

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ КОМПЛЕКС  
«ІНСТИТУТ ПРИКЛАДНОГО СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ»  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

## СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 2

2018

ЗАСНОВАНО У ЛИПНІ 2001 р.

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

#### Головний редактор

**М.З. ЗГУРОВСЬКИЙ**, акад. НАН України

#### Заступник головного редактора

**Н.Д. ПАНКРАТОВА**, чл.-кор. НАН України

#### Члени редколегії:

**П.І. АНДОН**, акад. НАН України

**А.В. АНІСІМОВ**, чл.-кор. НАН України

**Г.-В. ВЕБЕР**, проф., Турція

**О.Д. ГВІШАНИ**, акад. РАН, Росія

**П.О. КАСЬЯНОВ**, проф., д.ф.-м.н.,  
Україна

**В.М. КУНЦЕВИЧ**, акад. НАН України

**О.А. ПАВЛОВ**, проф., д.т.н., Україна

**Л. САКАЛАУСКАС**, проф., Литва

**А.М. САЛЕМ**, проф., Єгипет

**І.В. СЕРГІЄНКО**, акад. НАН України

**Х.-М. ТЕОДОРЕСКУ**, проф., Румунія

**Е.О. ФАЙНБЕРГ**, проф., США

**Я.С. ЯЦКІВ**, акад. НАН України

### АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

03056, м. Київ,

просп. Перемоги, 37, корп. 35,

ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського

Тел.: 204-81-44; факс: 204-81-44

E-mail: journal.iasa@gmail.com

http://journal.iasa.kpi.ua

### У номері:

• **Прогресивні інформаційні технології, високопродуктивні комп'ютерні системи**

• **Проблемно і функціонально орієнтовані комп'ютерні системи та мережі**

• **Методи оптимізації, оптимальне управління і теорія ігор**

• **Математичні методи, моделі, проблеми і технології дослідження складних систем**

• **Методи аналізу та управління системами в умовах ризику і невизначеності**

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE  
EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC COMPLEX  
«INSTITUTE FOR APPLIED SYSTEM ANALYSIS»  
OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE  
«IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE»

## SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

№ 2

2018

IT IS FOUNDED IN JULY 2001

### EDITORIAL BOARD:

#### The editor – in – chief

**M.Z. ZGUROVSKY,** Academician of  
NASU

#### Deputy editor – in – chief

**N.D. PANKRATOVA,** Correspondent  
member of NASU

#### Associate editors:

**F.I. ANDON,** Academician of  
NASU

**A.V. ANISIMOV,** Correspondent  
member of NASU

**E.A. FEINBERG,** Prof., USA

**A.D. GVISHIANI,** Academician of RAS,

**P.O. KASYANOV,** Prof., Ukraine

**V.M. KUNTHEVICH,** Academician of NASU

**A.A. PAVLOV,** Prof., Ukraine

**L. SAKALAUŠKAS,** Prof., Lithuania

**A.M. SALEM,** Prof., Egypt

**I.V. SERGIENKO,** Academician of NASU

**H.-N. TEODORESKU,** Prof., Romania

**G.-W. WEBER,** Prof., Turkey

**Ya.S. YATSKIV,** Academician of NASU

#### THE EDITION ADDRESS:

03056, Kyiv,  
av. Peremogy, 37, building 35,  
Institute for Applied System Analysis  
at the Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute  
Phone: **204-81-44**; Fax: **204-81-44**  
E-mail: [journal.iasa@gmail.com](mailto:journal.iasa@gmail.com)  
<http://journal.iasa.kpi.ua>

### In the issue:

• **Progressive information technologies, high-efficiency computer systems**

• **Problem- and function-oriented computer systems and networks**

• **Methods of optimization, optimum control and theory of games**

• **Mathematical methods, models, problems and technologies for complex systems research**

• **Methods of system analysis and control in conditions of risk and uncertainty**

## Шановні читачі!

Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» видає міжнародний науково-технічний журнал

### «СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ».

Журнал публікує роботи теоретичного та прикладного характеру в широкому спектрі проблем, пов'язаних із системними дослідженнями та інформаційними технологіями.

#### Провідні тематичні розділи журналу:

Теоретичні та прикладні проблеми і методи системного аналізу; теоретичні та прикладні проблеми інформатики; автоматизовані системи управління; прогресивні інформаційні технології, високопродуктивні комп'ютерні системи; проблеми прийняття рішень і управління в економічних, технічних, екологічних і соціальних системах; теоретичні та прикладні проблеми інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень; проблемно і функціонально орієнтовані комп'ютерні системи та мережі; методи оптимізації, оптимальне управління і теорія ігор; математичні методи, моделі, проблеми і технології дослідження складних систем; методи аналізу та управління системами в умовах ризику і невизначеності; евристичні методи та алгоритми в системному аналізі та управлінні; нові методи в системному аналізі, інформатиці та теорії прийняття рішень; науково-методичні проблеми в освіті.

**Головний редактор журналу** — ректор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», академік НАН України Михайло Захарович Згуровський.

Журнал «Системні дослідження та інформаційні технології» включено до переліку фахових видань ВАК України.

Журнал «Системні дослідження та інформаційні технології» входить до таких наукометричних баз даних: EBSCO, Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, реферативна база даних «Україніка наукова», український реферативний журнал «Джерело», наукова періодика України, ВІНТІ РАН.

Статті публікуються українською, російською та англійською мовами.

Журнал можна передплатити. **Наш індекс 23918.** Якщо ви не встигли передплатити журнал, його можна придбати безпосередньо в редакції. Наша адреса: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 35.

Завідуюча редакцією **С.М. Шевченко**  
Редактор **Р.М. Шульженко**  
Молодший редактор **Л.О. Тарин**  
Комп'ютерна верстка та набір **А.А. Патіоха**

---

Підписано до друку 20.06.2018. Формат 70x108/16.  
Папір офс. Офс. друк. Ум. друк. арк. 14. Ціна договірна.  
Свідоцтво про реєстрацію КВ № 23234–13074 ПР від 22.03.2018 р.

