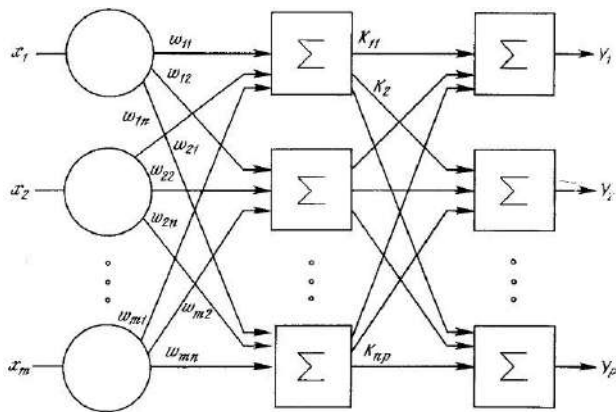


Fig. 1. The example of a scheme of a multilayer neural network of direct propagation

Artificial neural networks of direct propagation with several hidden layers are potentially capable of recognizing classes of arbitrary shape. Therefore, setting the problem on artificial neural networks of direct propagation includes determining the minimum possible number of neurons in the hidden layer and choosing an effective method of adjusting the weights. To date, both of these problems are not trivial. To explain the basic principles of building teaching methods with the teacher we will consider a two-layer artificial neural network. The zero layer of this network performs the auxiliary function of signal branching and does not contain neurons. For this reason, his work does not lead to modification of the input vector. The last layer of artificial neural networks is called the source layer. All layers located between zero and source are hidden layers with nonlinear activation function of neurons. In this example, we will consider one hidden layer with  $m$  neurons that use the hyperbolic tangent as an activation function.

It consists of  $m$  neurons that are simultaneously able to receive the input vector of signals  $X = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ . To reproduce the elements of this vector use special devices, which are shown to the left of the neurons. These devices do not perform information processing, so they are not considered a layer of the neural network. According to the model of a formal neuron, each of its input signals is multiplied by a weighting factor  $w_{ij}$ , where  $i$  – the current vector element number  $X$ , a  $j$  – the

current neuron number. All weights of a single-layer neural network form a matrix of weights

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & \dots & w_{1j} & \dots & w_{1m} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{i1} & \dots & w_{ij} & \dots & w_{im} \\ \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ w_{n1} & \dots & w_{nj} & \dots & w_{nm} \end{bmatrix}$$

Then the vector of arguments is defined as the product of  $Y = WX$  and the vector of output signals is the vector of values of activation functions:

$$Y = F(V) = \begin{cases} f_1(v_1), \\ \dots \\ f_j(v_j), \\ \dots \\ f_m(v_m). \end{cases}$$

The name of the networks indicates that they have a dedicated direction of propagation of signals that move from the input through one or more hidden layers to the output layer. It is easy to see that a multilayer neural network can be obtained by cascading single-layer networks with matrices of weights  $W^1, W^2, \dots, W^p$ , where  $p$  is the number of layers of the neural network. If the multilayer neural network is linear, then for activation functions it can be reduced to the equivalent single-layer with a matrix of weights  $W = W^1 * W^2 * \dots * W^p$ . This means that the formation of such structures makes sense if nonlinear activation functions in neurons are used.

**The gradient descent method for artificial neural networks.**

The idea of the gradient descent method is to sequentially change the parameters of the artificial neural network in a direction that reduces the target function  $E$  [5]. Since the function  $E$  is differentiated by each of the parameters, it is possible to calculate the gradient vector. Moving in the direction of the negative gradient for each of the parameters, we find the local minima of the objective function. The change in the parameter is expressed by the formula:

$$\Delta W = -\eta \frac{dE}{dW} = \eta \sum_{i=1}^N (y^{(i)} - \hat{y}^{(i)}) X^{(i)} = \quad (5)$$

$$= \eta \sum_{i=1}^N (y^{(i)} - W^T X^{(i)}) X^{(i)}.$$

This algorithm is called a batch-type algorithm, because to determine the magnitude of the step of changing the parameter, it is necessary to process the entire training sample.

The training sample  $\Psi = \{(X^{(n)}, y^{(n)})\}_{n=1}^N$  containing  $N$  pairs:  $x^{(n)}, y^{(n)}$  respectively, the input and output vectors and the set of parameters  $W = \{w, v\}$ , which consists of the parameters of the neurons of the hidden layer  $w$  and the parameters of the output layer  $v$ . The method of inverse propagation [13] is to minimize the objective function:

$$E = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N [y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)}(x)]^2 \rightarrow \min \quad (6)$$

The parameter  $v_j$  is searched as (7):

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dv_j} &= \frac{-1}{N} \sum_{n=1}^N (y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)}) \frac{d\tilde{y}^{(n)}}{dv_j} = \\ &= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)}) \varphi'(s^{(n)}) \frac{ds^{(n)}}{dv_j} = \\ &= -\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)}) \varphi'(s^{(n)}) h_j. \end{aligned} \quad (7)$$

The step of changing the weights of the source layer is equal to (8):

$$\Delta v_j = -\eta \frac{dE}{dv_j} = \frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N (y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)}) \varphi'(s^{(n)}) h_j. \quad (8)$$

The step of changing the weights of the hidden layer:

$$\begin{aligned} \Delta w_{ij} &= -\eta \frac{dE}{dw_{ij}} = \\ &= \frac{\eta}{N} \sum_{n=1}^N (y^{(n)} - \tilde{y}^{(n)}) \varphi'(s^{(n)}) v_j f'(t_j^{(n)}) x_i^{(n)}. \end{aligned}$$

But in fact, the correct calculation of values at points closer to the initial conditions is much more important than the calculation at points further away. To correct the optimization to take into account the influence of the values of the functions in the previous points on the values of the functions in the following points, the calculation of the loss function was modified to give the greatest weight to points closer to the initial conditions, keeping the sum of the loss function.

$$loss^*(x) = loss(x) * e^{-\frac{kx}{x_{max}}}, \quad (9)$$

$$loss^{**}(x) = loss^*(x) * \frac{\sum_{i=1}^p loss(x_i)}{\sum_{i=1}^p loss^*(x_i)}, \quad (10)$$

where  $loss(x)$  – the loss function;

$x$  – argument of the required function;

$x_i$  – points at which optimization is performed;

$p$  – the number of points at which optimization is performed.

### The main results of the work.

The Python and R programming languages were used for perform this work, the TensorFlow library was chosen as the machine learning library with neural

network learning support, and the PyCharm environment was used as the integrated development environment.

### 1. System of differential equations with constant coefficients

Consider the problem of solving a system consisting of three differential equations:

$$\begin{cases} y_1' = -y_1 + y_2, & y_1(0) = a_1, \\ y_2' = y_1 - 2y_2 + y_3, & y_2(0) = a_2, \\ y_3' = y_2 - y_3, & y_3(0) = a_3. \end{cases} \quad (11)$$

Solve the problem at once for many values of the initial conditions  $a_1, a_2, a_3$  in the value ranges:

$$a_1 \in [1,4], a_2 \in [0,2], a_3 \in [0,2].$$

The loss function of the differential part of the equation and the cost of the initial conditions:

```
def loss_pred(y_true, y_pred):
    y1, y2, y3 = u[:, 0:1], u[:, 1:2], u[:, 2:3]
    t = x
    dy1_dt = tf.gradients(y1, t)[0]
    dy2_dt = tf.gradients(y2, t)[0]
    dy3_dt = tf.gradients(y3, t)[0]
    eq1_r = -y1 + y2
    eq2_r = y1 - 2*y2 + y3
    eq3_r = y2 - y3
    eq1 = dy1_dt - grad_k(eq1_r, 0.1)
    eq2 = dy2_dt - grad_k(eq2_r, 0.1)
    eq3 = dy3_dt - grad_k(eq3_r, 0.1)
    loss_diff = tf.reduce_mean(eq1**2 + eq2**2 + eq3**2)
    initial_loc = (t - 0) ** 2 < 1e-7
    loss_initial = tf.reduce_sum(
        (y1[initial_loc] - a1) ** 2 +
        (y2[initial_loc] - a2) ** 2 +
        (y3[initial_loc] - a3) ** 2) /
        reduce_sum(tf.cast(initial_loc,
            y1.dtype)) + 1e-10)
    return loss_diff + loss_initial
```

Neural network transformation function to meet the initial conditions for construction:

```
def initial_condition(x, u):
    def fn(v):
        x = v[0]
        u = v[1]
    def ths(z):
        return tf.tanh(z)
    return ths(x) * u + tf.constant([a1,
        a2, a3])
    u = Lambda(fn)([x, u])
    return u
```

When using the model with the satisfaction of the initial conditions for construction, the cost function is simplified to:

```
def loss_pred(y_true, y_pred):
```

```

y1,y2,y3=u[:,0:1],u[:,1:2],u[:,2:3]
t = x
dy1_dt = tf.gradients(y1, t)[0]
dy2_dt = tf.gradients(y2, t)[0]
dy3_dt = tf.gradients(y3, t)[0]
eq1_r = - y1 + y2
eq2_r = y1 - 2*y2 + y3
eq3_r = y2 - y3
eq1 = dy1_dt - grad_k(eq1_r, 0.1)
eq2 = dy2_dt - grad_k(eq2_r, 0.1)
eq3 = dy3_dt - grad_k(eq3_r, 0.1)
loss_diff=tf.reduce_mean(eq1**2+eq2**2+
eq3**2)
return loss_diff

```

The results of solving the problem are shown in fig. 2-5.

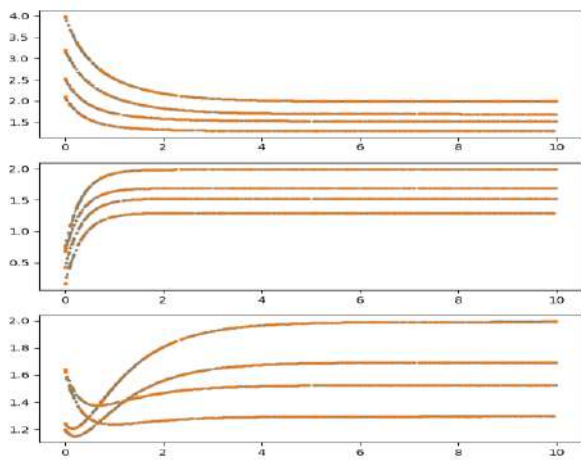


Fig. 2 The solving of the differential equations` system (11) as (2)

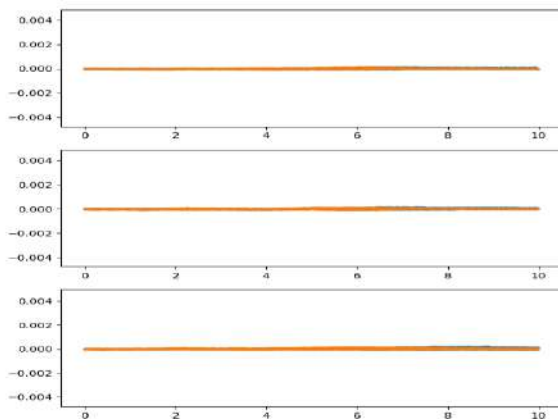


Fig. 3 The error function of the solving (2) for the differential equations` system (11)

The obtained optimization result in the basic form:  
 10000/10000-8s-loss:0.9901-rmse:0.0017-  
 val\_loss:1.0000-val\_rmse:7.7629e-04

The root mean square error is  $7.7629 \cdot 10^{-4}$  compared to the implicit solution of the 4-th order Runge – Kutta method in steps of  $10^{-3}$ . The error in half of the

points closer to the boundary conditions is 4.16 times greater than the error in half of the points at a distance from the boundary conditions.

The obtained optimization result in a form that satisfies the initial conditions for construction:  
 10000/10000 - 9s - loss: 4.3334e-07 -  
 rmse: 1.5741e-04 - val\_loss: 2.5469e-07  
 - val\_rmse: 1.6917e-04.

The root mean square error is  $1.6917 \cdot 10^{-4}$  compared to the implicit solution of the 4-th order Runge – Kutta method with step  $10^{-3}$ . The error in half of the points closer to the boundary conditions is 1.06 times less than the error in half of the points at a distance from the boundary conditions.

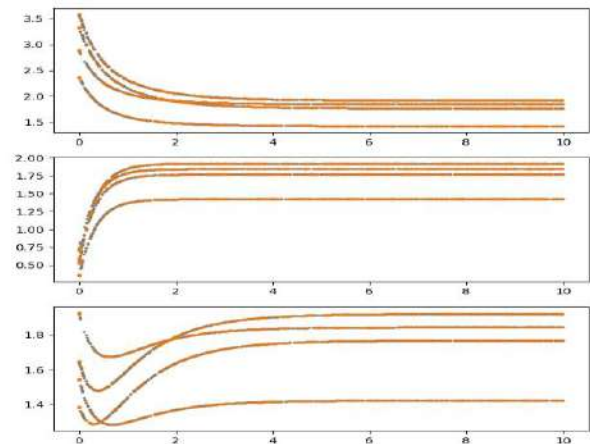


Fig. 4 The solving of the differential equations` system (11) as (3)

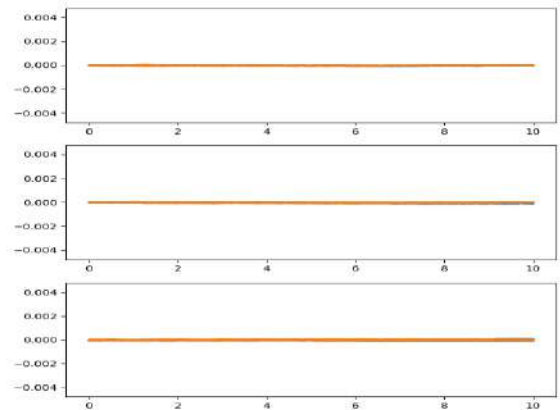


Fig. 5 The error function the differential equations` system (11) of the solving (3)

## 2. The system of nonlinear differential equations

Consider the problem of solving a system consisting of two differential equations:

$$\begin{cases} y_1' = 2(y_1 - y_1 * y_2), & y_1(0) = 1, \\ y_2' = -y_2 + y_1 * y_2, & y_2(0) = 3. \end{cases} \quad (12)$$

The loss function of the differential part of the equation and the loss of the initial conditions:

```
def loss_pred(y_true, y_pred):
```

```

y1 = u[:, 0:1]
y2 = u[:, 1:2]
t = x
dy1_dt = tf.gradients(y1, t)[0]
dy2_dt = tf.gradients(y2, t)[0]
eq1_r = 2* ( y1 - y1*y2 )
eq2_r = - y2 + y1*y2
eq1 = dy1_dt - grad_k(eq1_r, 0.02)
eq2 = dy2_dt - grad_k(eq2_r, 0.02)

loss_diff=tf.reduce_mean(eq1**2+eq2**2)
initial_loc = (t - 0) ** 2 < 1e-7
loss_initial=tf.reduce_sum(
(y1[initial_loc] - 1) ** 2 +
(y2[initial_loc] - 3) ** 2) /
(tf.reduce_sum(tf.cast(initial_loc,
y1.dtype)) + 1e-10)
return loss_diff + loss_initial

```

The neural network transformation function to satisfy the initial conditions of construction:

```

def initial_condition(x, u):
    def fn(v):
        x = v[0]
        u = v[1]
        def ths(z):
            return tf.tanh(z*4)/4
    return ths(x)*u+tf.constant([1.0,3.0])
    u = Lambda(fn) ([x,u])
    return u

```

When a model with satisfying conditions uses to construct the initial loss function extends to:

```

def loss_pred(y_true, y_pred):
    y1 = u[:, 0:1]
    y2 = u[:, 1:2]
    t = x
    dy1_dt = tf.gradients(y1, t)[0]
    dy2_dt = tf.gradients(y2, t)[0]
    eq1_r = 2* ( y1 - y1*y2 )
    eq2_r = - y2 + y1*y2
    eq1 = dy1_dt - grad_k(eq1_r, 0.02)
    eq2 = dy2_dt - grad_k(eq2_r, 0.02)
    loss_diff=tf.reduce_mean(eq1**2+eq2**2)
    al_loc, y1.dtype)) + 1e-10)
    return loss_diff

```

The obtained optimization result in the basic form:

```

10000/10000 - 1s - loss: 0.0055 - rmse:
1.1408 - val_loss: 0.0064 - val_rmse:
1.1348

```

Medium-square error is 1.1348.