---

Видавництво «Політехніка»  
Свідоцтво ДК № 1665 від 28.01.2004 р.  
03056, Київ, вул. Політехнічна, 14, корп. 15  
Тел. (044) 204-81-78  
Наклад 120 пр. Зам. № 16-163

## **Dear Readers!**

Educational and Scientific Complex «Institute for Applied System Analysis» of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» is published of the international scientific and technical journal

### **«SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES».**

The Journal is printing works of a theoretical and applied character on a wide spectrum of problems, connected with system researches and information technologies.

#### **The main thematic sections of the Journal are the following:**

Theoretical and applied problems and methods of system analysis; theoretical and applied problems of computer science; automated control systems; progressive information technologies, high-efficiency computer systems; decision making and control in economic, technical, ecological and social systems; theoretical and applied problems of intellectual systems for decision making support; problem- and function-oriented computer systems and networks; methods of optimization, optimum control and theory of games; mathematical methods, models, problems and technologies for complex systems research; methods of system analysis and control in conditions of risk and uncertainty; heuristic methods and algorithms in system analysis and control; new methods in system analysis, computer science and theory of decision making; scientific and methodical problems in education.

**The editor-in-chief of the Journal** is rector of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», academician of the NASU Michael Zaharovich Zgurovsky.

The articles to be published in the Journal in Ukrainian, Russian and English languages are accepted. Information printed in the Journal is included in the Catalogue of periodicals of Ukraine.

# СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

2 • 2018

## ЗМІСТ

### ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ

<i>Zuev D.O., Kropachev A.V., Usov A.Ye., Gorshunov R.A.</i> Development of the performance prediction algorithms for cloud services .....	7
<i>Мозговой Д.К.</i> Автоматизированное обнаружение изменений городской застройки по мультиспектральным спутниковым снимкам субметрового разрешения .....	15
<i>Тимощук О.Л., Дорундяк К.М.</i> Оцінювання ймовірності банкрутства підприємств за допомогою дискримінантного аналізу та нейронних мереж .....	22
<i>Zabielin S.</i> Big Data analysis via model reduction methods .....	35

### ПРОБЛЕМНО І ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

<i>Поліщук О.Д., Яджак М.С.</i> Мережеві структури та системи: I. Потоків характеристики складних мереж .....	42
<i>Моженкова Е.В., Парамонов А.И.</i> Выявление причин трудоемкости сопровождения корпоративных информационных систем .....	55

### МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР

<i>Цегелик Г.Г., Краснюк Р.П.</i> Математичне моделювання оптимального оброблення даних у розподілених інформаційних системах .....	63
<i>Ткачук В.М.</i> Адаптивний квантовий генетичний алгоритм для 0–1 задачі пакування рюкзака .....	77

### МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

<i>Кирилюк В.С., Левчук О.І., Гавриленко О.В.</i> Математичне моделювання контактної взаємодії двох електропружних півпросторів під час стискання за наявності жорсткого дископодібного включення між ними .....	89
<i>Козуля Т.В., Моїсєєв В.Ф., Козуля М.М., Савченко А.В.</i> Формування ентропійно-інформаційної оцінки відповідності стану складних об'єктів і знання-орієнтованих баз даних у межах моніторингових систем .....	99

### МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ В УМОВАХ РИЗИКУ І НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

<i>Зак Ю.А.</i> Задачи нечеткого линейного программирования с двухсторонними ограничениями и параметрами целевых функций и ограничений в виде нечетких множеств .....	111
<i>Кузнецова Н.В., Бідюк П.І.</i> Системний підхід до менеджменту фінансових ризиків .....	124
Реферати .....	141
Відомості про авторів .....	149

# SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

2 • 2018

## CONTENTS

### PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES, HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS

<i>Zuev D.O., Kropachev A.V., Usov A.Ye., Gorshunov R.A.</i> Development of the performance prediction algorithms for cloud services .....	7
<i>Mozgovoy D.K.</i> Automated detection of changes in urban development on multispectral satellite imagery of submeter resolution .....	15
<i>Tymoshchuk O.L., Dorundiak K.M.</i> Assessment of the probability of bankruptcy of companies using discriminant analysis and neural networks .....	22
<i>Zabelin S.</i> Big Data analysis via model reduction methods .....	35

### PROBLEM- AND FUNCTION-ORIENTED COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS

<i>Polishchuk O.D., Yadzhak M.S.</i> Network structures and systems: I. Flows characteristics of complex networks .....	42
<i>Mozhenkova E.V., Paramonov A.I.</i> Identifying the reasons for the complexity of the maintenance of corporate information systems .....	55

### METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM CONTROL AND THEORY OF GAMES

<i>Tsegelyk G.G., Krasniuk R.P.</i> The mathematical modeling of optimal data processing in distributed information systems .....	63
<i>Tkachuk V.M.</i> An adaptive quantum evolution algorithm for 0–1 knapsack problem .....	77

### MATHEMATICAL METHODS, MODELS, PROBLEMS AND TECHNOLOGIES FOR COMPLEX SYSTEMS RESEARCH

<i>Kirilyuk V.S., Levchuk O.I., Gavrilenko O.V.</i> Mathematical modeling of contact interaction of two electroelastic half-spaces under compression with rigid disc-shaped inclusion between them .....	89
<i>Kozulia T.V., Moiseev V.F., Kozulia M.M., Savchenko A.V.</i> Forming entropy-information assessment correspondence of complex objects state and knowledge-oriented databases in monitoring systems .....	99

### METHODS OF SYSTEM ANALYSIS AND CONTROL IN CONDITONS OF RISK AND UNCERTAINTY

<i>Zack Yu.A.</i> Problems of fuzzy-linear programming with two-sided constraints and parameters of objective functions and constraints in the form of fuzzy sets .....	111
<i>Kuznietsova N.V., Bidyuk P.I.</i> System approach to financial risks management .....	124
References .....	141
Information about the authors .....	149

## **DEVELOPMENT OF THE PERFORMANCE PREDICTION ALGORITHMS FOR CLOUD SERVICES**

**D.O. ZUEV, A.V. KROPACHEV, A.YE. USOV, R.A. GORSHUNOV**

**Abstract.** Main stages of data center service performance prediction were discussed, specifically data monitoring and gathering, calculation and prediction of key indexes and performance index prediction. It was proposed to build data center service performance prediction algorithm based on an analysis of the service transactions index, service resource occupancy index and service performance index. Prediction of the indexes is based on chaotic time series analysis that was used to estimate service transactions index time series trend, the radar chart method to calculate the service resource occupancy index value and weighted average method to calculate service performance index. For performance prediction, it is proposed to use a fuzzy judgment matrix with the service transactions index and service resource occupancy index as input values. It was taken into consideration that service transactions index is usually represented by nonlinear time series and thus the index time series parameters had to be predicted by chaos theory and for the calculation of this index, the estimation procedure of Lyapunov exponent value can be used. The radar chart demonstrates service resource occupancy index estimation of shared storage, mobile storage, memory, computational capability and network bandwidth. The prediction technique was based on the fuzzy nearness category that use input values of transactions index and dynamic changes of the service resource occupancy index.