The result of the optimization for the viewer (4) is shown in fig. 6–7, the result for the viewer (3) is similar. It can be seen that both options stopped at the local optimization minimum, this is due to the fact that the optimization of the neural network in the region  $t \in [2.5, 3.5]$  significantly increases the error in the region

$t \in [3.5, 10]$ , although the value the loss function is calculated for all points of equal weight.

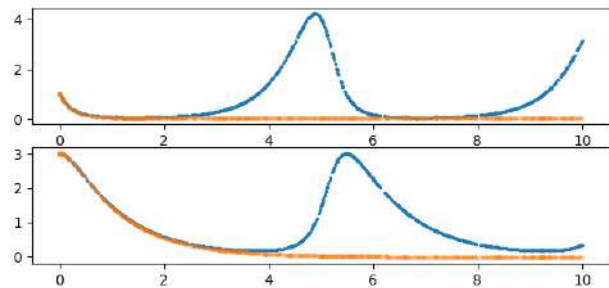


Fig. 6 The solving of the differential equations` system (12) as (2)

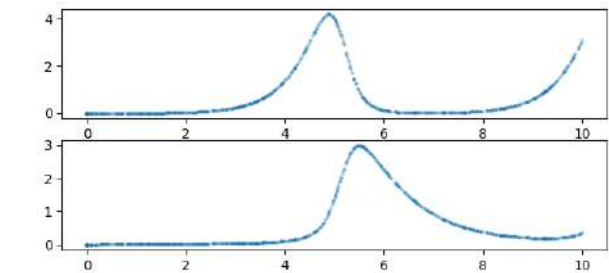


Fig. 7 The error function the differential equations` system (12) of the solving (2)

With the addition of the redistribution of the error function, the loss function is written as follows:

```

def loss_pred(y_true, y_pred):
    y1 = u[:, 0:1]
    y2 = u[:, 1:2]
    t = x
    dy1_dt = tf.gradients(y1, t)[0]
    dy2_dt = tf.gradients(y2, t)[0]
    eq1_r = 2* ( y1 - y1*y2 )
    eq2_r = - y2 + y1*y2
    eq1 = dy1_dt - grad_k(eq1_r, 0.02)
    eq2 = dy2_dt - grad_k(eq2_r, 0.02)
    eq_err = eq1 ** 2 + eq2 ** 2
    eq_err_norm= q_err*K.exp(-
10*(t/K.max(t)))
    eq_err_norm = eq_err_norm *
K.stop_gradient(K.sum(eq_err) /
K.sum(eq_err_norm))
    loss_diff =
tf.reduce_mean(eq_err_norm)
    return loss_diff

```

After modifying the loss function, the problem was successfully solved. An example of the redistribution of the error function is shown in fig. 8–9.

The final result of solving the problem is shown in fig. 10–11. The obtained optimization result in a form that satisfies the initial conditions for construction:

```

10000/10000-18s-loss: 3.3917·10-07-rmse:
1.2223·10-04- val_loss: 2.3906·10-07 -
val_rmse: 1.3370·10-04.

```

The solution has a root mean square error  $1.3370 \cdot 10^{-04}$  in comparison with the solution of the implicit Runge – Kutta’s method of the 4th order with the step  $10^{-03}$ .

**Conclusions.** The system (12) is difficult to solve with neural networks and could not be solved without additional changes to the loss function, regardless of the form of solution. The applied modification can be used in other cases, when the solution of differential equations by optimization methods coincides to the local minimum.

When solving the system (11), the accuracy of the reproduction of the initial conditions had a significant effect on the whole solution. The error of the solution in the basic form was 4.59 times higher than the error of the solution in the form with satisfaction of the initial conditions for construction.

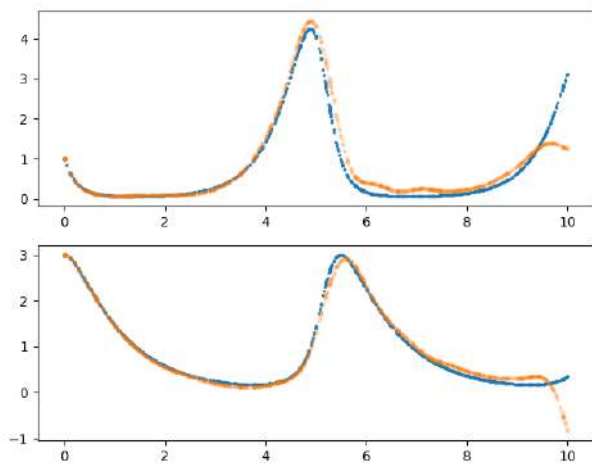


Fig. 8 The intermediate solution of the differential equations` system (12)

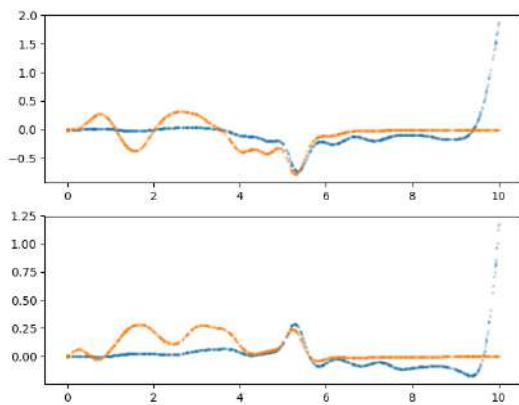


Fig. 9. The solution error`s function and the redistributed solution error function

Based on the results, we can say that the choice of the form of the solution and the construction of the loss function depends on the differential equations system and the needs of the problem to be solved. Some differential equations require special forms of construction of the loss function to be solved.

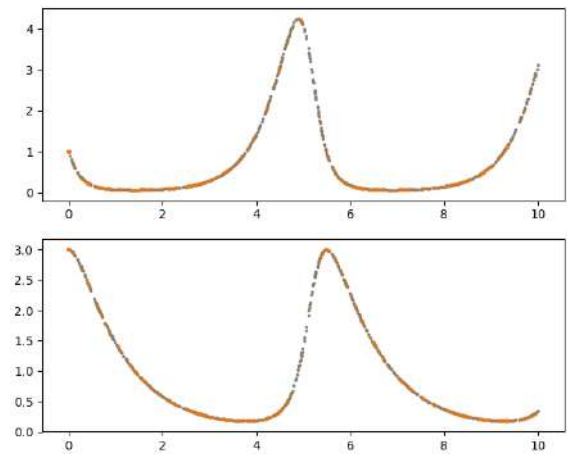


Fig. 10 The final solution of the differential equations system (12)

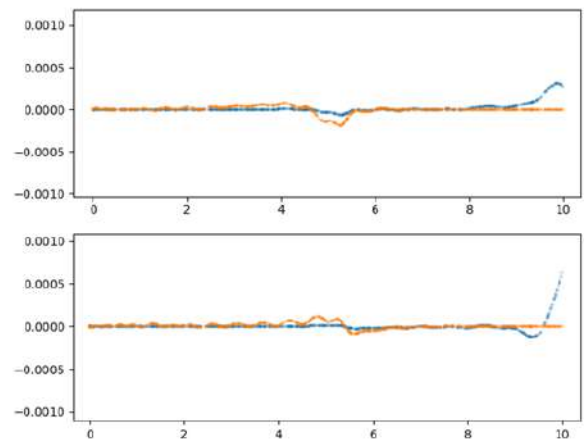


Fig. 11. The final solution error`s function and the redistributed solution error function of the differential equations system (12)

### References

1. Задачин В. М. Конюшенко І. Г. *Чисельні методи: навчальний посібник*. Харків: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. 180 с.
2. Хайер Э., Нессерт С., Ванер Г. *Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи*. Москва: Мир, 1999. 685 с.
3. Lagaris I. E., Likas A., Fotiadis D. I. Artificial Neural Networks for Solving Ordinary and Partial Differential Equations. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1998. Vol. 9. No. 5. P. 987–1000.
4. Devipriya R., Selvi S. Modelling and Solving Differential Equations using Neural Networks: A Study. *International Journal of Computational Intelligence and Informatics*. 2020. Vol. 10. No. 1. P. 18–23.
5. Okereke R. N., Maliki O. S, Oruh B. I. A novel method for solving ordinary differential equations with artificial neural networks. *Applied Mathematics*. 2021. No. 12. P. 900–918. DOI: 10.4236/am.2021.1210059.
6. Tsoulos I. G., Gavrilis D., Glavas E. Solving differential equations with constructed neural networks. *Neurocomputing*. 2009. Vol. 72. No. 10–12. P. 2385–2391.
7. Корокая Л. И. Использование нейронных сетей при численном решении некоторых дифференциальных уравнений. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2011. Vol. 3. No. 4(51). P. 24–27. ISSN 1729-3774.
8. Денисюк О.Р. Определение рациональных параметров численного решения систем дифференциальных уравнений некоторых классов. *Вестник Херсонского национального университета*.

- технічного університету. № 3(58), 2016. С. 208–212. ISSN 2078-4481.
9. Aarts L. P., Van Der Veer P. Neural network method for solving partial differential equations. *Neural Processing Letters*. 2001. Vol. 14. No. 3. P. 261–271.
  10. Sirignano J, Spiliopoulos K. DGM: A deep learning algorithm for solving partial differential equations. *Journal of computational physics*. 2018. Vol. 375. P. 1339–1364.
  11. Baymani M., Kerayechian A., Effati S. Artificial Neural Networks Approach for Solving Stokes Problem. *Applied Mathematics*. 2010. Vol. 01(04). P. 288–292. DOI:10.4236/am.2010.14037.
  12. Marchenko N. A., Sydorenko G. Yu., Rudenko R. O. Using neural networks to solve the differential equation. *Інформаційні системи та технології: праці 10-ї Міжнародної науково-технічної конференції*, / наук. ред. А.Д. Тевяшев, Л.Б. Петришин, В.В. Безкорований, В.Г. Кобзев. Харків: ХНУРЕ, 2021. P. 125–129.
- References (transliterated)**
1. Zadachyn V. M., Konyushenko I. G. Chysel'ni metody: Navchal'nyi posibnyk [Numerical methods]. Kharkiv, KhNEU Publ., 2014. 180 p.
  2. Hayrer E., Wanner G. *Reshenie obyknovennykh uravnenij. Nezhestkie sadachi*. [Solving ordinary differential equations. Non-rigid tasks]. Moscow, Mir Publ., 1999. 685 p.
  3. Lagaris I. E., Likas A., Fotiadis D. I. Artificial Neural Networks for Solving Ordinary and Partial Differential Equations. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1998, vol. 9, issue 5, pp. 987–1000.
  4. Devipriya R., Selvi S. Modelling and Solving Differential Equations using Neural Networks: A Study. *International Journal of Computational Intelligence and Informatics*. 2020, vol. 10, issue 1, pp. 18–23.
  5. Okereke R. N., Maliki O. S., Oruh B. I. A novel method for solving ordinary differential equations with artificial neural networks. *Applied Mathematics*. 2021, issue 12, pp. 900–918. DOI: 10.4236/am.2021.1210059.
  6. Tsoulos I. G., Gavrilis D., Glavas E. Solving differential equations with constructed neural networks. *Neurocomputing*. 2009, vol. 72, issue 10–12, pp. 2385–2391.
  7. Korotkaya L. I. Ispol'sovanie neyronnykh setej pri chislennoy reshenii differentsyal'nykh uravneniy [The use of neural networks in the numerical solution of some systems of differential equations]. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2011, issue 3, no. 4(51), pp. 24–27. ISSN 1729-3774.
  8. Denisyuk O. R. Opredelenie ratsyonal'nykh parametrov chislennogo reshenia system differentsyal'nykh uravneniy nekotorykh klassov [Determination of rational parameters for the numerical solution of systems of differential equations of some classes]. *Visnyk of Kherson National Technical University* [Bulletin of the Kherson National Technical University]. Kherson Publ., 2016, no. 3 (58), pp. 208–212. ISSN 2078-4481.
  9. Aarts L. P., Van Der Veer P. Neural network method for solving partial differential equations. *Neural Processing Letters*. 2001, Vol. 14, no. 3, pp. 261–271.
  10. Sirignano J, Spiliopoulos K. DGM: A deep learning algorithm for solving partial differential equations. *Journal of computational physics*. 2018, vol. 375, pp. 1339–1364.
  11. Baymani M., Kerayechian A., Effati S. Artificial Neural Networks Approach for Solving Stokes Problem. *Applied Mathematics*. 2010, no. 01(04), pp. 288–292. DOI:10.4236/am.2010.14037..
  12. Marchenko N. A., Sydorenko G. Yu., Rudenko R. O. Using neural networks to solve the differential equation. *Інформаційні системи та технології: праці 10-ї Міжнародної конференції* [Information systems and technologies IST-2021 Proceedings of the 10-th International Scientific and Technical Conference]. Kharkiv, KhNURE Publ., 2021, pp. 125–129.

Received 05.09.2021

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

**Марченко Наталія Андріївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9889-3713>; e-mail: natalia.marchenko@khi.edu.ua

**Сидоренко Ганна Юріївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій НТУ «ХПІ», доцент кафедри моделювання систем і технологій ХНУ ім. В. Н. Каразіна, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: ganna.sydoenko@khi.edu.ua

**Руденко Роман Олександрович** – магістр, інженер-програміст; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9424-6639>; e-mail: roman.rudenko.a@gmail.com

**Марченко Наталья Андреевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9889-3713>; e-mail: natalia.marchenko@khi.edu.ua

**Сидоренко Анна Юрьевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий НТУ «ХПИ», доцент кафедры моделирования систем и технологий ХНУ им. В.Н. Каразина, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: ganna.sydoenko@khi.edu.ua

**Руденко Роман Александрович** – магистр, инженер-программист; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9424-6639>; e-mail: roman.rudenko.a@gmail.com

**Marchenko Natalia Andriyivna** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of analysis of systems and information-analytical technologies NTU "KhPI", Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9889-3713>; e-mail: natalia.marchenko@khi.edu.ua

**Sydorenko Ganna Yuriyivna** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of analysis of systems and information-analytical technologies NTU "KhPI", Associate Professor at the Department of Modeling of systems and technologies KhNU by V. N. Karazin, Kharkov; Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0761-2793>; e-mail: ganna.sydoenko@khi.edu.ua

**Rudenko Roman Oleksandrovych** – Master, Software engineer; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9424-6639>; e-mail: roman.rudenko.a@gmail.com



*I. M. GODLEVSKYI, M. D. GODLEVSKYI, I. V. STATIVKA*

## INFORMATION TECHNOLOGY OF FORMING OPTION FOR LOGISTICS DISTRIBUTION CHANNEL CONFIGURATION RESISTANT TO EMERGENCIES

The problem and the main stages of choosing a rational configuration of a four-level logistics network that is resistant to the impact of emergencies for strategic planning are considered. The problem under consideration belongs to the class of multicriteria optimization problems. Criteria related to the financial costs of building and operating a logistics distribution channel, as well as criteria related to the level of quality of customer service, are contradictory. To solve the problem of stability of the logistics system configuration to emergencies, such as failure of intermediate warehouses, failure of transport arteries, etc., a strategic management information system was developed by integrating existing software components at the level of enterprise software applications. The integration of the system was based on a service-oriented architecture, as all its components are heterogeneous in nature. This approach allows you to reuse existing program code. To determine a sustainable configuration option, two criteria are used, which are considered equivalent: the level of costs for the maintenance of the logistics channel and the level of service quality in the event of different emergencies. Since the probability of emergencies is unknown, the minimax criterion is used to minimize the risk when choosing a rational configuration of the logistics network. For this purpose, losses from emergencies are calculated according to all criteria, and there is a variant of the logistics network configuration that will be the least risky. That is, we will not be able to get a worse result than the one we rely on. The results of the study are presented in the form of a configuration variant of the logistics distribution system, which can be used in the future to determine business options.

**Keywords:** strategic management, logistic system configuration option, service level, emergency situation, minimax criterion, service-oriented architecture.

*I. М. ГОДЛЕВСЬКИЙ, М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, І. В. СТАТІВКА*

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ ВАРІАНТУ КОНФІГУРАЦІЇ ЛОГІСТИЧНОГО КАНАЛУ ДИСТРИБУЦІЇ СТІЙКОГО ДО НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Розглянена задача та основні етапи вибору раціональної конфігурації чотирьохрівневої логістичної мережі, що стійка до впливу надзвичайних ситуацій, для стратегічного планування. Задача, що розглядається, належить до класу задач багатокритеріальної оптимізації. Критерії, що пов'язані з фінансовими витратами на будівництво та функціонування логістичного каналу дистрибуції, а також критерії, пов'язані з рівнем якості обслуговування споживачів, є суперечливими. Для вирішення проблеми стійкості конфігурації логістичної системи до надзвичайних ситуацій, таких як: вихід з ладу проміжних складів, відмова транспортних артерій тощо, розроблено інформаційну систему стратегічного управління за допомогою інтеграції існуючих програмних компонентів на рівні корпоративних програмних додатків. Інтеграція системи базувалася на основі сервіс-орієнтованої архітектури, так як усі її компоненти є різномірними за своєю природою. Такий підхід дозволяє перевикористати існуючий програмний код. Для визначення стійкого варіанту конфігурації використовуються два критерії, які вважаються рівноцінними: рівень витрат на утримання логістичного каналу та рівень якості обслуговування при настанні різних варіантів надзвичайних ситуацій. Так як імовірність настання надзвичайних ситуацій невідома, мінімаксний критерій використовується для мінімізації ризику при виборі раціональної конфігурації логістичної мережі. Для цього вираховуються збитки від надзвичайних ситуацій по всім критеріям, та знаходиться варіант конфігурації логістичної мережі, який буде найменш ризиковим. Тобто, ми не зможемо отримати гірший результат, ніж той, на який ми опираємося. Результати дослідження представлені у вигляді варіанту конфігурації логістичної системи дистрибуції, яка може бути використана в подальшому для визначення варіантів ведення бізнесу.

**Ключові слова:** стратегічний менеджмент, варіант конфігурації логістичної мережі, рівень сервісу, надзвичайна ситуація, мінімаксний критерій, сервіс-орієнтована архітектура.

*И. М. ГОДЛЕВСКИЙ, М. Д. ГОДЛЕВСКИЙ, И. В. СТАТІВКА*

## ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ВАРИАНТА КОНФИГУРАЦИИ ЛОГИСТИЧЕСКОГО КАНАЛА ДИСТРИБУЦИИ УСТОЙЧИВОГО К ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ

Рассмотрена задача и основные этапы выбора рациональной конфигурации четырехуровневой логистической сети, устойчивой к воздействию чрезвычайных ситуаций, для стратегического планирования. Рассматриваемая задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации. Критерии, связанные с финансовыми затратами на строительство и функционирование логистического канала дистрибуции, а также критерии, связанные с уровнем качества обслуживания потребителей, противоречивы. Для решения проблемы устойчивости конфигурации логистической системы к чрезвычайным ситуациям, таким как выход из строя промежуточных составов, отказ транспортных артерий и т.п., разработана информационная система стратегического управления посредством интеграции существующих программных компонентов на уровне корпоративных программных приложений. Интеграция системы базировалась на основе сервиса ориентированной архитектуры, так как все ее компоненты разнородны по своей природе. Такой подход позволяет использовать существующий программный код. Для определения устойчивого варианта конфигурации используются два критерия, которые считаются равноценными: уровень затрат на содержание логистического канала и качество обслуживания при наступлении различных вариантов чрезвычайных ситуаций. Так как вероятность наступления чрезвычайных ситуаций не известна, минимаксный критерий используется для минимизации риска при выборе рациональной конфигурации логистической сети. Для этого рассчитываются убытки от чрезвычайных ситуаций по всем критериям, и находится вариант конфигурации логистической сети, который будет менее рискованным. То есть мы не сможем получить худший результат, чем тот, на который мы опираемся. Результаты исследования представлены в виде варианта конфигурации логистической системы дистрибуции, которая может использоваться в дальнейшем для определения вариантов ведения бизнеса.

**Ключевые слова:** стратегический менеджмент, вариант конфигурации логистической сети, уровень сервиса, чрезвычайная ситуация, минимаксный критерий, сервис-ориентированная архитектура.

**Introduction.** Logistic system configuration is a connections such as roads through which logistics flows spatial structure of nodes such as warehouses, and move. The central production company is interested in

optimizing logistics performance to reduce transportation and storage costs. The study considers a four-level logistics network, which consists of warehouses of production, national, regional and local levels. In strategic planning, it is necessary to determine which configuration of the logistics network will be optimal for the business, so that costs are as low as possible and the level of service is as high as possible.

To minimize transportation costs, an information system has been developed [1]. The optimal location of regional warehouses and volumes of deliveries are found with the help of this information system. As a result, the decision-making expert obtains logistics network configuration options based on the entered parameters. The obtained configuration options are equivalent, but have different degrees of resistance to emergencies, for example: problems with transport, closure of warehouses, shortage of products, blockage of transport arteries, etc. The stability of the logistics network configuration is a very important characteristic for strategic management, so the expert when choosing a configuration option should be aware of the degree of its stability, so that in an emergency the logistics company suffers less damage than it could.

The aim of the work is to develop a software module for the existing information system to form a matrix of variants of losses from emergencies, which is the basis for choosing the criteria of multicriteria synthesis: maximin, maximax criteria, Hurwitz criteria and Laplace criteria. The decision-maker can choose a criterion depending on the degree of uncertainty about the probability of emergencies. The developed module helps experts to assess the degree of stability of logistics network configuration options when choosing a logistics network configuration option for strategic planning, which in the long run will help to reduce costs, losses and increase the level of service.

**Literature review.** The issue of optimizing various indicators in logistics, such as cost and level of service, has been and remains extremely relevant. Powers [2] described the importance of computer modeling in logistics and decision-making in logistics. He wrote that three types of solver technologies heuristics, optimization, and simulation are used most often when dealing with a problem being solved in logistics.

The direction of optimization in logistics was covered by Michael R. Bartolacci et al. [3], who described the process of finding optimal supply chains for a three-tier logistics network in terms of transportation costs from vendors, through distribution centers (DC) and to consumers, having for initial data DC capacities, costs per CWT shipped from vendors to DCs, costs per CWT shipped from DCs to customers and customer demands. In this work, the logistics network has only three levels, which are sometimes not enough for some logistics companies.

Recent works in the field of logistics simulation include the work of Jesus Silva et al. [4], who developed a computer simulation of the logistics distribution system and conducted experiments by changing the input

parameters of the model and obtained different levels of logistic systems performance. To model the logistics network Thibaut Demare et al. [5] utilized agent-based model and dynamic graphs to obtain a model that helps the decision making of land planning. Agent modeling can also be used to determine service levels of logistics network configuration options, as was described in Ihor Godlevskiy [6].

Multiple Criteria Decision Making (MSDM) methodology for solving problems is also often used in logistics, as it is important to find a solution that will provide an acceptable level of various criteria, such as the cost of transportation and the level of service. For example, Jacek Zak [7] demonstrated how MSDM can be utilized to obtain solutions in mass transit systems for transit system development scenarios and for crew size optimization.

**Methods.** The problem under consideration is related to strategic management, so it is important to consider the problem of resilience of the existing configuration options of the logistics channel to emergencies, such as: failure of intermediate warehouses, shortage of products, problems with transport arteries, etc.

Criteria related to the financial costs of building and operating a logistics channel, as well as criteria related to the quality level of consumer service, are contradictory.

First, variable vectors were selected:

- 1)  $S$  – determines the structure of the logistics channel.
- 2)  $P$  – determines the parameters of the system.
- 3)  $\Pi$  – determines the parameters that are set at the beginning and are immutable [8].

Next, the models of structural-parametric synthesis were defined in general terms. The first group of criteria was determined by the vector

$$\bar{F} = \{\bar{F}_i\} = \{f_i(S, P, \Pi), i \in I\}, \quad (1)$$

where  $I$  is the set of criteria of the first group [8].

The second group of criteria was defined as

$$\bar{\Phi} = \{\bar{\Phi}_j\} = \{\varphi_j(S, P, \Pi), j \in J\}, \quad (2)$$

where  $J$  is the set of criteria of the second group. The range of allowable variation of the variables vectors  $S$  and  $P$  of criteria (1), (2) was determined by the following restrictions

$$q_g(S, P, \Pi) \leq b_g, g \in G, \quad (3)$$

where  $G$  is the set of constraints,  $\{b_g\}$  is the vector of parameters, which can be determined by constraints on both the structure and the parameters of the system [8].

Since criteria (1), (2) may have a different dimension, it was brought to isomorphic form using following functions

$$\omega_i^f(f_i(S, P, \Pi)) = \frac{f_i(S, P, \Pi) - f_i^{\text{НГ}}}{f_i^{\text{НК}} - f_i^{\text{НГ}}}, i \in I, \quad (4)$$

$$\omega_j^\varphi(\varphi_j(S, P, \Pi)) = \frac{\varphi_j(S, P, \Pi) - \varphi_j^{\text{НГ}}}{\varphi_j^{\text{НК}} - \varphi_j^{\text{НГ}}}, j \in J, \quad (5)$$

where  $f_i^{HK}, f_i^{HF}$  are the best and worst values of the  $i$ -th criterion of the first group and  $\varphi_j^{HK}, \varphi_j^{HF}$  are the best and worst values of the  $j$ -th criterion of the second group [8].

The next step was to determine the weighting factors of these criteria to create complex criteria. For this purpose, the methodology of collective expert assessment was used [1] and complex criteria were presented in the following form

$$F(S, P, \Pi) = \sum_{i \in I} \rho_i^f \omega_i^f(S, P, \Pi), \quad (6)$$

$$\Phi(S, P, \Pi) = \sum_{j \in J} \rho_j^\varphi \omega_j^\varphi(S, P, \Pi). \quad (7)$$

where

$$\rho_i^f \geq 0, i \in I; \sum_{i \in I} \rho_i^f = 1; \quad (8)$$

$$\rho_j^\varphi \geq 0, j \in J; \sum_{j \in J} \rho_j^\varphi = 1, \quad (9)$$

where  $\{\rho_i^f\}, \{\rho_j^\varphi\}$  – is the vector of weighting factors of the criteria of the first and second groups [8].

Based on the variation of the variables vector  $S$  for each structure of the parameters vector  $P$ , a set of configuration options for the logistics channel was formed. From these options, a set of effective solutions  $\bar{B}$  (Pareto set) was selected.

Set of effective solutions  $\bar{B}$  – was narrowed by setting the vectors of upper and lower limits for weighting factors of importance criteria  $F$  and  $\Phi$ ,  $\mu_B = (\mu_B^F, \mu_B^\Phi)$  and  $\mu_H = (\mu_H^F, \mu_H^\Phi)$ , which met the following requirements

$$\mu_B^F, \mu_B^\Phi, \mu_H^F, \mu_H^\Phi \geq 0,$$

$$\mu_B^F + \mu_B^\Phi = 1,$$

$$\mu_H^F + \mu_H^\Phi = 1.$$

As a result, a set was formed  $B \subseteq \bar{B}$ . We assume that it consists of  $N$  configuration options for the logistics channel, the method of obtaining which is described in [9].

$$B = \{B_1, B_2, B_3, \dots, B_N\} \quad (6)$$

Next a set of emergency situations (ES) was formed  $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_M\}$  [8].

Assume that the likelihood of ES is known, and each causes a predetermined loss in terms of criteria  $F$  and  $\Phi$ , where  $i$  – version logistics channel and  $j$  – version ES (table 1).

Table 1 – Negative payoffs from the emergencies occurrence

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	...	$A_M$
$B_1$	$U_{11}$	$U_{12}$	$U_{13}$	...	$U_{1M}$
$B_2$	$U_{21}$	$U_{22}$	$U_{23}$	...	$U_{2M}$
...	...	...	...	...	...
$B_N$	$U_{N1}$	$U_{N2}$	$U_{N3}$	...	$U_{NM}$

The following criteria can be used when choosing a rational strategy [10].

1. The probability of each emergency is unknown. – Minimax criterion

$$U^* = \min_{i=1, N} \max_{j=1, M} U_{ij}$$

This strategy eliminates risk. In this case, the decision maker can not have a worse result than the one he focuses on. Therefore, it is considered that this criterion is one of the fundamental ones.

- Criterion of extreme optimism

$$U^* = \min_{i=1, N} \max_{j=1, M} U_{ij}$$

In this case, a decision maker sees his position from a gambler's point of view who bets for the best option.

- Hurwitz criterion

$$U^* = \min_{i=1, N} \bar{U}_i(\alpha),$$

where`

$$\bar{U}_i(\alpha) = \alpha \bar{m}_i + (1 - \alpha) \bar{M}_i,$$

$$\bar{m}_i = \min_{j=1, M} U_{ij},$$

$$\bar{M}_i = \max_{j=1, M} U_{ij}, 0 \leq \alpha \leq 1$$

For this criterion, the evaluation function is between the views of extreme optimism and extreme pessimism.

2. The probability of each emergency is the same. In this case, the Laplace criterion is used, which has the following form

$$U^* = \min_{i=1, N} \left\{ \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M U_{ij} \right\}$$

3. The probability of each emergency is known and these probabilities are equal to  $\bar{P}_1, \bar{P}_2, \dots, \bar{P}_M$ . Then

$$U^* = \min_{i=1, N} \left\{ \sum_{j=1}^M \bar{P}_j U_{ij} \right\}$$

The minimax criterion was used for rational strategy choosing, which provides the greatest caution in the choice for the situation where the probability of occurrence of each emergency is unknown.

Further the matrix  $U = \{U_{ij}\}$  (table 1) was formed on the basis of a complex criterion  $W$ , which is determined by convolution of criteria  $F$  and  $\Phi$

$$W = \rho^F F + \rho^\varphi \Phi; \rho^F, \rho^\varphi \geq 0, \rho^F + \rho^\varphi = 1, \quad (10)$$

where  $\rho^F, \rho^\varphi$  – weight coefficients of complex criteria of the first and second groups [8].

Sets  $B$  and  $A \times B$  meet the following values of the criteria of the first and second groups

$$B = \{B_i, i = \overline{1, N}\} \Rightarrow \{\overline{W}_i, i = \overline{1, N}\}, \quad (10)$$

$$(B \times A) = \{B_i, i = \overline{1, N}\} \times \{A_j, j = \overline{1, M}\} \Rightarrow \{\overline{W}_{ij}, i = \overline{1, N}, j = \overline{1, M}\}.$$

As a result, the elements of the matrix  $U$  are

$$U_{ij} = (\overline{W}_i - \overline{W}_{ij}), \quad i = \overline{1, N}; \quad j = \overline{1, M} \quad [8].$$

**Information technology.** Consequently an information system was created to find a rational variant of the logistics network configuration. For this purpose, the previously implemented services of finding the optimal variant of the logistics network configuration and finding the service level were integrated. The integration was carried out at the level of enterprise software applications (Enterprise Application Integration – EAI), which means reusing not only the internal data of the applications being integrated, but also their program code. Technology based on service-oriented architectures (SOA) was used as the integration technology [11]. Fig. 1 depicts the interaction of integrated components.

**Results.** A total of 4 configurations with different constraints of regional warehouse number were analyzed using 3 types of emergencies: closing of a regional

warehouse that serves logistic channel, changing the shortest way from national to the regional warehouse due to road repair, closing national warehouse. The results of the changes in configurations are shown as the list of warehouses of the regional level.

Configuration 1 has the constraint of national warehouses number equals 5 which are: Zhytomyr, Kyiv, Dnipro, Odesa, Mykolaiv (table 2). Emergency 1 is closing the regional warehouse in Dnipro city. When emergency 1 happened logistic system configuration changed and a regional warehouse in Lutsk city would be opened. Emergency 2 is the situation when the road Odesa – Mykolaiv (132 km long) is closed due to road repair and the detour is 479 km long. When emergency 2 occurs, it is cheaper to open a warehouse in Lutsk city than transport products from Odesa to Mykolaiv by detour. Emergency 3 is a temporary or permanent closing of a national level warehouse in Odesa. If situation 3 happened, a regional warehouse in Kharkiv city would be opened.