**Keywords:** data center, service transactions index, service resource occupancy index, service performance index, fuzzy judgment matrix, Lyapunov exponent, radar chart.

### **INTRODUCTION**

Nowadays requirements to cloud platform data center services performance have significantly grown. Thereby it's important to develop effective and multipurpose algorithm of estimation of key aspects that refers to the stability of the network infrastructure work. An efficient strategy should be based on an analysis of the whole dataset of gathered information of a monitoring platform and to be able to predict indexes of the data center performance at any moment of time with the high accuracy.

The assigned task could be solved by mathematical methods of the chaotic analysis and fuzzy logic, but adaption of them stands a nontrivial task. In order to identify the main aspects of the problem, an analysis of recent studies and publi-

cations was done. It was analyzed that aspects of data center service performance that were mentioned to be key ones [1, 2], specifically service transactions index, service resource occupancy index and service performance index. To solve the problem of prediction of those, works were studied devoted to chaotic analysis [2–4], radar chart method [1, 5] and weighted average method [6]. Also, within the bounds of this study, the fundamental mathematical materials were analyzed [7–9] related to fuzzy logic in order to use it at cloud platform data center services performance analysis and prediction. The system analysis shows the possibility to develop an effective technique based on monitoring and gathering of information for estimation and accurate prediction of key aspects that refers to the data center service performance.

### SERVICE INDEXES PREDICTION AND CALCULATION PROCEDURE

The data center service performance prediction procedure [1, 2] usually includes following stages (Fig. 1):

- monitoring and gathering of data center indicators' data;
- calculation and prediction of key indexes of data center infrastructure work;
- prediction of the data center service performance index.

Indicators' data contain recorded by virtual machine (VM) monitoring plugins information about transaction logs, utilization level of physical resources (shared storage, computational capability, network bandwidth, etc.) and response time of each monitoring spot which refers to the system performance. The analysis of gathered data allows defining key indexes of data center infrastructure work efficiency (Fig. 1):

- service transactions index (STI);
- service resource occupancy index (SROI);
- service performance index (SPI).

STI value refers to the number of data center's transactions that require a service to process. This index indicates service's loads at each moment and should be recorded as a time series  $x_i : [x_1, x_2, \dots, x_n]$  which corresponds to the time chart  $t_i : [t_1, t_2, \dots, t_n]$ . As it is shown at Figure 1, usually STI time series have to be modeled as a nonlinear sequence. Thus, STI trends can be predicted by nonlinear time series forecasting methods based on the artificial neural networks (ANNs) platform. In other hand, SROI value refers to data center servers' physical resources allocated to the service at each moment and SPI value refers to the data center service's response time at each moment. It should be mentioned that SPI directly reflects service performance while this index is the comprehensive result of the key monitoring points' analysis.

Prediction of key indexes procedure includes a variety of methods or algorithms that can be used. Within the bounds of this study it is proposed to use (Fig. 1):

- chaotic time series analysis to estimate STI time series trend [2–4];
- radar chart method to calculate SROI value [1, 5];
- weighted average method to calculate SPI value [6].