Configuration 2 has the constraint of national warehouses number equals 6 which are: Zhytomyr, Kyiv, Dnipro, Odesa, Mykolaiv, Lutsk (table 3). When emergency 1 happened regional warehouse in Kharkiv city would be opened replacing one in Dnipro. When emergency 2 happened regional warehouses in Kharkiv and Lviv cities would be opened. If situation 3 happened, a regional warehouses in Lviv and Kharkiv cities would be opened instead of Mykolaiv and Kyiv warehouses.

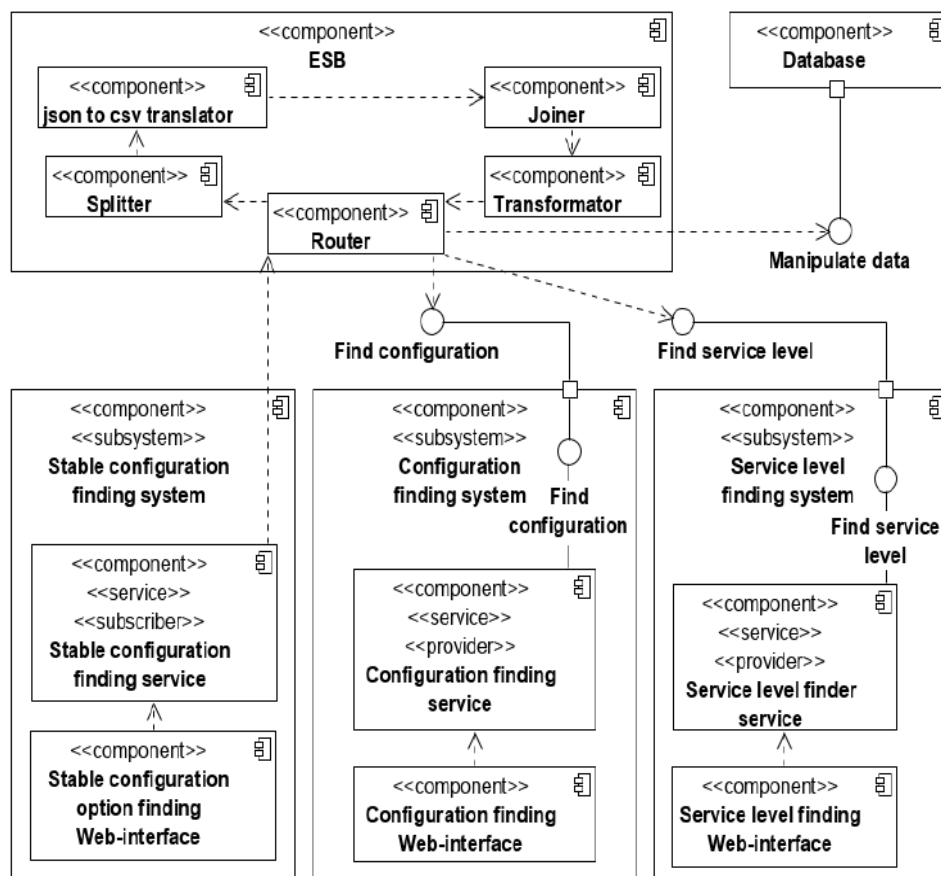


Fig. 1. Components diagram

Table 2 – Regional warehouses for configuration 1 in different emergencies

Configuration 1			
Emergency absence	Emergency		
	1	2	3
Zhytomyr	Zhytomyr	Zhytomyr	Zhytomyr
Kyiv	Kyiv	Kyiv	Kyiv
Dnipro	Lutsk	Dnipro	Lutsk
Odesa	Odesa	Odesa	Odesa
Mykolaiv	Mykolaiv	Lutsk	Kharkiv

Table 3 – Regional warehouses for configuration 1 in different emergencies

Configuration 2			
Emergency absence	Emergency		
	1	2	3
Zhytomyr	Zhytomyr	Zhytomyr	Zhytomyr
Lutsk	Lutsk	Lutsk	Lutsk
Kyiv	Kyiv	Kyiv	Kharkiv
Dnipro	Kharkiv	Lviv	Dnipro
Odesa	Odesa	Odesa	Odesa
Mykolaiv	Mykolaiv	Kharkiv	Lviv

Tables 4–6 show regional warehouses that were selected for emergencies 1–3 in comparison with the initial configuration.

Table 4 – Regional warehouses for configuration 1 in different emergencies

Configuration 3			
Emergency absence	Emergency		
	1	2	3
Zhytomyr	Zhytomyr	Zhytomyr	Zhytomyr
Lutsk	Lutsk	Lutsk	Lutsk
Kyiv	Kyiv	Kyiv	Kyiv
Dnipro	Kharkiv	Dnipro	Dnipro
Odesa	Odesa	Odesa	Odesa
Lviv	Lviv	Lviv	Lviv
Mykolaiv	Mykolaiv	Mykolaiv	Kharkiv

Table 5 – Regional warehouses for configuration 1 in different emergencies

Configuration 4			
Emergency absence	Emergency		
	1	2	3
Zhytomyr	Zhytomyr	Zhytomyr	Zhytomyr
Lutsk	Lutsk	Lutsk	Lutsk
Kyiv	Kyiv	Kyiv	Kyiv
Dnipro	Odesa	Dnipro	Dnipro
Odesa	Lviv	Odesa	Odesa
Lviv	Kharkiv	Lviv	Lviv
Kharkiv	Mykolaiv	Kharkiv	Kharkiv
Mykolaiv		Mykolaiv	Mykolaiv

As a result of changing logistic system configuration due to emergencies, products are transported over longer distances than in initial configurations. This leads to increasing in the cost of goods transportation.

Table 6 represents the value of the negative payoffs from the emergency occurrence.

Table 6 – Negative payoffs from the emergencies occurrence

	Emergency 1	Emergency 2	Emergency 3
Configuraion 1	0.0120	0.0120	0.8115
Configuraion 2	0.0646	0.0646	0.5693
Configuraion 3	0.0744	0.0625	0.3027
Configuraion 4	0.4908	0.5161	0.3191

As fundamental minimax criterion was used to eliminate the risk of choosing the worst alternative than foreshadowed one, configuration 3 was selected as the most rationable configuration. When using other criteria, the result may differ from that obtained.

Further use of the obtained results is associated with determining the option of doing business using the method of hierarchies analysis based on SWOT analysis [12].

**References**

1. Годлевский М. Д., Станкевич А. А., Годлевский И. М. Технология формирования системы организационного управления логистикой дистрибуции при стратегическом планировании. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. №4/3 (58). С. 17–21.
2. Powers, Richard F. Optimization Models For Logistics Decisions. *Journal of Business Logistics*. 1989. Vol. 10, iss. 1. P. 106–121.
3. Bartolacci M., LeBlanc L., Kayikci Y., Grossman T. Optimization Modeling for Logistics: Options and Implementations. *Journal of Business Logistics*. 2012. Vol. 33, issue 2. P. 118–127.
4. Silva J., Hernandez L., Crissien T., Bonerge O., Lezama P., Portillo R. Model and Simulation of a Distribution Logistic System for Learning. *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 160. P. 635–640.
5. Démare T., Bertelle C., Dutot A., Lévêque L. Modeling logistic systems with an agent-based model and dynamic graphs. *Journal of Transport Geography*. 2017. Vol. 62. P. 51–65.
6. Годлевський І. М., Гівський Д. О. Технологія багатокритеріального синтезу та вибору розподіленої організаційної структури управління логістичною системою дистрибуції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, № 55 (1276). С. 72–76.
7. Zak J. The methodology of multiple criteria decision making/aiding in public transportation. *Journal of Advanced Transportation*. 2010. Vol. 45. P. 1–20. doi: 10.1002/atr.108.
8. Годлевський І. М. *Моделі, методи та інформаційна технологія синтезу організаційної структури системи управління логістикою дистрибуції: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06*. Харків, 2020. 176 с.
9. Годлевський І. М., Туревич М. Д., Медведєв В. В. Інформаційна технологія формування варіантів конфігурації логістичного каналу дистрибуції. *Сучасні інформаційні системи*. 2020, Т. 4, №1. С. 63–70.
10. Мушник Э., Мюллер П. *Методы принятия технических решений*. Москва: Мир, 1990. 208 с.
11. Fowler M. *Patterns of Enterprise Application architecture*. Boston: Addison-Wesley, 2003. 559 p.
12. Saaty T. Transport Planning with Multiple Criteria: The Analytic Hierarchy Process Applications and Progress Review. *Journal of Advanced Transportation*. 1995. Vol. 29(1). P. 81–126.

**References (transliterated)**

1. Godlevskiy M. D., Stankevich A. A., Godlevskiy I. M. Tekhnologiya formirovaniya sistemy organizatsionnogo upravleniya logistikoy distribyutsii pri strategicheskoy planirovaniy [Distribution logistic organizational management system technology formation

- with strategic planning]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies]. 2012, no. 4/3 (58), pp. 17–21.
2. Powers, Richard F. Optimization Models For Logistics Decisions. *Journal of Business Logistics*. 1989, vol. 10, issue 1, pp. 106–121.
  3. Bartolacci M., LeBlanc L., Kayikci Y., Grossman T. Optimization Modeling for Logistics: Options and Implementations. *Journal of Business Logistics*. 2012, vol. 33, iss. 2, pp. 118–127.
  4. Silva J., Hernandez L., Crissien T., Bonerge O., Lezama P., Portillo R. Model and Simulation of a Distribution Logistic System for Learning. *Procedia Computer Science*. 2019, vol. 160, pp. 635–640.
  5. Demare T., Bertelle C., Dutot A., Leveque L. Modeling logistic systems with an agent-based model and dynamic graphs. *Journal of Transport Geography*. 2017, vol. 62, pp. 51–65.
  6. Godlevskiy I. M., Hiiievskiy D. O. Tekhnolohiia bahatokryterialnoho syntezy ta vyboru rozpodilenoї orhanizatsiinoї struktury upravlinnia lohistychnoiu systemoiu dystrybutsii [Technology of multiple-criteria synthesis and choice of distributed organizational management structure of distribution logistics system]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI"* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 55, pp. 72–76.
  7. Zak J. The methodology of multiple criteria decision making/aiding in public transportation. *Journal Advanced Transportation*. 2010, vol. 45, pp. 1–20. doi: 10.1002/atr.108.
  8. Godlevskiy I. M. *Modeli, metody ta informatsiina tekhnolohiia syntezy orhanizatsiinoї struktury systemy upravlinnia lohistykoiu dystrybutsii: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Models, methods and information technology synthesis of the organizational structure of the logistics distribution management system. Candidate eng. sci. diss. (Ph. D.)]. Kharkiv, 2020. 176 p.
  9. Godlevskiy I. M., Turevych M. D., Medvediev V. V. Informatsiina tekhnolohiia formuvannia variantiv konfihuratsii lohistychnoho kanalu dystrybutsii [Information technology forming options for logistics distribution channel configuration]. *Suchasni informatsiini systemy* [Advanced Information Systems]. 2020, vol. 4, no. 1, pp. 63–70.
  10. Muschick E., Muller P. *Entscheidungspraxis*. Berlin, VEB Verlag Technik, 1987. 142 p. (Russ. ed.: Muschick E., Muller P. *Metody prinyatiya tekhnicheskikh resheniy*. Moscow, Mir Publ., 1980. 208 p.).
  11. Fowler M. *Patterns of Enterprise Application architecture*. Boston, Addison-Wesley, 2003. 559 p.
  12. Saaty T. Transport Planning with Multiple Criteria: The Analytic Hierarchy Process Applications and Progress Review. *Journal of Advanced Transportation*. 1995, vol. 29(1), pp. 81–126.

Received 01.10.2021

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

**Годлевський Ігор Михайлович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», асистент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; тел.: (097) 305-00-50; e-mail: godlevskiy.igor@gmail.com.

**Годлевський Михайло Дмитрович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; тел.: (057) 707-65-20; e-mail: god\_asu@kpi.kharkov.ua.

**Статівка Ірина Віталіївна** – студентка магістратури кафедри «Програмна інженерія та інформаційні технології управління», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; тел.: (099) 527-15-39; e-mail: stativka.iryana@gmail.com.

**Годлевский Игорь Михайлович** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (097) 305-00-50; e-mail: godlevskiy.igor@gmail.com.

**Годлевский Михаил Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», заведующий кафедрой программной инженерии и информационных технологий управления; тел.: (057) 707-65-20; e-mail: god\_asu@kpi.kharkov.ua.

**Стативка Ирина Витальевна** – студентка магистратуры кафедры «Программная инженерия и информационные технологии управления», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (099) 527-15-39; e-mail: stativka.iryana@gmail.com.

**Godlevskiy Ihor Mykhailovych** – Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of Department of Software Engineering and Management Information Technologies; тел.: (097) 305-00-50; e-mail: godlevskiy.igor@gmail.com.

**Godlevskiy Mykhaylo Dmytrovych** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of Department of Software Engineering and Management Information Technologies; тел.: (057) 707-65-20; e-mail: god\_asu@kpi.kharkov.ua.

**Stativka Iryna Vitaliivna** – student of the department of Software Engineering and Management Information Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»; тел.: (099) 527-15-39; e-mail: stativka.iryana@gmail.com.

*С. В. ПОГРЕБНЯК, О. О. ВОДКА*

### **ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ АПРОКСИМАЦІЇ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ГУМОПОДІБНИХ МАТЕРІАЛІВ**

У XXI сторіччі нейронні мережі широко використовуються в різних сферах, в тому числі в комп'ютерному моделюванні і в механіці. Така популярність через те, що вони дають високу точність, швидко працюють та мають дуже широкий спектр налаштувань. Мета роботи створення програмного продукту з використанням елементів штучного інтелекту, для інтерполяції та апроксимації експериментальних даних. Програмне забезпечення повинно коректно працювати, та давати результати з мінімальною похибкою. Недоліком використання математичних підходів до обчислення та прогнозування петель гістерезису є те що вони досить погано описують розвантаження, таким чином отримуємо не коректні данні для розрахунків напружено-деформованого стану конструкції. Інструментом вирішення було використання елементів штучного інтелекту, а точніше нейронних мереж прямого поширення. В роботі збудована та навчена нейронна мережа прямого поширення. Вона була навчена вчителем (вчитель з використанням метода зворотного розповсюдження похибки) на основі навчаючої вибірки попередньо проведеного експерименту. Для тестування було побудовано декілька мереж різної структури, які отримували на вхід однаковий набір даних який не використовувався при навчанні, але був відомий з експерименту, таким чином була знайдена похибка мережі за кількістю виділеної енергії та за середньо-квадратичним відхиленням. У статті детально описується математична інтерпретація нейронних мереж, спосіб їх навчання, попередньо проведений експеримент, архітектура мережі та її топологія, метод навчання, підготовки навчаючої вибірки та вибірки тестування. В результаті проведеної роботи було збудоване та протестоване програмне забезпечення в якому використовувалась штучна нейронна мережа, було побудовано та протестоване декілька типів нейронних мереж з різними вхідними даними та внутрішніми структурами, визначені їх похибки, сформовані позитивні та негативні якості мереж які використовувались.

**Ключові слова:** штучна нейронна мережа, комп'ютерне моделювання, штучний інтелект, апроксимація, інтерполяція, програмне забезпечення.

*С. В. ПОГРЕБНЯК, А. А. ВОДКА*

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ РЕЗИНОПОДОБНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В XXI веке нейронные сети часто используются в разных сферах, в том числе и компьютерном моделировании, и механике. Такая популярность, потому что, они дают высокую точность, быстро работают и имеют очень обширный спектр настроек. Целью работы является создание программного продукта с использованием элементов искусственного интеллекта, для интерполяции и аппроксимации экспериментальных данных. Программное обеспечение должно корректно работать, и давать результаты с минимальной ошибкой. Недостатком использования математических подходов к расчетам и прогнозированию петель гистерезиса есть то, что они достаточно плохо описывают разгрузку, таким образом, получаем не корректные данные для расчетов напряженно-деформированного состояния конструкции. Инструментом для решения было использовано элементы искусственного интеллекта, а точнее нейронные сети прямого распространения. В работе построена и обучена нейронная сеть прямого распространения. Она обучалась с учителем (учитель с использованием метода обратного распространения ошибки) на основе обучающей выборки предварительно проведенного эксперимента. Для тестирования было построено несколько сетей разной структуры, которые на вход получали одинаковый набор данных, который не использовался при обучении, но был известен из эксперимента, таким образом была найдена ошибка сети по количеству выделенной энергии и по среднеквадратическому отклонению. В статье подробно описывается математическая интерпретация нейронных сетей, способ их обучения, предварительно проведенный эксперимент, архитектура сети и ее топология, метод обучения, подготовка обучающей выборки, и выборки тестирования. В результате проведенной работы было построено и протестировано программное обеспечение, в котором использовалась искусственная нейронная сеть, было построено и протестировано несколько типов нейронных сетей с разными входными данными и внутренними структурами, определена ошибка их работы, сформированы позитивные и негативные стороны сетей, которые использовались.

**Ключевые слова:** искусственная нейронная сеть, компьютерное моделирование, искусственный интелект, аппроксимация, интерполяция, программное обеспечение

*S. V. POHREBNIYAK, O. O. VODKA*

### **THE USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR APPROXIMATION OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF RUBBER-LIKE MATERIALS**

In the XXI century, neural networks are widely used in various fields, including computer simulation and mechanics. This popularity is due to the fact that they give high precision, work fast and have a very wide range of settings. The purpose of creating a software product using elements of artificial intelligence, for interpolation and approximation of experimental data. The software should work correctly, and yield results with minimal error. The disadvantage of using mathematical approaches to calculating and predicting hysteresis loops is that they describe unloading rather poorly, thus, we obtain incorrect data for calculating the stress-strain state of a structure. The solution tool use of elements of artificial intelligence, but rather neural networks of direct distribution. The neural network of direct distribution has been built and trained in this work. It has been trained with a teacher (a teacher using the method of reverse error propagation) based on a learning sample of a pre-experiment. Several networks of different structures were built for testing, which received the same dataset that was not used during the training, but was known from the experiment, thus finding a network error in the amount of allocated energy and in the mean square deviation. The article describes in detail the mathematical interpretation of neural networks, the method for training them, the previously conducted experiment, structure of network that was used and its topology, the training method, preparation of the training sample, and the test sample. As a result of the robots carried out, the software was tested in which an artificial neural network was used, several types of neural networks with different input data and internal structures were built and tested, the error of their work was determined, the positive and negative sides of the networks that were used were formed.

**Keywords:** artificial neural network, computer modeling, artificial intelligence, approximation, interpolation, software

**Вступ.** Комп'ютерне моделювання у XXI науки та техніки. Вони дають можливість швидко сторіччі широко використовується у різних сферах обробляти та відновлювати результати. Нейронні

мережі все частіше і частіше застосовуються у наукових та прикладних програмних комплексах. Вони дають змогу швидко та якісно обробляти результати, давати прогноз та проміжні значення. За умови гарної побудови їх структури та навчання, вони здатні давати результати з мінімальною похибкою. Таким чином використання нейронних мереж у моделюванні, це можливість отримувати результати високої якості за мінімальний проміжок часу, також вони спроможні відтворювати результати за інших умов або давати прогноз. Отже, для обробки результатів експерименту це досить гарний інструмент, який зможе апроксимувати та інтерполювати данні з високою точністю.

**Літературний огляд.** В статті [1] приводиться приклад створення рекурентної мережі, яка на вхід отримує, наступні параметри: кут напруження, напруження, кут циклу, та дельта напруження. На виході дана мережа дає деформацію. Недоліком даної мережі, є те що нормалізація даних проводилась в діапазоні від 0,1 до 0,9 та 1,0 до 12,0, за таких вхідних даних існує вірогідність того що данні з більшим значенням будуть мати пріоритет, це може вплинути на швидкість навчання мережі, так і на виникнення помилок при використанні мережі, так як данні дуже сильно розбігаються. Також пропонується створення рекурентної мережі, за такої мережі неможливо відстежити внутрішні перебіги, коли вони виконуються а коли ні, за таких умов також можна потрапити в зону коли мережа буде давати не коректні відповіді.

В роботі [2] використовувалась мережа прямого поширення для пошуку інтегралу напруження по деформації. На вхід подаються 3 напруження (1 поточне та 2 попередніх) та 3 деформації (1 поточне та 2 попередніх). Недоліком даної моделі є те що вона рахує лише кількість виділеної енергії що можна вирахувати чисельно звичайним інтегралом, для чого не обов'язково використовувати нейронну мережу. Також у даного способу відсутня апроксимація та інтерполяція.

В статті [3] використовувалися мережа прямого поширення, на вхід якої подавалися наступні параметри: напруження та деформації (4 напруження, 3 з яких були попередніми та 3 попередні деформації) на виході отримували поточну деформацію, детальніше про даний тип мережі описано в статті [4]. В результаті проведених експериментів було встановлено що мережа дає досить гарний результат при гарно навченій мережі. Так як, на відміну від попередньої статті використовували данні відмасштабовані в проміжок від -1 до 1, таким чином зменшилась вірогідність впливу тих чи інших даних на відповідь мережі, а отже і вірогідність отримати значну похибку зменшилась. Така мережа дає змогу в подальшому інтерполювати проміжні результати з високою точністю, та з легкістю отримати кількість виділеної енергії. Тобто дана робота об'єднала в собі можливості двох попередніх.

**Постановка задачі.** В роботі пропонується розробити програмний комплекс, що дозволяє автоматизувати обробку експериментальних даних з використанням штучних нейронних мереж. Для цього необхідно виконати наступні задачі:

– З літературних оглядів визначити типові способи побудови штучної нейронної мережі (ШНМ) та результати їх роботи;

– Розробити ШНМ для апроксимації та інтерполяції експериментальних даних за допомогою бібліотеки Tensorflow та мови програмування Python;

– Підготувати данні для навчання та провести навчання;

– Протестувати роботу програмного комплексу та оцінити точність її роботи.

**Навчання ШНМ.** Загальний вигляд ШНМ[5]:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i\right), \quad (1)$$

де,  $n$  – кількість вхідних параметрів,  $w_i$  – вагові коефіцієнти,  $x_i$  – вхідні сигнали,  $f(\dots)$  – функція активації.

Першочергово вагові коефіцієнти задаються випадковим чином, тому для їх корекції проводять навчання.

Моделювання навчання за допомогою комп'ютера передбачає постійну зміну ваг і порогів таким чином, що класифікація набуває більш високий рівень після кожного кроку. Навчання може бути реалізовано різними алгоритмами:

– Навчання з учителем – відомі вихідні результати нейронної мережі;

– Навчання без вчителя – нейронна мережа опрацьовує тільки вхідні дані та самостійно формує вихідні результати. Такі мережі називають самоорганізаційними;

– Навчання з підкріпленням – система призначення штрафів і заохочень від середовища.

Метою навчання є зменшення похибки відповіді мережі [6]. При кожному з типів навчання відбувається знаходження подібностей. При навчанні з учителем відбувається корекція вагових коефіцієнтів, після кожної ітерації вчитель порівнює відповідь мережі та яку повинні були отримати та корегує їх з метою зменшення різниці між відповіддю мережі та відповіддю експерименту (ця помилка називається помилкою навчання).

В роботі використовувалось навчання з учителем, методом зворотного розповсюдження помилки [7]. Алгоритм дії наступний:

1. Задаються початкові вагові коефіцієнти випадковим чином;
2. Подається на вхід ШНМ наступний вектор з навчаючої вибірки;
3. Обчислюється вихідне значення мережі;
4. Обчислюється різниця між відповіддю мережі та потрібним значенням;
5. Корегуються вагові коефіцієнти для зменшення похибки;
6. Повторюються кроки з 2 по 5 доки не мінімізується похибка до заданої або до кількості ітерацій [8, 9].

Корекція вагових коефіцієнтів вихідного шару:



Вводиться величина  $\delta$  яка відповідає наступній формулі:

$$\delta_q = OUT_q(1 - OUT_q)(T_q - OUT_q), \quad (2)$$

де  $T_q$  – потрібне значення,  $OUT_q$  – відповідь мережі, індекс  $p$  – нейрон з якого виходить синоптична вага,  $q$  – нейрон в який входить.

Далі корегуємо вагові коефіцієнти:

$$w_{p-q}(i + 1) = w_{p-q}(i) + \mu \delta_q OUT_p, \quad (3)$$

де  $i$  – номер поточної ітерації навчання,  $w_{p-q}$  – вага синоптичного нейрону з'єднуючого нейрон  $p$  з нейроном  $q$ ,  $\mu$  – коефіцієнт швидкості навчання,  $OUT_p$  – вихід з нейрона  $p$ .

Корекція вагових коефіцієнтів прихованого шару:

$$\delta_q = OUT_q(1 - OUT_q) \sum_{k=1}^N \delta_k w_{q-k}, \quad (4)$$

Корекція вагових коефіцієнтів відбувається за формулою аналогічною для корекції вихідного шару [10].

**Опис попередньо проведеного експерименту.**

Дослідження статичної міцності і визначення кривої деформації проводили з використанням спеціалізованого вимірювального комплексу Цвік / Роелл Z100 [11–12]. Зразки відповідали геометричним стандартам для механічних випробувань гумових подібних матеріалів і резинокордних композитів ISO 527-2 1A.

Зразки мали такі геометричні параметри: фактичну товщину:  $10 \pm 0,1$  мм; ширина: 10 мм; довжина робочої частини: 80 мм; Загальна довжина: 150 мм. Товщина зразків має варіації 1 % через технологічні допуски, який існує у виробництві композитних листів. Інші параметри мають точні значення, тому що всі зразки були отримані шляхом розрізання їх, використовуючи один і той же штамп зі стандартним розміром. На рис. 1 показаний схематичний креслення геометрії зразків та його фотографії.

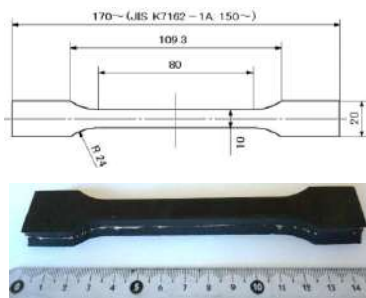


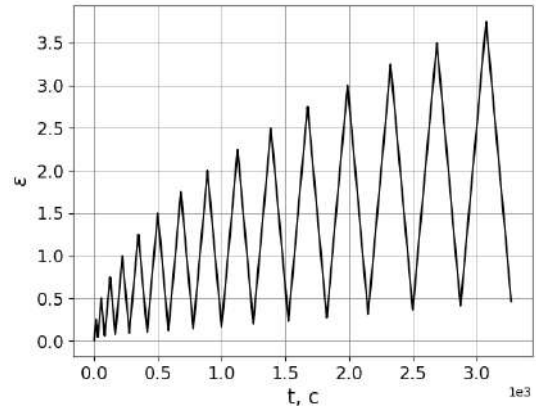
Рис. 1. Геометрія зразків для випробувань

Зразки були жорстко закріплені за допомогою механічних затискачів. Таким чином, виміряли зусилля, які відбуваються в нижніх затискачах за допомогою стандартних датчиків (максимальне зусилля  $10 \text{ kN} \pm 0,01 \text{ N}$ ). Результати автоматично записуються кожні 0,1 секунди. В ході випробувань зразки мали циклічні навантаження з фіксованими

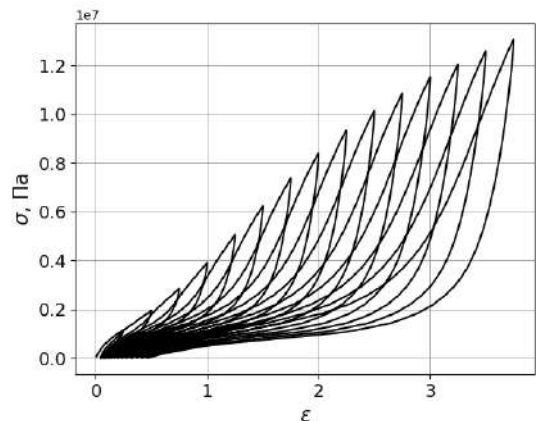
рівнями деформації, що дозволяє визначити пружні властивості таких матеріалів в стабілізованому стані.

Напруження отримані за цими програмними навантаженнями наведені на рис. 2, а. Характерні криві деформації-напруження експерименту проводились за програми навантаження рис. 2, б.

Після проведення даного експерименту було отримано файл з даними залежності часу, напруження та деформації. Так як проводити даний експеримент це коштвна річ, було вирішено розробити програмний комплекс який відтворював результати. Цей спосіб є менш затратний фінансово та займає менше часу.



а



б

Рис. 2. Цикли навантаження, що використовувалось для навчання мережі: а – програма навантаження, б – результат експерименту.

Із даного експерименту було обрано 2 цикли для навчання та 1 цикл для оцінки похибки мережі. На рис. 3

На рис. 3, зображені дані для навчання та для оцінки похибки роботи нейронної мережі (номера 1 та 3 використовувалися для навчання, для оцінки похибки використовувалися дані під номером 2).

За площею петель можна визначити кількість теплоти яка виділилась під час проведення експерименту. Або за формулою:

$$W = \frac{1}{2T} \int_0^T \sigma(t)\varepsilon(t)dt, \quad (5)$$

де  $T$  – час.

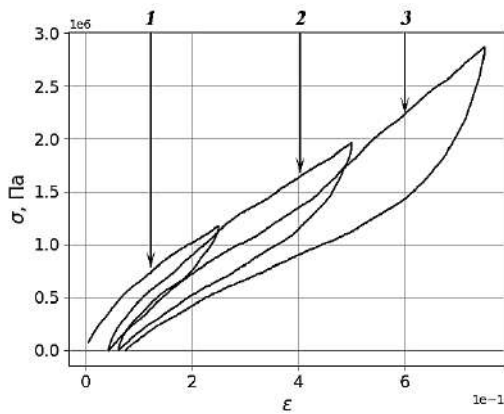


Рис. 3. Вхідні дані для навчання ШНМ

Визначене тепловиділення композитних матеріалів є важливою практичною задачею при дослідженнях теплового стану композитних матеріалів при циклічному навантаженні.

**Розробка нейронної мережі.** Для розробки нейронної мережі будемо використовувати мережу прямого розповсюдження (в ній нейрони поточного шару мають зв'язки тільки з нейронами наступного та не мають зв'язків з нейронами з попередніх шарів). Вхідні параметри будемо використовувати:

- попередня деформація;
- знак деформації.

Також для стабілізації мережі були протестовані додаткові данні які подавались на вхід мережі це – дотична до петлі гістерезису (рис. 4, а) або інтеграл за пройденим шляхом (рис. 4, б). На виході мережі очікуємо напруження.

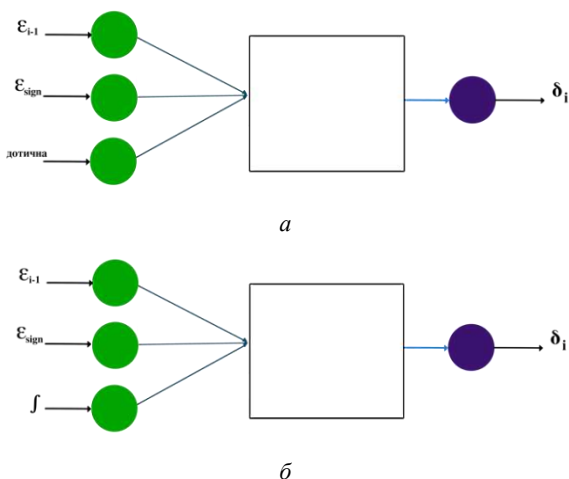


Рис. 4. Архітектури нейронних мереж: а – архітектура мережі з використанням дотичної, б – архітектура мережі з використанням інтегралу за пройденим шляхом.

Данні для навчання та тестування це перша та третя петлі гістерезису. Першочергово данні були нормалізовані у проміжок  $[-1; 1]$  мінімізуючи таким чином вплив великих значення на відповідь мережі. Також даний крок пришвидшує навчання.

Навчання проводилось з учителем, навчаюча вибірка була сформована з першої та третьої петлі гістерезису, тестування проводилось на другій петлі

гістерезису. Так як, друга петля невідома для нашої мережі ми можемо якісно оцінити мережу в результаті навчання.

На рис. 5 ми можемо бачити результат опитування навченої мережі (зірочки синього кольору), на вхід якої були поданні данні які використовувалися при її (помаранчевого кольору).