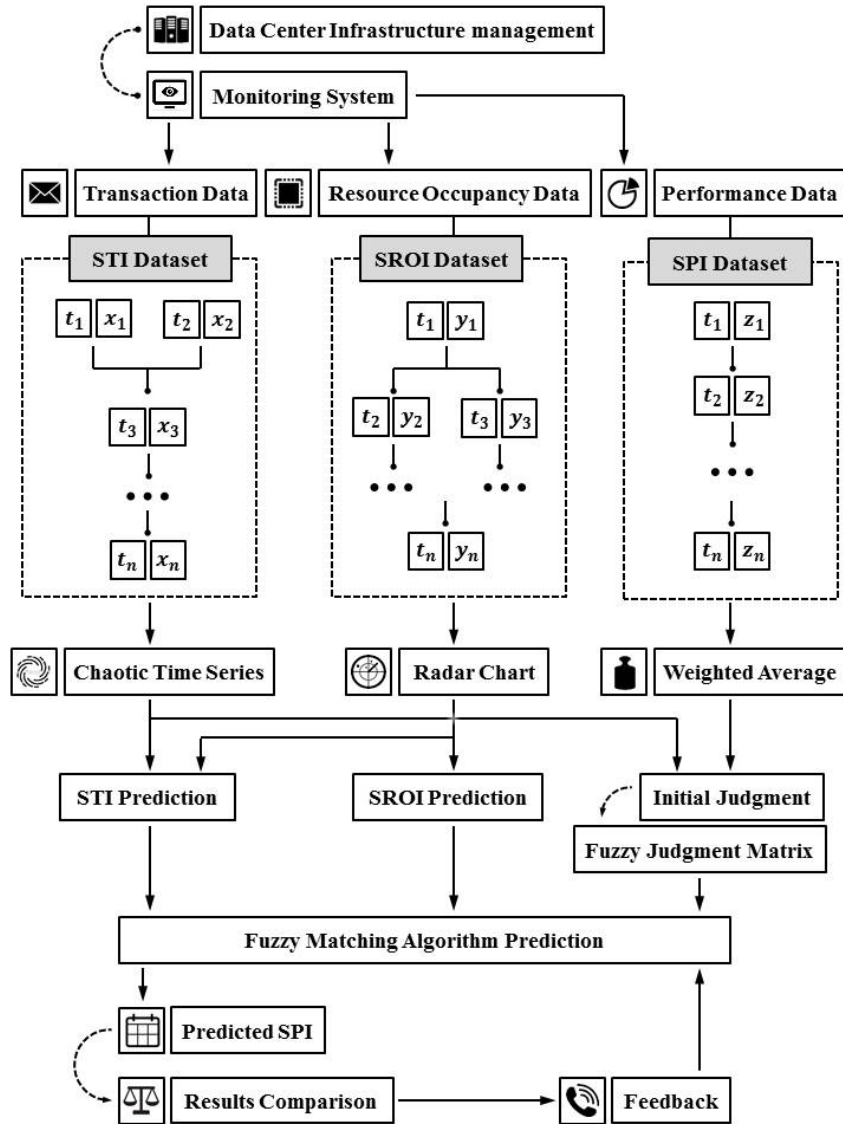


Fig. 1. Data center service performance prediction scheme

Performance prediction of the modern data center service work process should be based on a fuzzy judgment matrix. It uses STI and SROI values (Figure 1) according to the definition of the fuzzy closeness degree, and estimate the best matching value of STI and SROI at the predicted moment by a similarity matching algorithm. Thereby, SPI which corresponds to the obtained value represents prediction result data center service performance to be compared with the value that was obtained experimentally.

### STI TIME SERIES PREDICTION ALGORITHM

It was mentioned above that the modern data center service based on cloud paradigm is usually has to be represented by a nonlinear system. It could be added that

STI time series would be nonlinear time series on a cloud platform. Thereby, STI time series parameters have to be predicted by the chaos theory.

For reconstruction of STI time series the delay embedding theorem should be used (Takens' theorem). Let us suppose that time series  $x_i : [x_1, x_2, \dots, x_n]$  which corresponds to the time  $t_i : [t_1, t_2, \dots, t_n]$  have power system dimension  $d$  and thus the system must be considered form  $d$ -dimensional state vector  $x_i(t)$  that evolves according to an unknown but continuous and deterministic dynamics. For simplified form of Takens' theorem [1, 7–9] adapted to the time series prediction it can be said that observable result  $F_x$  is a smooth function of  $x_i$  dataset.  $F_x(t)$  has to be supplemented by observations made within certain time lag  $\tau$  multiplied by values  $k = 1, \dots, m$  :

$$F_x(t, k) : [F_x(t), F_x(t - \tau), F_x(t - 2\tau), \dots, F_x(t - k\tau), \dots, F_x(t - m\tau)].$$

It's obvious that for increasing number of lags  $m$  it will lead motion in the lagged space to become more predictable, and for  $m \rightarrow \infty$  system will tend to become deterministic and equivalent to original state space. Takens' theorem [1] demonstrates that lagged vectors become deterministic at a finite dimension of  $m \geq 2d + 1$ . Thereby STI time series prediction's target function  $F_x(t_i)$  of  $m$ -dimensional phase space with  $N$  phase points could be defined in every point in space phase as:

$$\begin{cases} F_x(t_i) = [x(t_i), x(t_i + \tau), x(t_i + 2\tau), \dots, x(t_i + \tau(m-1))] \\ m \geq 2d + 1; i = 1, 2, \dots, N; N = n - \tau(m-1). \end{cases}$$

It has to be noticed that  $m \geq 2d + 1$  is not a necessary but sufficient condition of determination of system dynamics.

STI time series' calculation could be done not only by a qualitative analysis but also by a quantitative algorithm. It's based on calculating some chaotic quantities. The most effective way is to estimate Lyapunov exponent value. Lyapunov exponent of a dynamical system is a quantity that characterizes the rate of separation of infinitesimally close trajectories []. Two trajectories in phase space with initial separation  $\delta Z_0$  diverge as:

$$\|\delta Z(t)\| \approx \|\delta Z_0\| \geq \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left( \lim_{\delta Z_0 \rightarrow 0} \left( \frac{\ln \left( \frac{|\delta Z(t)|}{|\delta Z_0|} \right)}{t} \right) \right),$$

where  $\lambda$  is the Lyapunov exponent and  $\delta Z_0 \rightarrow 0$  criteria ensure the validity of the linear approximation at each moment of time. Thereby, the biggest obtained value of Lyapunov exponent (MLE: maximal Lyapunov exponent) is a parameter which could be used for estimation whether a system is a chaotic one ( $\lambda > 0$ ) or not ( $\lambda \leq 0$ ). It should be noticed that the initial separation vector usually contain some component in the direction associated with the MLE, and thus an effect of the other exponents can be neglected.

For analysis of STI time series the proposed mathematical model could be slightly simplified. Let us suppose that we need to predict  $x_{n+k}$  for dataset of  $x_i : [x_1, x_2, \dots, x_n]$ . We have to choose a point  $X_i$  for the prediction center in a phase space of the system.  $X_i$  is defined as:

$$X_i : [x_n - \tau(m-1), x_{n+1} - \tau(m-1), \dots, x_{n+k} - \tau(m-1)].$$

The next step is to define nearest point  $X_j : \{X_1, X_2, \dots, X_{i-1}\}$ . While distance between  $X_i$  and  $X_j$  is  $d$ , then  $d$  could be defined as  $d = \|X_i - X_j\|$ . Therefore, MLE could be estimated by comparison of  $d = \|X_i - X_{i+1}\|$  and  $\|X_j - X_{j+1}\|$  differences.

$$\|X_i - X_{i+1}\| = e^{\lambda_1} \|X_j - X_{j+1}\| \geq \lambda_1 = \ln \left( \frac{\|X_i - X_{i+1}\|}{\|X_j - X_{j+1}\|} \right).$$

While  $\lambda_1$  is obtained MLE for time series  $x_i : [x_1, x_2, \dots, x_n]$ , it predicts  $x_{n+1}$ . To predict  $x_{n+k}$ ,  $k$ -step prediction should be done.

### **SROI AND SPI VALUE PREDICTION ALGORITHM**

As it was mentioned above, SROI value refers to the data center service physical resources utilization level. Physical resources are distributed on different servers and VMs so estimation of SROI value is a nontrivial task. The most efficient method of SROI analysis is development of radar chart, a graphical method of displaying multivariate data more than two quantitative variables [1, 5].