З даного графіку можна зробити декілька висновків: по перше, мережа має недолік у вигляді сторонніх викидів – цю проблему можна спробувати вирішити фільтруванням навчаючої та тестової вибірки. Так як, данні були реальні, то вони мають деяку похибку та не досить гладку структуру, якщо їх профільтрувати або згладити то це вирішить цю проблему, по друге, мережа має досить суттєвий недолік це – вона намагається вирішити задачу кластеризації а не завдання регресійного аналізу.

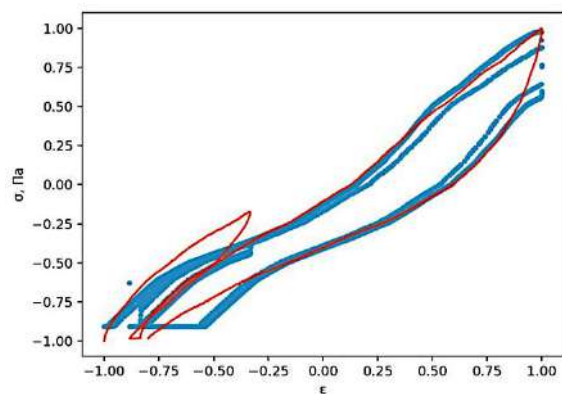


Рис. 5. Результати опитування мережі на навчаючій вибірці

**Висновки.** Виходячи з поставленої задачі було виконано:

- вивчена наявна література;
- підготовленні данні для навчання та тестування нейронної мережі;
- сформовані вхідні та вихідні данні;
- побудована нейронна мережа для апроксимації-інтерполяції петлі гістерезису;
- проведено навчання нейронної мережі;
- проведена якісна оцінка навченої мережі;
- сформовані висновки, позитивні та негативні якості отриманої мережі.

Виходячи з вище представленого графіку результатів опитування мережі можна зробити висновки що мережа прямого розповсюдження дає не погані результати для вирішення задачі апроксимації-інтерполяції петлі гістерезису резинокордного виробу. Але, виходячи з вище перерахованих недоліків потрібно додати фільтрування вхідних даних та змінити конфігурацію мережі для її стабілізації, щоб вона не вирішувала задачу кластеризації а вирішувала задачу регресії, таким чином вона зможе краще описувати петлі гістерезису. Також потрібно додати розрахування кількості виділення тепла – це дасть змогу якісно порівнювати результати експерименту та нейронної мережі.

#### Список літератури

1. Milton E. T., James F. B., James E. R., John W. B. FSCBG: An Aerial Spray Dispersion Model for Predicting the Fate of Released

- Material Behind Aircraft. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1993. Vol. 12, no. 3. P. 453–464.
- Furukawa T., Hoffman M. Accurate cyclic plastic analysis using a neural network material model. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2004. Vol. 28, issue 3. P. 195–204.
  - Elnashai A. S., Ambraseys N. N. Development of Neural Network Based Hysteretic Models for Steel Beam-Column Connections Through Self-Learning Simulation. *Journal of Earthquake Engineering*. 2007. Vol. 11, P. 453–467.
  - Круглов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. Москва: Горячая линия-Телеком, 2002. 382 с.
  - Штучний нейрон. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9\\_%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD) (дата звернення: 20.10.2021).
  - Фогель Л., Оуэнс А., Уолш М. Искусственный интеллект и эволюционное моделирование. Москва: Мир, 1969. 230 с.
  - Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга. Москва: Мир, 1965. 480 с.
  - Что такое искусственные нейронные сети? URL: <https://habrahabr.ru/post/134998> (дата звернення: 20.10.2021).
  - Алгоритм зворотного розповсюдження похибки. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/back-propagation.html> (дата звернення: 10.10.2021)
  - Выбор функции активации и обучение нейронной сети. URL: <http://monographies.ru/ru/book/section?id=2465> (дата звернення: 22.10.2021)
  - Larin O., Petrova Yu., Mateichyk V. Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres. *Systems and means of motor transport. Selected problems. Monographia № 4. Seria: Transport*. Rzeszow: Politechnika Pzeszowska Im. Ignacego Lukaszewicza, 2013. P. 123–128.
  - Larin O., Barkanov E., Petrova I. Experimental observations of orthotropic elastic and viscoelastic characteristics of the elastomeric textile reinforced composites. *Innovative solutions in repair of gas and oil pipelines*. Sofia: Bulgarian Society for destructive testing Publishers, BAS, 2016. P. 192–203.
  - Material Behind Aircraft. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 1993, vol. 12, no. 3, pp. 453–464.
  - Furukawa T., Hoffman M. Accurate cyclic plastic analysis using a neural network material model. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2004, vol. 28, issue 3, pp. 195–204.
  - Elnashai A. S., Ambraseys N. N. Development of Neural Network Based Hysteretic Models for Steel Beam-Column Connections Through Self-Learning Simulation. *Journal of Earthquake Engineering*. 2007, vol. 11, pp. 453–467.
  - Kruglov V. V., Borisov V. V. *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, Gorachiaia Linia-Telecom Publ., 2002. 382 p.
  - Shtuchnij neyron* [Artificial neuron]. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9\\_%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A8%D1%82%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%BD%D0%B5%D0%B9%D1%80%D0%BE%D0%BD) (accessed 20.10.2021)
  - Fogel L., Owens A., Walsh M. *Iskusstvennyj intellekt i evolyucionnoe modelirovaniye* [Artificial intelligence and evolutionary modeling]. Moscow, Mir Publ., 1969. 230 p.
  - Rosenblatt F. *Principy neyrodinamiki. Perceptrony i teoriya mekhanizmov mozga* [Principles of Neurodynamics. Perceptrons and the Theory of Brain Mechanisms]. Moscow, Mir Publ., 1965. 480 p.
  - Chto takoe iskusstvennye neyronnye seti?* [What are artificial neural networks?]. URL: <https://habrahabr.ru/post/134998> (accessed 20.10.2021)
  - Algoritm zvorotnogo rozpovsyudzhennya pohibki* [Error backpropagation algorithm]. URL: <http://www.aiportal.ru/articles/neural-networks/back-propagation.html> (accessed 10.10.2021)
  - Vybor funktsii aktivatsii i obuchenie neyronnoj seti* [Choice of neural network activation and learning function]. URL: <http://monographies.ru/ru/book/section?id=2465> (accessed 22.10.2021)
  - Larin O., Petrova Yu., Mateichyk V. *Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres. Systems and means of motor transport. Selected problems. Monographia № 4. Seria: Transport*. Rzeszow, Politechnika Pzeszowska Im. Ignacego Lukaszewicza Publ., 2013, pp. 123–128.
  - Larin O., Barkanov E., Petrova I. Experimental observations of orthotropic elastic and viscoelastic characteristics of the elastomeric textile reinforced composites. *Innovative solutions in repair of gas and oil pipelines*. Sofia, Bulgarian Society for destructive testing Publishers, BAS Publ., 2016, pp. 192–203.

## References (transliterated)

- Milton E. T., James F. B., James E. R., John W. B. FSCBG: An Aerial Spray Dispersion Model for Predicting the Fate of Released

Надійшла (received) 05.11.2021

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

**Водка Олексій Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри динаміки та міцності машин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-9869>; e-mail: [oleksii.vodka@gmail.com](mailto:oleksii.vodka@gmail.com)

**Погребняк Сергій Віталійович** – аспірант Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри динаміки та міцності машин; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1612-3075>; e-mail: [serhii.pohrebniak@khp.edu.ua](mailto:serhii.pohrebniak@khp.edu.ua)

**Водка Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры динамики и прочности машин, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-9869>; e-mail: [oleksii.vodka@gmail.com](mailto:oleksii.vodka@gmail.com)

**Погребняк Сергей Витальевич** – аспирант Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры динамики и прочности машин, г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1612-3075>; e-mail: [serhii.pohrebniak@khp.edu.ua](mailto:serhii.pohrebniak@khp.edu.ua)

**Vodka Oleksii Oleksandrovich** – Ph. D., National Technical University "KhPI", Docent of Dynamics and Strength of Machines Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4462-9869>; e-mail: [oleksii.vodka@gmail.com](mailto:oleksii.vodka@gmail.com)

**Pohrebniak Serhii Vitalijovich** – graduate student National Technical University "KhPI", graduate student of Dynamics and Strength of Machines Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1612-3075>; e-mail: [serhii.pohrebniak@khp.edu.ua](mailto:serhii.pohrebniak@khp.edu.ua)

*Л. В. БОДНАР, К. С. ШУЛАКОВА, Л. Е. ГРИЗУН*

### **АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВЕБСЕРВІСУ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ІНОЗЕМНИХ МОВ**

Дана робота присвячена аналізу алгоритмічного забезпечення рекомендаційних систем мультимедійного контенту та розробці вебсервісу для підвищення ефективності вивчення іноземних мов за допомогою рекомендаційної системи, яка персоналізовано підбирає навчальний контент для користувача. Для формування переліку необхідного мультимедійного контенту були обрані основні критерії рекомендаційної системи, виявлені основні потреби користувачів, які повинні вирішувати система, оскільки підвищення ефективності вивчення іноземної мови досягається не тільки шляхом вибору методів навчання, але й переглядом мультимедійного контенту, а саме новин, фільмів, навчальних роликів, кліпів та ін. З боку методу реалізації алгоритмічного забезпечення були розглянуті різні види фільтрації даних від сучасних технічних методів до бібліотек для забезпечення функціональності системи та обрано алгоритм на основі гібридної фільтрації, при якому використовуються відомі оцінки користувачів для прогнозування уподобань іншого користувача. Розроблені функціональні вимоги та запропоновано вебсервіс, який уможливило комплексний вплив на навчання користувача при вивченні іноземної мови, програмна реалізація якого виконана за допомогою мов Java Script, Python та додаткових бібліотек. Ця реалізація дозволяє побудувати процес відстеження змін стосовно вимог користувача та передавати інформацію в базу даних (БД) і після аналізу вхідних даних змінювати запропонований мультимедійний контент користувачу. Під час подальших досліджень заплановано проведення практичних експериментів з урахуванням специфіки тих чи інших методів навчання іноземних мов і застосування статистичних даних для оцінки ефективності роботи алгоритму запропонованої рекомендаційної системи.

**Ключові слова:** алгоритм, рекомендаційна система, гібридна фільтрація, БД, вебсервіс, Python, фільтрація за змістом, колаборативна фільтрація.

*Л. В. БОДНАР, Е. С. ШУЛАКОВА, Л. Э. ГРИЗУН*

### **АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ РЕКОМЕНДАЦИИ ВЕБ-СЕРВИСА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИНОСТРАННЫХ ЯЗЫКОВ**

Данная работа посвящена анализу алгоритмического обеспечения рекомендательных систем мультимедийного контента и разработке веб-сервиса для повышения эффективности изучения иностранных языков с помощью рекомендательной системы, которая персонализированно подбирает обучающий контент для пользователя. Для формирования перечня необходимого мультимедийного контента были выбраны основные критерии рекомендательной системы, выявлены основные потребности пользователей, которые должна решать система, поскольку повышение эффективности изучения иностранного языка достигается не только путем выбора методов обучения, но и просмотром мультимедийного контента, а именно новостей, фильмов, обучающих роликов, клипов и т.д. Со стороны метода реализации алгоритмического обеспечения были рассмотрены различные виды фильтрации данных от современных технических методов до библиотек для обеспечения функциональности системы и выбран алгоритм на основе гибридной фильтрации, при котором используются известные оценки пользователей для прогнозирования предпочтений другого пользователя. Разработаны функциональные требования и предложен веб-сервис, позволяющий комплексно воздействовать на обучение пользователя при изучении иностранного языка, программная реализация которого выполнена с помощью языков Java Script, Python и дополнительных библиотек. Эта реализация позволяет построить процесс отслеживания изменений в пользовательских требованиях и передавать информацию в базу данных (БД) и после анализа входных данных изменять предлагаемый мультимедийный контент пользователю. В ходе дальнейших исследований запланировано проведение практических экспериментов с учетом специфики тех или иных методов обучения иностранных языков и применения статистических данных для оценки эффективности работы алгоритма предлагаемой рекомендательной системы.

**Ключевые слова:** алгоритм, рекомендательная система, гибридная фильтрация, БД, веб-сервис, Python, фильтрация по содержанию, колаборативная фильтрация.

*L. V. BODNAR, K. S. SHULAKOVA, L. E. GRYZUN*

### **ALGORITHMIC SUPPORT OF THE WEB SERVICE RECOMMENDATION SYSTEM FOR LEARNING FOREIGN LANGUAGES**

This work is devoted to the analysis of algorithmic support of multimedia content recommender systems and the development of a web service to increase the efficiency of learning foreign languages using a recommender system that personalized the selection of educational content for the user. To form a list of necessary multimedia content, the main criteria of the recommender system were selected, the basic needs of users were identified, which the system should solve, since increasing the efficiency of learning a foreign language is achieved not only by choosing teaching methods, but also by watching multimedia content, namely news, films, educational videos, clips, etc. Therefore, in order to form a list of the necessary multimedia content, the main criteria of the recommender system were formed, the main needs of users were identified, which the system must solve. From the side of the method for implementing algorithmic support, various types of data filtering were considered, from modern technical methods to libraries to ensure the functionality of the system, and the algorithm based on hybrid filtering was chosen, in which known user ratings are used to predict the preferences of another user. Functional requirements have been developed and a web service has been proposed that allows a comprehensive impact on user learning when learning a foreign language, software implementation of which is made using Java Script, Python and additional libraries. This implementation allows you to build a process for tracking changes in user requirements and transfer information to the database (DB) and, after analyzing the input data, change the proposed multimedia content to the user. In the course of further research, it is planned to conduct practical experiments, taking into account the specifics of certain methods of teaching foreign languages and the use of statistical data to assess the effectiveness of the algorithm of the proposed recommender system.

**Keywords:** algorithm, recommender system, hybrid filtering, DB, web service, Python, content-based filtering, collaborative filtering.

**Вступ.** Багато найбільших комерційних вебсайтів вже тривалий час використовують рекомендаційні системи, щоб допомогти своїм користувачам знайти необхідний контент. Спільна фільтрація, яка зазвичай

використовується в сценаріях електронної комерції, виявляє взаємодії між користувачами та елементами і являє собою алгоритм рекомендаційної системи. На основі цієї фільтрації передбачаються уподобання

© Л. В. Боднар, К. С. Шулакова, Л. Е. Гризун, 2021

користувачів, аналізуючи їх поведінку в минулому, згідно з якою рекомендаційна система перенавчає математичну модель та пропонує нові списки контенту [1], допомагаючи тим самим користувачеві знайти необхідну інформацію.

**Постановка проблеми.** Сьогодні налічують близько 6000 іноземних мов [2]. За статистикою, у світі 1,5 млрд людей вивчають англійську мову [3], але далеко не у всіх є можливість займатися з викладачем офлайн, тому вони використовують різноманітні вебсервіси. Крім того, існують дослідження [4], які показують, що використання вебсервісів дозволяє підвищити ефективність вивчення іноземної мови.

Оскільки кількість різних інструментів досить велика, і скласти свій стек освітніх технологій може бути нелегко, тому мета даної роботи - розробка вебсервісу з алгоритмічним забезпеченням рекомендаційної системи, яка формує списки необхідного навчального контенту індивідуально під потреби кожного користувача.

Для досягнення мети необхідно було розв'язати наступні завдання:

- розробити принцип роботи вебсервісу;
- визначити рівні доступу користувачів вебсервісу;
- обрати алгоритмічне забезпечення рекомендаційної системи вебсервісу;
- обрати моделі даних для реалізації бази даних;
- виконати проектування та розробку бази даних;
- розробити сервіс регулювання навантаження;
- інтегрувати кешування даних і результатів запитів;
- розробити вебсервіс та налаштувати серверну частину.

Змістова постановка задачі представлена у вигляді IDEF0-діаграми (рис. 1).

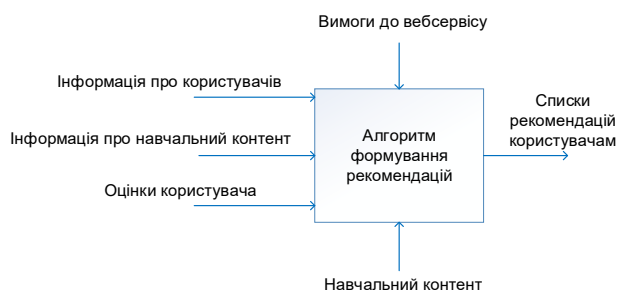


Рис. 1. IDEF0-діаграма

**Аналіз стану проблеми.** Досить часто плани створення рекомендаційної системи та БД готуються і оцінюються на основі думок замовників і розробників про необхідні функції та можливі якості програмного забезпечення. У зв'язку з цим, помилки при визначенні необхідних показників прогнозування, оцінки трудомісткості, вартості та тривалості створення рекомендаційної системи є поширеним явищем.

Часто рекомендаційні системи не відповідають вимогам до швидкого та точного підбору контенту,

оскільки реалізація цього типу алгоритмів дуже складна, її важко підтримувати, так як навіть незначні коригування в роботі призводять до змін алгоритму. Тому при розробці вебсервісу перш за все необхідно продумати логіку роботи, визначити чітке алгоритмічне забезпечення рекомендаційної системи мультимедійного контенту та обрати моделі даних для реалізації бази даних, що підходить саме цьому вебсервісу.

**Аналіз існуючих алгоритмів.** Зазвичай математичні алгоритми рекомендаційних систем сформовані за чотирма критеріями [5]:

- кількість рекомендованого контенту;
- кількість інформації про рекомендований контент для уточнення потреб користувача;
- додаткова інформація про користувача для конкретизації підбору рекомендацій;
- ергономічність сервісу для зручності відвідувача (чим комфортніше, тим більше інформації можна отримати про його реакції на поради рекомендаційної системи).

На сьогоднішній день найбільш поширені три алгоритми рекомендаційних систем:

- на основі спільної (колаборативної) фільтрації [6], де прогнози складаються індивідуально для кожного користувача, хоча використовується інформація зібрана від багатьох учасників внаслідок чого алгоритм погано масштабується;
- на основі фільтрації змісту (content-based) [7], в якому ключові слова використовуються для опису елементів, а профіль користувача створюється для визначення типу елемента, який йому подобається;
- на основі фільтрації знань [8], які засновані на явних знаннях, користувацьких перевагах і критеріях рекомендацій.

Аналізуючи роботу алгоритмів, колаборативна фільтрація надає рекомендації тільки досвідченим користувачам, які вже взаємодіяли з системою, так як вона рекомендує на основі їх уподобань, що робить неможливим генерувати рекомендації для нових користувачів. Алгоритм фільтрації за змістом надає рекомендації новим та досвідченим користувачам на основі ключових слів, які користувач визначив для опису елементів. Оскільки цей підхід залежить від якості опису метаданих елементів та користувачів, це приносить багато обмежень системі. Алгоритм фільтрації знань потребує додаткового джерела інформації, а також явних знань про персональні вимоги користувачів, але вирішує проблеми холодного старту.

**Аналіз існуючих рекомендаційних систем.** На сьогоднішній день існують дуже багато онлайн ресурсів з вивчення іноземних мов від вебсайтів до вебдодатків на мобільні дивайси, але відсутні рекомендаційні системи, які можуть допомогти підібрати контент не тільки для вивчення іноземної мови під персональні потреби, але при навчанні в цілому, що робить неможливим зробити аналіз існуючих рекомендаційних систем навчального контенту. Проте існують подібні розважальні вебсервіси з рекомендаційними системами мультимедійного контенту, які

використовуються в основному у вигляді відеохостингу: YouTube [9], Netflix [10], MEGOGO [11], Ivi [12] та інші.

Для спрощення збору інформації щодо відгуків та запитів Netflix використовує колаборативну фільтрацію, проте велика кількість даних приводить до зміщення результатів рекомендаційної системи і зниження її ефективності. Рекомендаційні системи MEGOGO та Ivi, що працюють на основі неявних призначених для користувача оцінок, тягнуть за собою проблему дотримання конфіденційності користувачів, захисту персональних даних. Крім цього, слід виділити проблему холодного старту по відношенню до користувача (коли невідомо що рекомендувати щойно зареєстрованій людині) та по відношенню до контенту (у випадку невизначеності щодо того, кому можна порекомендувати щойно створений контент) [13]. Система рекомендацій YouTube використовує кілька цільових функцій для ранжування і враховує особисті переваги користувача за рахунок алгоритму SVD [14], який базується на колаборативній фільтрації та фільтрації за змістом, тому алгоритм має менше недоліків, ніж вище вказані алгоритми окремо. Саме такий гібридний алгоритм буде застосовано для вирішення завдань рекомендаційної системи навчального контенту, який обрано при розробці даного вебсервісу. Основною проблемою залишається холодний старт по відношенню до контенту, оскільки не можна навчити нейронну мережу коректно передбачати оцінки, не маючи тестової вибірки, але інші завдання даного алгоритму вирішує.

**Алгоритмічне забезпечення рекомендаційної системи вебсервісу.** Гібридний алгоритм складається з випадкового і  $kNN$  алгоритмів. Випадковий алгоритм використовується для вирішення проблеми холодного старту по відношенню до користувача і збереження різноманітності рекомендаційної системи.  $kNN$  алгоритм знаходить  $k$  аналогічних користувачів за певною кількістю переглянутих елементів. Нехай перегляд елементів ( $TR$ ) буде порогом рекомендацій  $kNN$ , який визначає чи використовувати алгоритм  $kNN$ , тоді кількість переглянутих користувачем  $u_i$  елементів становить  $|br(u_i)|$  та є перемикачем  $kNN$ , який задається

$$kNN\ switch = \begin{cases} true, & \text{if } |br(u_i)| \geq TR, \\ false, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

На стабільній стадії кількість переглянутих елементів  $TR$  достатня для виконання алгоритму  $kNN$ , щоб рекомендувати необхідну кількість елементів. Пункти списку навчального контенту формуються в основному на базі алгоритму  $kNN$ , але для різноманітності рекомендацій використовується випадковий алгоритм, щоб рекомендувати певну частину елементів.

Інкrementний гібридний алгоритм представлений алгоритмом 1 (рис. 2). Вхідні дані включають ідентифікатор користувача ( $u_{id}$ ) і три заданих користувачем параметра. Це загальна рекомендована кількість ( $N$ ), співвідношення випадкових рекомендацій ( $RT$ ) і  $TR$ . Фактично, він складається з чотирьох кроків.

**Input:**  $u_{id}, N, RT, TR$

**Output:** *recommender items*( $T_r$ )

**Method:** *hybridAlgorithm*

- (1)  $T_b$  = the browsed items by  $u_{id}$ ;
- (2)  $bm$  = the browser matrix of all users;
- (3) **if** ( $bm = \emptyset$  or  $T_b = \emptyset$ ) **then**
- (4)  $T_r$  = recommended  $N$  items by random algorithm;
- (5) **return**  $T_r$ ;
- (6) **end if**
- (7)  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ;
- (8)  $Count = 0$ ;
- (9) **for each** ( $u_i$  in  $U$ ) **do**
- (10)  $N_b$  = the number of browsed items by  $u_i$ ;
- (11) **if** ( $N_b \geq TR$ ) **then**
- (12)  $Count = Count + 1$ ;
- (13) **end if**
- (14) **end for**
- (15) **if** ( $Count \leq 0$ ) **then**
- (16)  $T_r$  = recommended  $N$  items by random algorithm;
- (17) **return**  $T_r$ ;
- (18) **end if**
- (19)  $N_k = N * (1 - RT)$ ;
- (20)  $T_k$  = recommended  $N_k$  items by  $kNN$  algorithm;
- (21)  $N_{rd} = N - |T_k|$ ;
- (22)  $T_{rd}$  = recommended  $N_{rd}$  items by random algorithm;
- (23)  $T_r = T_k \cup T_{rd}$ ;
- (24) **return**  $T_r$ ;

Рис. 2. Алгоритм 1

Крок 1. На етапі ініціалізації немає ніяких даних історії матриці перегляду. Застосовується випадковий алгоритм для вирішення проблеми холодного старту. Цей крок відповідає рядкам 3-6 алгоритму.

Крок 2. Використовується, щоб визначити необхідність застосування алгоритму  $kNN$ . Спочатку підраховується кількість переглянутих елементів по  $u$ . Якщо  $N_b > TR$ , використовується алгоритм  $kNN$ . Цей крок відповідає рядкам 8-14 алгоритму.

Крок 3. Коли рекомендації працюють без помилок, використовується випадковий алгоритм, щоб рекомендувати деякі нові елементи для вивчення нових матеріалів. Цей крок відповідає рядкам 15-18 алгоритму.

Крок 4. Алгоритм  $kNN$  використовується, щоб рекомендувати деякі пункти списку. Інші пункти списку рекомендуються на основі випадкового алгоритму на перехідній і стабільній стадіях. Цей крок відповідає рядкам 17-23 алгоритму.

Вихідні дані алгоритму зберігаються в пам'яті для алгоритму 2, за результатами роботи якого, користувачу надається інтерактивна рекомендація (рис. 3).

**Input:**  $N, RT, TR$   
**Output:** Recall and diversity  
**Method:** interactiveRecommender

- (1)  $R_f = true$  //  $R_f$  is the flag of successfully recommender;
- (2)  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ ;
- (3)  $U'$  = an randomized array of  $U$ ;
- (4)  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ ;
- (5) **while** ( $R_f$ ) **do**
- (6)  $R_f = false$ ;
- (7) **for each** ( $u_{id}$  in  $U'$ ) **do**
- (8)  $T_r = hybridAlgorithm(u_{id}, N, RT, TR)$ ;
- (9)  $T_i$  = the interstarray of  $u_{id}$ ;
- (10) **if** ( $T_i \cap T_r = \emptyset$ ) **then**
- (11) the user quits to the RS;
- (12) **else**
- (13) the browsed item is recorded into  $bm(u_{id})$ ;
- (14)  $R_f = true$ ;
- (15) **end if**
- (16) **end for**
- (17) **end while**
- (18)  $recall = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m bm_{i,k}}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^m um_{i,k}}$ ;
- (19)  $BR(u, T) \subseteq T$ ;
- (20)  $diversity = \frac{|\cup_{u \in U} BR(u, T)|}{|T|}$ ;
- (21) **return** recall and diversity;

Рис. 3. Алгоритм 2

**Програмне забезпечення рекомендаційної системи вебсервісу.** Для коректної роботи вебсервісу

було виділено три рівні доступу до вебвервісу:

- гість – незареєстрований та неавторизований користувач системи, який не має доступу до функцій вебсервісу крім перегляду;
- користувач - зареєстрований та авторизований користувач системи, який має доступ до функцій вебсервісу, які відповідають за відображення рекомендаційного медіа-контенту;
- адміністратор – авторизований користувач системи, який має доступ до всіх функцій вебсервісу, налаштування системи та перегляду статистичних даних.

Після визначення рівнів доступу та задач, які виконує кожен користувач (табл. 1) була побудована БД, яка була розмежована згідно прав доступу, що надається користувачам системи в рамках вирішуваних ними задач (рис. 4). Виходячи з цього, розроблена система для формування рекомендацій була реалізована з сервісом регулювання навантаження на систему, кешуванням даних і запитів.

Для розробки вебсервісу використовувалася багатопарова архітектура [15], а саме 4-рівнева архітектура, яка надала сервісу гнучкість, можливість внесення змін в певний шар, замість того, щоб переробляти весь додаток цілком.

В якості програмної реалізації вебсервісу були застосовані такі технології, як:

- Python – об'єктно-орієнтована мова програмування високого рівня зі строгою динамічною типізацією [16];

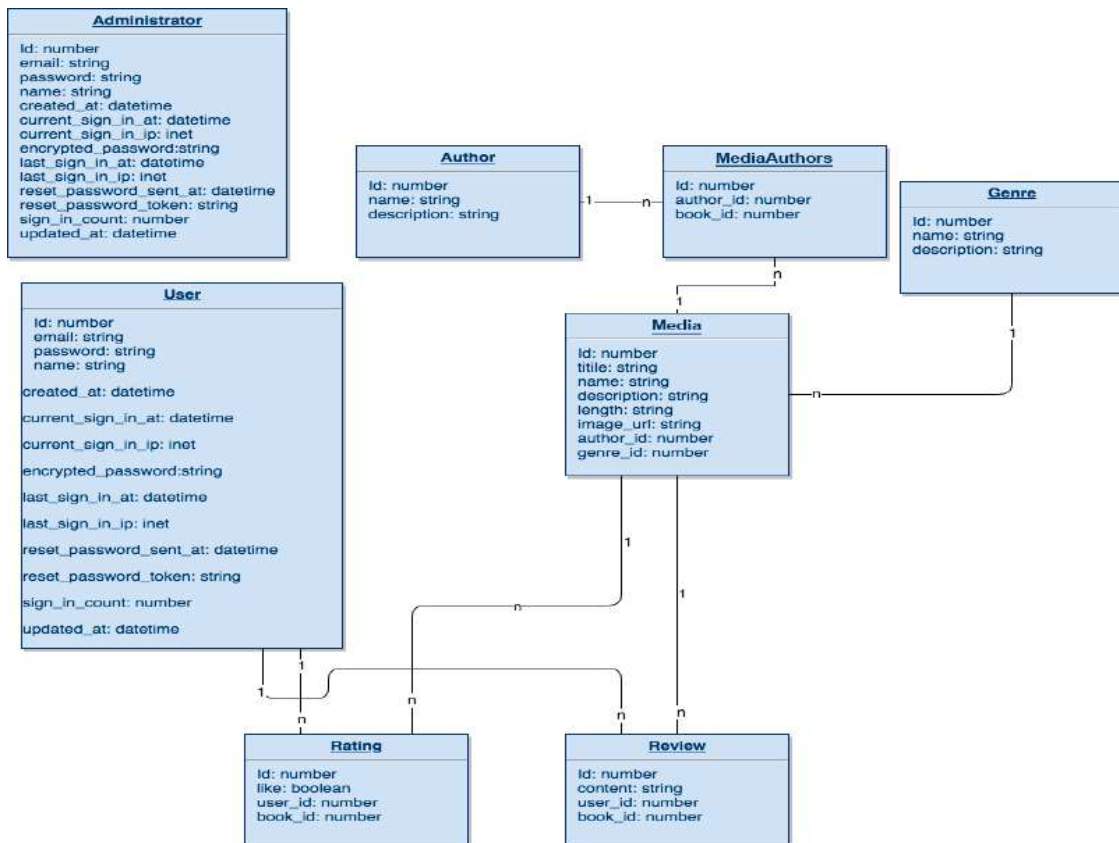


Рис. 4. Схема БД

Таблиця 1 – Перелік задач користувачів

Рівні доступу	Перелік задач	Вхідна інформація	Вихідна інформація
Гість	1) додавати, видаляти, змінювати дані у БД; 2) пошук інформації за будь-яким з можливих критеріїв; 3) змінювати БД відповідно до нових вимог предметної області	Інформація, що зазначена в документах та опис нових об'єктів предметної області	Підтвердження успішності запиту в разі додавання, видалення або зміни інформації в БД чи зміни самої БД; у разі пошуку інформації надається матеріал або повідомлення про його відсутність
Користувач	1) реєстрація та авторизація; 2) пошук та перегляд мультимедійного контенту; 3) перегляд інформації щодо акаунту	Логін та пароль, назва матеріалу	Підтвердження успішного запиту щодо реєстрації/авторизації користувача; надається матеріал, що потрібно знайти, або повідомлення про відсутність інформації; інформація акаунту
Адміністратор	1) перегляд статистики користувачів; 2) налаштування системи	Проміжок часу, критерії вибору користувачів, критерії вибору мультимедійного контенту	Відображення статистики з урахуванням пошукових критеріїв; підтвердження запиту щодо змін в системі

- JavaScript – динамічна, об'єктно-орієнтована прототипна мова програмування для створення сценаріїв вебсторінок для взаємодії з користувачем та обміну даними з сервером [17];

- NodeJS – платформа для виконання на серверній частині мережових Java script – скриптів за допомогою програмного рушія Java Script Google V8 [18];

- Fastify – швидкий, асинхронний вебфреймворк для Node.js [19];

- MongoDB – документо-орієнтована система керування базами даних, яка підтримує зберігання документів в JSON-подібному форматі, має досить гнучку мову для формування запитів [20];

- Mongoose – засіб моделювання об'єктів бази даних MongoDB, призначений для асинхронної роботи [21];

- Redis – розподілене сховище пар ключ-значення, які зберігаються в оперативній пам'яті з підтримкою структурованих даних, таких як: списки, хеші і множини [22].