The radar chart area  $R(t)$  for SROI evaluation and prediction can be gotten as follows:

$$R(t) = \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{3}\right)}{2} \sum_{i,j} [y_i y_j].$$

Fig. 2 shows the demonstrated radar chart that can be used for SROI analysis for five resources:

- shared storage;
- mobile storage;
- memory (RAM and cash-memory);
- computational capability (CPU);
- network bandwidth.

There are several methods of effective SPI prediction but all of them based on estimation of monitoring points response time dataset  $T_i : [T_1 \dots T_n]$ . Thereby, basic equation for SPI at any moment of time could be defined as:

$$P_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i.$$

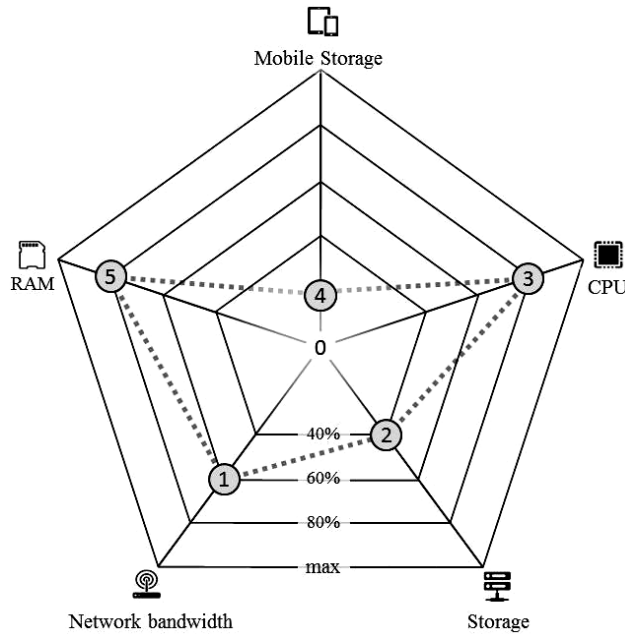


Fig. 2. Data center service resources occupancy radar chart

Prediction technique is based on the fuzzy nearness category that use input values of STI and SROI values dynamic changes (as a real time process). A fuzzy matching algorithm estimates the nearness degree of STI and SROI of the prediction time. The nearness level of STI values' dataset ( $X_n$ ) and SROI values' dataset ( $Y_n$ ) for the  $n$  time moments to be predicted should be estimated to  $X_i$  and  $Y_i$  that the closest ones to  $X_n$  and  $Y_n$ , respectively. To calculate SPI values' dataset as a set of predicted performance values at predicted  $n$  time moments,  $X_i$  and  $Y_i$  values have to be used (Fig. 3).

Estimation of SPI values' dataset is impossible without getting the nearness degree of STI and SROI which is based on calculating of the membership degree (Figure 3). The membership degree is a value of membership function  $F \in [0;100\%]$  that refers to the correlations between an element and some characteristic [1, 9]. The calculation of a membership function is based on eigenvalue matrix of  $X_i$  and  $Y_i$  datasets:

$$\begin{cases} F(X_i) = \frac{X_i - \min(X_n)}{\max(X_n) - \min(X_n)}; \\ F(Y_i) = \frac{Y_i - \min(Y_n)}{\max(Y_n) - \min(Y_n)}. \end{cases}$$

It allows obtaining fuzzy matrix of  $F(X_i)$  and  $cF(Y_i)$  datasets (Fig. 3). Together with  $F(X_n)$  and  $F(Y_n)$  datasets it should be used to obtain the nearness degree:

$$ND(A_i, A_n) = ((F(X_i) \vee F(X_n))) \wedge (((1 - F(X_i)) \wedge (1 - F(X_n)))) \vee$$

$$\vee((1 - F(Y_i)) \wedge (1 - F(Y_n)))$$

where  $A_i$  represents the matrix in moment  $i$  (an estimated moment of time), and  $A_n$  represents the matrix in moment  $n$  (a predicted moment of time).

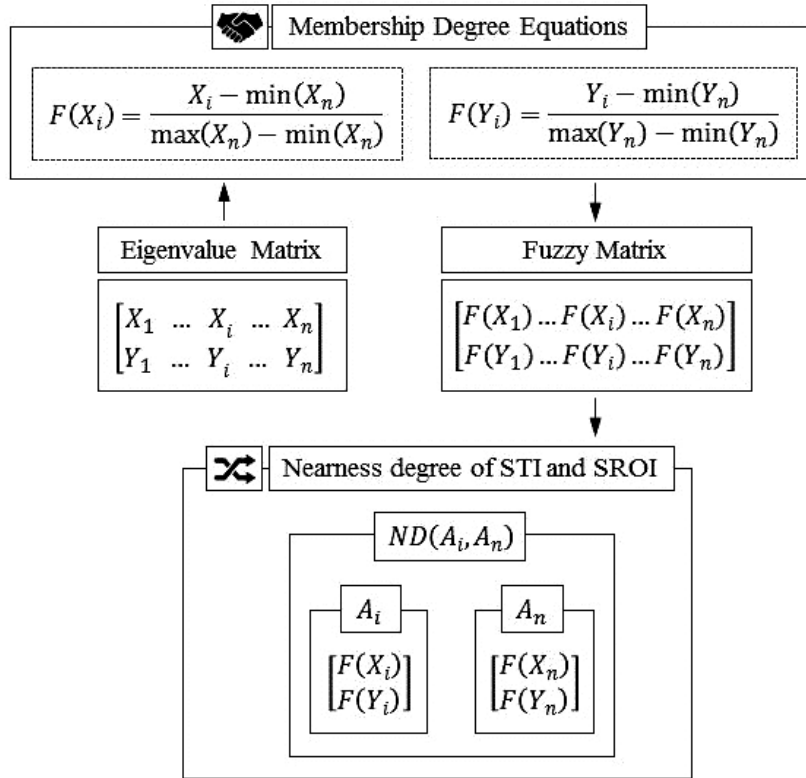


Fig. 3. Evaluation of nearness degree of STI and SROI.

## CONCLUSIONS

Main stages of data center service performance prediction, such as indicators' data monitoring and gathering, calculation and prediction of key indexes of data center infrastructure work and performance index prediction were discussed. It was proposed to build the data center service performance prediction algorithm based on an analysis of the service transactions index, service resource occupancy index and service performance index. The prediction of the indexes was based on the chaotic time series analysis that was used to estimate the service transactions index time series trend, radar chart method to calculate the service resource occupancy index value and weighted average method to calculate the service performance index.

For performance prediction, it was proposed to use the fuzzy judgment matrix with the service transactions index and service resource occupancy index as input values. Next stages include the definition of a fuzzy closeness degree and an estimation of the best matching value of the indexes at the predicted moment by the similarity matching algorithm. It was taken into consideration that service

transactions index is usually represented by nonlinear time series. It was noticed that the index time series parameters have to be predicted by the chaos theory and thereby for the calculation of this index the estimation procedure of Lyapunov exponent value was used. Radar chart that was used for service resource occupancy index estimation was built for five main resources of the cloud platform service: shared storage, mobile storage, memory, computational capability and network bandwidth. For calculation of service performance index values' dataset it is necessary to find the nearness degree of the service transactions index and service resource occupancy index; it was proposed to estimate the first membership degree. Therefore, the prediction technique was based on the fuzzy nearness category that used input values of service transactions index and service resource occupancy index dynamic changes which was considered as a real time process.

## REFERENCES

1. *Wu C.* Software Monitoring in Data Centers. Handbook on Data Centers / C. Wu, J. Guo. — 2015. — P. 1209–1253.
2. *Newcombe L.* Data Center Financial Analysis, ROI and TCO. Data Center Handbook / L. Newcombe. — 2014. — P. 103–137.
3. *Román-Flores H.* Chaos on Set-Valued Dynamics and Control Sets. Chaos Theory / H. Román-Flores, V. Ayala. — 2018.
4. *Tang R.* Metaheuristics and Chaos Theory. Chaos Theory / R. Tang, S. Fong, N. Dey. — 2018.
5. *Hongliang L.* A Fuzzy Comprehensive Evaluation Method of Maintenance Quality Based on Improved Radar Chart / L. Hongliang, L. Anxin, Z. Bin et al. // 2008 ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management.
6. *Shi J.* The domain decomposition method based on weighted average / J. Shi, Y. Liu, W. Zhou // 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering.
7. *Harris J.* An introduction to fuzzy logic applications / J. Harris. — Dordrecht: Kluwer Academic.
8. *Anderson M.* Fuzzy logic / M. Anderson. — Parkdale, OR: Black Opal Books, 2015.
9. *Dimitrov V.* Fuzzy logic: A framework for the new millennium / V. Dimitrov, V. Korotkich. — Heidelberg: Physica-Verlag, 2011.

*Received 10.05.2018*

---

From the Editorial Board: the article corresponds completely to submitted manuscript.

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГОРОДСКОЙ ЗАСТРОЙКИ ПО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ СНИМКАМ СУБМЕТРОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Д.К. МОЗГОВОЙ

**Аннотация.** Предложен метод повышения эффективности автоматизированного обнаружения изменений городской застройки по мультиспектральным спутниковым снимкам субметрового пространственного разрешения видимого и инфракрасного диапазонов с применением преобразования главных компонент (РСА) для данных всех спектральных каналов. В результате обработки разновременных снимков со спутника Pleiades-1A получены векторные слои обнаруженных изменений городской застройки и подтверждена высокая эффективность данного метода. Благодаря высокой степени автоматизации процессов обработки спутниковых снимков разработанная методика позволяет существенно снизить трудоемкость и тем самым повысить оперативность обновления карт.

**Ключевые слова:** спутниковый мониторинг, городская застройка, разновременные снимки, обработка изображений, преобразования главных компонент, обновление карт.

**Актуальность тематики исследований.** Интенсивное развитие новейших технологий строительства в последние десятилетия стало одной из основных причин стремительного роста динамики изменений городской застройки во всем мире. Причем эта тенденция наблюдается как в секторе жилищного строительства (высотного и малоэтажного), так и в секторе возведения промышленных и коммерческих объектов. Поэтому задача разработки высокоэффективных методов автоматизированного обнаружения изменений городской застройки является важной и актуальной задачей в сфере информационных технологий.

**Текущее состояние.** Для регулярного обновления баз пространственных данных при актуализации карт городов традиционно использовались данные наземных измерений и аэрофотоснимки. При этом периодичность обновления карт городов была чрезвычайно низкой (обычно один раз в несколько лет), что было обусловлено высокой трудоемкостью сбора и обработки данных. Благодаря значительному прогрессу в области разработки оптико-электронных спутниковых сканеров субметрового пространственного разрешения (см. таблицу) [1, 2] в последние годы для оценки динамики изменений наземных объектов и актуализации карт городов все шире используются спутниковые снимки [3–5].

**Постановка проблемы.** Для обнаружения изменений на разновременных спутниковых снимках субметрового пространственного разрешения обычно используются разностные изображения, позволяющие выявить из-

менения в застройке по различию значений пар пикселей, имеющих одинаковые географические координаты на двух снимках, приведенных к одинаковому пространственному разрешению [6–8]. При этом, как правило, используют данные панхроматического канала, обеспечивающего наилучшую детальность и чувствительность. Однако такой метод при своей простоте обладает существенным недостатком: он не позволяет обнаружить изменения в тех случаях, когда сравниваемые объекты имеют разные значения яркости в мультиспектральных каналах, но одинаковые в панхроматическом канале.

**Цель и задачи исследований.** Основной задачей исследований является повышение эффективности автоматизированного обнаружения изменений городской застройки по мультиспектральным спутниковым снимкам субметрового пространственного разрешения видимого и инфракрасных диапазонов за счет использования данных всех спектральных каналов с целью повышения оперативности и достоверности обновления карт городов.