**Висновки.** В роботі представлено розроблений вебсервіс з алгоритмічним забезпеченням рекомендаційної системи, що відповідає за надання навчального контенту при вивченні іноземної мови. На разі планується впровадження в декілька етапів: на першому етапі, серед студентів першокурсників Державного університету інтелектуальних технологій і зв'язку; на другому, серед студентів з поглибленим вивченням англійської мови; на третьому, серед всіх студентів університету. Після впровадження робота алгоритму може бути покращена на кожному з етапів, шляхом перенавчання під більш персоналізовані рекомендації за рахунок більшої кількості критеріїв формування пунктів списку.

Підсумовуючи роботу, слід зазначити, що рекомендаційні системи мультимедійного контенту мають значні перспективи застосування в індивідуальному онлайн навчанні, адже кожен користувач має

індивідуальні потреби, що спонукає його обирати вебсервіси, які зберігатимуть його час та надаватимуть необхідні мультимедійні матеріали.

#### Список літератури

1. Falk K. Recommender systems in practice. *Manning Publications*, 2017. 49 p. URL: <https://dmpress.com/files/PDF/978-5-97060-774-9-1.pdf> (дата звернення: 13.01.2020).
2. *Статистичні дані ЮНЕСКО*. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3194622-u-sviti-vidznacaut-den-ridnoi-movi.html> (дата звернення: 30.03.2018).
3. Uzunboylu H. The Effectiveness of Web Assisted English Language Instruction on the Achievement and Attitude of Students. *ERIC Abstract*, 2005.
4. Tanyeli N. The Efficiency of Online English Language Instruction on Students' Reading Skills. *International Technology, Education and Development Conference (INTEd)*, Valencia, Spain, Mar 3–5, 2008. URL: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED504676.pdf> (дата звернення: 06.05.2021).
5. Adomavicius G., Tuzhilin A. Toward the next generation of recommender systems: A survey of the state-of-the-art and possible extensions. *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, 2005, 17 (6), pp.734–749.
6. Candillier L., Jack K., Fessant F., Meyer F. State-of-the-art recommender systems. *Collaborative and Social Information Retrieval and Access Techniques for Improved User Modeling*, 2009.
7. Pazzani M. J., Billsus D. Content-based recommendation systems. *The adaptive web*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 325–341.
8. Ricci F., Rokach L., Shapira B. Introduction to recommender systems handbook. *Recommender systems handbook*. Springer US, 2011, pp. 1–35.
9. *Система рекомендацій YouTube*. URL: <https://neurohive.io/ru/novosti/iz-chego-sostoit-rekomendatelnaya-sistema-youtube> (дата звернення: 24.04.2019).
10. *Система рекомендацій Netflix*. URL: <https://uxplanet.org/netflix-binging-on-the-algorithm-a3a74a6c1f59> (дата звернення: 30.04.2020).
11. *Система рекомендацій Megogo*. URL: <https://www.contentarmor.net/megogo-selects-contentarmor-to-protect-its-pvod-service/> (дата звернення: 12.04.2021).
12. *Система рекомендацій Ivi*. URL: [https://discourse.world/h/2019/12/10/As-we-recommend-the-latest-catalogs-in-the-ivi-online-cinema\(Python-code\)](https://discourse.world/h/2019/12/10/As-we-recommend-the-latest-catalogs-in-the-ivi-online-cinema(Python-code)) (дата звернення: 10.12.2019).
13. Thai-Nghe N., Drumond L., Krohn-Grimberghe A., Schmidt-Thieme L. Recommender system for predicting student performance. *Procedia Computer Science*, 2010, 1 (2), pp. 2811–2819.



14. Moonen M., De Moor B. *SVD and Signal Processing, III: Algorithms, Architectures and Applications*. Elsevier Science, 2011. 504 p.
15. Bass L., Clements P., Kazman R. *Software Architecture in Practice*. 2-nd edition, Addison-Wesley, 2003.
16. Jones E., Oliphant Tr., Peterson P. et al. *SciPy: Open source scientific tools for Python, 2001*. URL: <http://www.scipy.org/> (дата звернення: 06.12.2015).
17. Zheng Y., Mobasher B. CARSKit: A Java-Based Context-aware Recommendation Engine. *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Data Mining*. NJ, USA, 2015.
18. *NodeJS*. URL: <https://metanit.com/web/nodejs/1.1.php> (дата звернення: 02.10.2019).
19. *Fastify framework*. URL: <https://www.fastify.io> (дата звернення: 06.11.2020).
20. *MongoDB documentation*. URL: <https://docs.mongodb.com/manual> (дата звернення: 26.08.2021).
21. *Mongoose Docs*. URL: <https://docs.npmjs.com/> (дата звернення: 09.09.2021) (дата звернення: 06.12.2019).
22. *Redis documentation*. URL: <https://redis.io/documentation> (дата звернення: 17.11.2020).
7. Pazzani M. J., Billsus D. Content-based recommendation systems. *The adaptive web*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, pp. 325-341.
8. Ricci F., Rokach L., Shapira B. Introduction to recommender systems handbook. *Recommender systems handbook*. Springer US, 2011, pp. 1–35.
9. *YouTube documentation*. Available at: <https://neurohive.io/ru/novosti/iz-chego-sostoit-rekomendatelnaya-sistema-youtube> (accessed 24.04.2019).
10. *Netflix documentation*. Available at: <https://uxplanet.org/netflix-binging-on-the-algorithm-a3a74a6c1f59> (accessed 30.04.2020).
11. *Megogo documentation*. Available at: <https://www.contentarmor.net/megogo-selects-contentarmor-to-protect-its-pvod-service/> (accessed 12.04.2021).
12. *Ivi documentation*. Available at: [https://discourse.world/h/2019/12/10/As-we-recommend-the-latest-catalogs-in-the-ivi-online-cinema\(Pyhton-code\)](https://discourse.world/h/2019/12/10/As-we-recommend-the-latest-catalogs-in-the-ivi-online-cinema(Pyhton-code)) (accessed 10.12.2019).
13. Thai-Nghe N., Drumond L., Krohn-Grimberghe A., Schmidt-Thieme L. Recommender system for predicting student performance. *Procedia Computer Science*. 2010, 1 (2), pp.2811–2819.

#### References (transliterated)

1. Falk K. Recommender systems in practice. *Manning Publications*, 2017. 49 p. URI: <https://dmkpress.com/files/PDF/978-5-97060-774-9-1.pdf> (accessed 13.01.2020).
2. *UNESCO statistics*. Available at: <https://www.ukrinform.ua/rubric-world/3194622-u-sviti-vidznacaut-den-ridnoi-movi.html> (accessed 30.03.2018).
3. Uzunboylu H. The Effectiveness of Web Assisted English Language Instruction on the Achievement and Attitude of Students. *ERIC Abstract*, 2005.
4. Tanyeli N. The Efficiency of Online English Language Instruction on Students' Reading Skills. *International Technology, Education and Development Conference (INTED), Valencia, Spain, Mar 3-5, 2008*. Available at: <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED504676.pdf> (accessed 06.05.2021).
5. Adomavicius G., Tuzhilin A. Toward the next generation of recommender systems: A survey of the state-of-the-art and possible extensions. *IEEE transactions on knowledge and data engineering*, 2005, 17 (6), pp.734–749.
6. Candillier L., Jack K., Fessant, F., Meyer F. State-of-the-art recommender systems. *Collaborative and Social Information Retrieval and Access Techniques for Improved User Modeling*, 2009.
13. Moonen M., De Moor B. *SVD and Signal Processing, III: Algorithms, Architectures and Applications*. Elsevier Science, 2011. 504 p.
14. Bass L., Clements P., Kazman R. *Software Architecture in Practice*. 2-nd edition, Addison-Wesley, 2003.
15. Jones E., Oliphant Tr., Peterson P. et al. *SciPy: Open source scientific tools for Python, 2001*. Available at: <http://www.scipy.org/> (accessed 06.12.2015).
16. Zheng Y., Mobasher B. CARSKit: A Java-Based Context-aware Recommendation Engine. *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Data Mining*. NJ, USA, 2015.
17. *NodeJS*. Available at: <https://metanit.com/web/nodejs/1.1.php> (accessed 02/10/2019).
18. *Fastify framework*. Available at: <https://www.fastify.io> (accessed 06.11.2020).
19. *MongoDB documentation*. Available at: <https://docs.mongodb.com/manual> (accessed 26.08.2021).
20. *Mongoose Docs*. Available at: <https://docs.npmjs.com/> (accessed 09.09.2021) (accessed 06.12.2019).
21. *Redis documentation*. Available at: <https://redis.io/documentation> (accessed 17.11.2020).

Надійшла (received) 01.11.2021

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

**Боднар Лілія Василівна** – кандидат педагогічних наук, доцент, Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, доцент кафедри інноваційних технологій та методики навчання природничих дисциплін; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0893-496X>; e-mail: [bodnarl79@gmail.com](mailto:bodnarl79@gmail.com)

**Шулакова Катерина Сергіївна** – Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0035-6184>; e-mail: [katejojo29@gmail.com](mailto:katejojo29@gmail.com)

**Гризун Людмила Едуардівна** – доктор педагогічних наук, професор, Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, професор кафедри інформаційних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-5624>; e-mail: [lgr2007@ukr.net](mailto:lgr2007@ukr.net)

**Боднар Лилия Васильевна** – кандидат педагогических наук, доцент, Южноукраинский национальный педагогический университет имени К. Д. Ушинского, доцент кафедры инновационных технологий и методики обучения естественных дисциплин; г. Одесса, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0893-496X>; e-mail: [bodnarl79@gmail.com](mailto:bodnarl79@gmail.com)

**Шулакова Екатерина Сергеевна** – Государственный университет интеллектуальных технологий и связи, старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии и информационных систем; г. Одесса, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0035-6184>; e-mail: [katejojo29@gmail.com](mailto:katejojo29@gmail.com)

**Гризун Людмила Эдуардовна** – доктор педагогических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця, профессор кафедры информационных систем; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-5624>; e-mail: [lgr2007@ukr.net](mailto:lgr2007@ukr.net)

**Bodnar Liliia Vasylivna** – candidate of pedagogical sciences, docent, South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushynsky, associate professor of the department of Innovative Technologies and Methods of Teaching Natural Sciences; Odessa, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0893-496X>; e-mail: bodnarl79@gmail.com

**Shulakova Kateryna Serhiivna** – State University of Intellectual Technologies and Telecommunications, senior lecturer of the department of Computer Engineering and Information Systems; Odessa, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0035-6184>; e-mail: katejojo29@gmail.com

**Gryzun Liudmyla Eduardivna** – doctor of pedagogical sciences, professor, S. Kuznets Kharkiv National University of Economics; Kharkiv professor of the department of Information Systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5274-5624>; e-mail: lgr2007@ukr.net

### ЗМІСТ

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.....	3
<b>Pavlov A. A.</b> 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.....	3
<b>Shepeliev O. V., Bilova M. O.</b> Software testing results analysis for the requirements conformity using neural networks.....	8
УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	15
<b>Бабуджан Р. А., Ісаснков К. О., Красій Д. М., Водка О. О., Задорожний І. В., Ющук М. В.</b> Використання методів машинного навчання для бінарної класифікації робочого стану підшипників за сигналами їх віброприскорення.....	15
УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	23
<b>Orekhov S. V., Malyhon H. V.</b> Metrics of virtual promotion of a product.....	23
МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	27
<b>Мазманишвили А. С., Решетняк Н. Г., Сидоренко А. Ю.</b> Динамика электронного пучка формируемого магнетронной пушкой с вторичноэмиссионным катодом, в спадающем магнитном поле соленоида: эксперимент и моделирование.....	27
<b>Litvinov B. R., Bilova M. O.</b> Human body modeling technologies for e-commerce systems.....	35
<b>Чалий С. Ф., Лециньський В. О., Лециньська І. О.</b> Контрфактуальна темпоральна модель причинно-наслідкових зв'язків для побудови пояснень в інтелектуальних системах.....	41
<b>Нікуліна О. М., Северин В. П., Надуєва М. О., Бубнов А. І.</b> Моделювання розвитку епідемії на основі інформаційної технології оптимізації.....	47
<b>Гамаюн І. П., Шапков С. В.</b> Математична модель адаптивного управління функціонуванням світлофора на перехресті міської транспортної мережі.....	53
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	59
<b>Sokol V. Y., Krykun V. O., Bilova M. O., Perepelytsya I. D., Pustovarov V. V.</b> Topic segmentation methods comparison on computer science texts.....	59
<b>Kopp A. M., Orlovskiy D. L., Ersoyleyev D.</b> An approach to analysis of ArchiMate application architecture models using the software coupling metric.....	67
<b>Kozulia M. M., Sushko V. V.</b> Determine recommendation systems to search for books by preferences of web users.....	73
<b>Marchenko N. A., Sydorenko G. Yu., Rudenko R. O.</b> Using of multilayer neural networks for the solving systems of differential equations.....	81
<b>Godlevskiy I. M., Godlevskiy M. D., Stativka I. V.</b> Information technology of forming option for logistics distribution channel configuration resistant to emergencies.....	89
<b>Погребняк С. В., Водка О. О.</b> Застосування методів штучного інтелекту для апроксимації механічної поведінки гумоподібних матеріалів.....	95
<b>Боднар Л. В., Шулакова К. С., Гризун Л. Е.</b> Алгоритмічне забезпечення рекомендаційної системи вебсервісу для вивчення іноземних мов.....	100

## CONTENT

SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY .....	3
<i>Pavlov A. A.</i> 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 .....	3
<i>Shepeliev O. V., Bilova M. O.</i> Software testing results analysis for the requirements conformity using neural networks .....	8
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	15
<i>Babudzhan R. A., Isaienkov K. O., Krasii D. M., O. Vodka O., Zadorozhniy I. V., Yushchuk M. V.</i> The use of machine learning methods for binary classification of the working condition of bearings using the signals of vibration acceleration .....	15
MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS.....	23
<i>Orekhov S. V., Malyhon H. V.</i> Metrics of virtual promotion of a product.....	23
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING .....	27
<i>Mazmanishvili O. S., Reshetnyak M. G., Sydorenko G. Yu.</i> Dynamics of an electron beam formed by magnetron gun with the secondary emission cathode in the declining magnetic field of solenoid: experiment and simulation .....	27
<i>Litvinov B. R., Bilova M. O.</i> Human body modeling technologies for e-commerce systems.....	35
<i>Chalyi S., Leshchynskiy V., Leshchynska I.</i> Counterfactual temporal model of causal relationships for constructing explanations in intelligent systems .....	41
<i>Nikulina O. M., Severyn V. P., Naduieva M. O., Bubnov A. I.</i> Modeling the development of epidemics based on information technologies of optimization.....	47
<i>Gamayun I. P., Shashkov S. V.</i> Mathematical model of adaptive control of the functioning of a traffic light at the crossroads of a urban transportation network .....	53
INFORMATION TECHNOLOGY .....	59
<i>Sokol V. Y., Krykun V. O., Bilova M. O., Perepelytsya I. D., Pustovarov V. V.</i> Topic segmentation methods comparison on computer science texts .....	59
<i>Kopp A. M., Orlovskiy D. L., Ersoyleyev D.</i> An approach to analysis of ArchiMate application architecture models using the software coupling metric.....	67
<i>Kozulia M. M., Sushko V. V.</i> Determine recommendation systems to search for books by preferences of web users .....	73
<i>Marchenko N. A., Sydorenko G. Yu., Rudenko R. O.</i> Using of multilayer neural networks for the solving systems of differential equations.....	81
<i>Godlevskiy I. M., Godlevskiy M. D., Stativka I. V.</i> Information technology of forming option for logistics distribution channel configuration resistant to emergencies.....	89
<i>Pohrebniak S. V., Vodka O. O.</i> The use of artificial intelligence methods for approximation of the mechanical behavior of rubber-like materials .....	95
<i>Bodnar L. V., Shulakova K. S., Gryzun L. E.</i> Algorithmic support of the web service recommendation system for learning foreign languages .....	100

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».  
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ**

*Збірник наукових праць*

*№ 2 (6) 2021*

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 20.12.2021 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,5. Облік.-вид. арк. 10.  
Тираж 100 пр. Зам. № 324. 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