### Спутники с оптико-электронными сканерами субметрового разрешения

Спутник	Год запуска	Страна-оператор	Разрешение			Полоса захвата, км	Точность геопривязки, м*
			PAN/MS, м	Радиометрич, бит	Количество каналов		
EROS-B	2006	Израиль	0,7	10	1	7	н.д.
Cartosat-2	2007	Индия	0,8	10	1	9,6	н.д.
WorldView-1	2007	США	0,5	11	1	17,6	5
GeoEye-1	2008	США	0,4/1,6	11	4	15	2...3
WorldView-2	2009	США	0,46/1,84	11	8	16	5
Cartosat-2B	2010	Индия	0,8	10	1	9,6	н.д.
Pleiades-1A	2011	Франция	0,5/2	12	4	20	4,5
Kompsat-3	2012	Корея	0,5/2	14	4	17	13
Pleiades-1B	2012	Франция	0,5/2	12	4	20	4,5
SkySat-1	2013	США	0,8/2,0	11	4	8	н.д.
Gaofen-2	2014	Китай	0,8/3,24	10	4	45	50
ASRARO-1	2014	Япония	0,5/2,0	11	6	10	10
WorldView-3	2014	США	0,3/1,2	11/14	8	13	3,5
SkySat-2	2014	США	0,8/2,0	11	4	8	н.д.
Kompsat-3A	2015	Корея	0,4/1,6	14	4	12	13
PeruSat-1	2016	Перу	0,7/2,0	12	4	10	н.д.
SkySat-3...7	2016	США	0,8/2,0	11	4	8	н.д.
Gokturk-1A	2016	Турция	0,7/2,8	12	4	20	10
SuperView-1A/B	2016	Китай	0,5/2	11	4	12	20
WorldView-4	2016	США	0,3/1,2	11	4	13	3
Mohammed-VIA	2017	Марокко	0,7/2,8	12	4	20	н.д.
SkySat-8...13	2017	США	0,8/2,0	11	4	8	н.д.
SuperView-1C/D	2018	Китай	0,5/2	11	4	12	20

\*н.д. – нет данных

**Исходные данные для исследований.** В качестве тестового участка для отработки методов повышения эффективности автоматизированного обнаружения изменений городской застройки была выбрана территория го-



рода Хилдсбург (рис. 1), расположенного в штате Калифорния (США). Это обусловлено тем, что в различных регионах данного штата наблюдается достаточно высокая динамика развития городской инфраструктуры, в том числе изменения застройки, в особенности жилья и коммерческих объектов. Кроме того, через Хилдсбург проходят крупнейшие нефтегазопроводы, вблизи которых согласно нормативам необходимо регулярно контролировать изменения застройки.

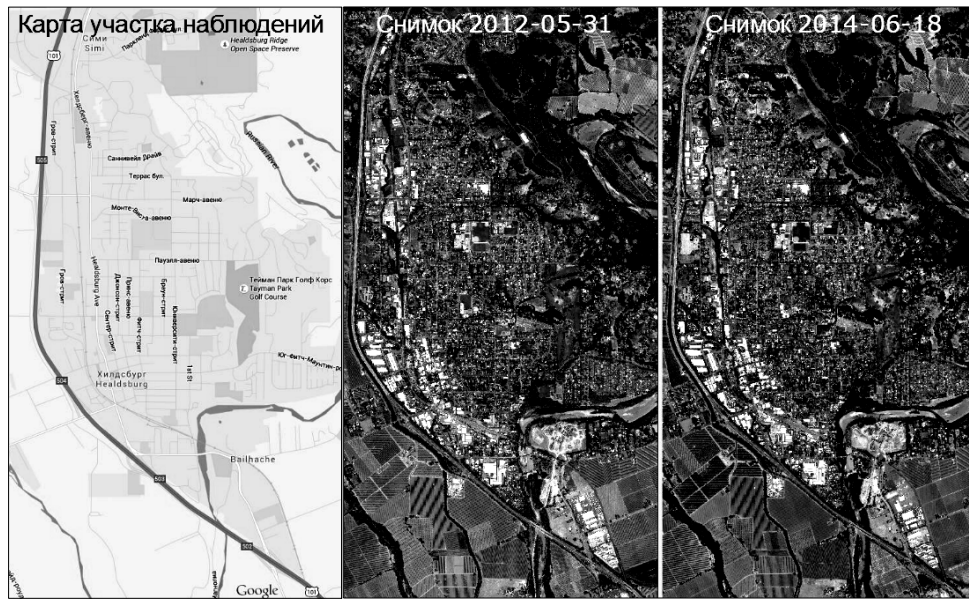


Рис. 1. Территория съемки и исходные спутниковые снимки

В качестве мультиспектральных данных для анализа были выбраны разновременные снимки видимого и инфракрасного диапазонов со спутника Pleiades-1A за 31 мая 2012 г. и 18 июня 2014 г. (рис. 1).

**Методология исследований.** Работы, проведенные в рамках исследований, включали следующие этапы обработки и анализа снимков [9, 10]:

- предварительную обработку (нормализацию) разновременных спутниковых снимков, одинаковую для старого и нового снимков, включающую орторектификацию, повышение пространственного разрешения и корреляционную привязку к эталону (рис. 2);
- тематическую обработку нормализованных спутниковых снимков, включающую фильтрацию теней и малоразмерных подвижных объектов (машины, лотки выносной торговли и т.п.), расчет первой главной компоненты, двухпороговую бинаризацию, морфологическую и объектную фильтрацию и векторизацию распознанных изменений (рис. 3).

**Требования к программному и аппаратному обеспечению.** Размеры файлов мультиспектральных снимков высокого пространственного разрешения, как правило, достаточно большие (например, одна сцена, снятая в видимом и инфракрасном диапазоне, может занимать несколько гигабайт). Поэтому для оперативной обработки снимков со спутника SuperView-1A в реальном времени желательно использовать современные компьютеры с многоядерными процессорами класса Intel I-7 или выше и объемом оперативной памяти не менее 64 Гбайт. Программное обеспечение может быть как платным (ERDAS, ENVI, ArcGIS и т.п.), так и свободным (SNAP, SAGA, GRAAS, QGIS и т.п.), работающим как в среде MS Windows, так и в среде

Linux. Для обеспечения большей степени автоматизации процедур обработки возможно использование соответствующих инструментов (например, Imagine Model Maker в пакете ERDAS, Graph Builder в пакете SNAP) или языков программирования и специализированных утилит (например, IDL в пакете ENVI, Python + GDAL в системе QGIS).

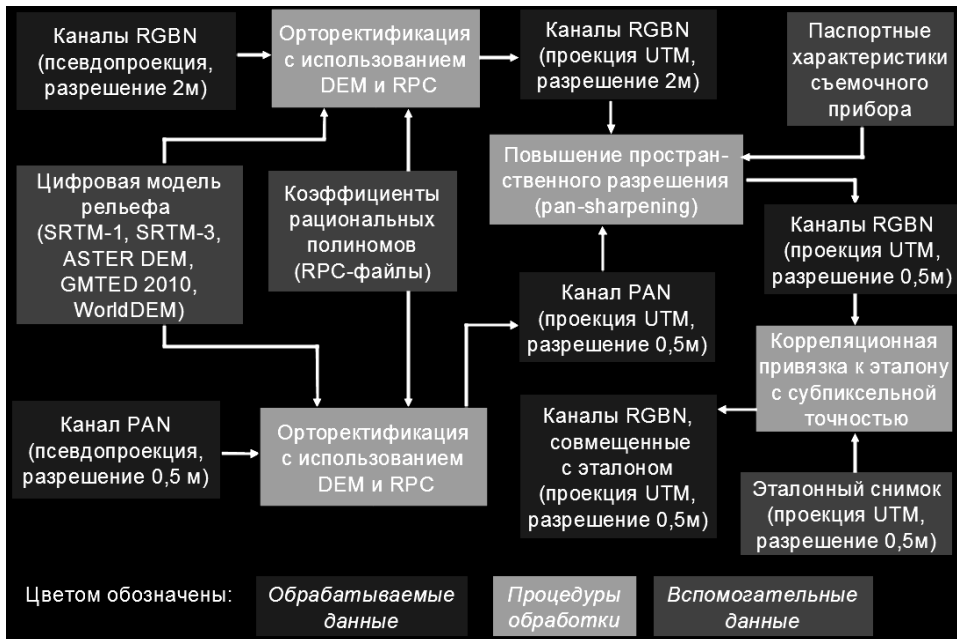


Рис. 2. Основные этапы предварительной обработки спутниковых снимков



Рис. 3. Основные этапы тематической обработки спутниковых снимков

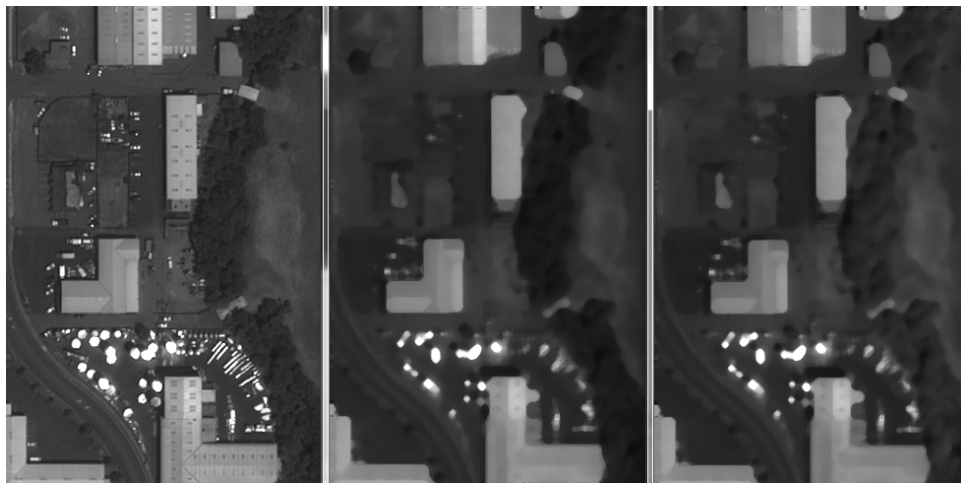
**Результаты исследований.** После нормализации и фильтрации мультиспектральных данных видимого и инфракрасного диапазонов со спутника Pleiades-1A были получены 1-е главные компоненты снимков за

31 мая 2012 г. (рис. 4) и 18 июня 2014 г. (рис. 5), по которым определялись изменения застройки (рис. 6).



Нормализованный снимок    Фильтрация мелких объектов    1-я главная компонента

Рис. 4. Результаты обработки нормализованного снимка за 31 мая 2012 г.



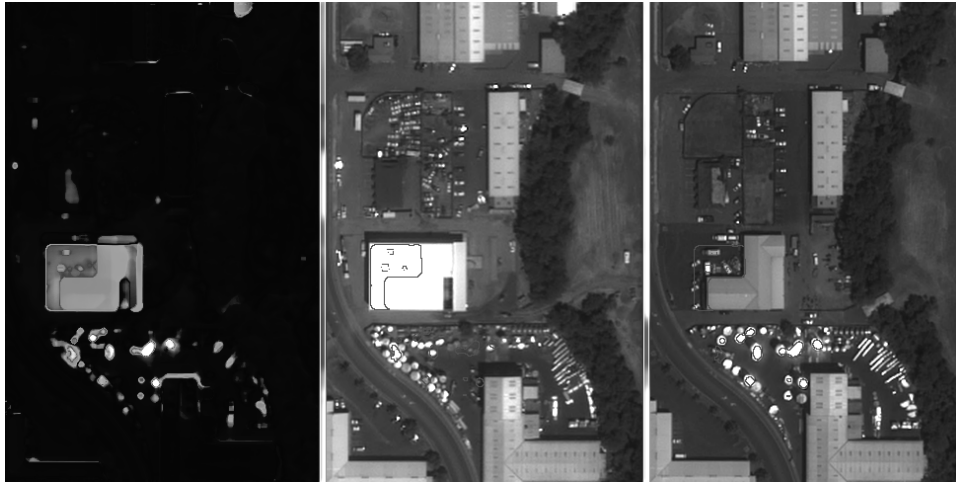
Нормализованный снимок    Фильтрация мелких объектов    1-я главная компонента

Рис. 5. Результаты обработки нормализованного снимка за 18 июня 2014 г.

На различных тестовых участках территории съемки получено достаточно точное выделение границ распознанных изменений застройки и подтверждена высокая устойчивость предложенного метода даже без использования дополнительных масок растительности и водных объектов.

*Основные преимущества* предложенной методики по сравнению с существующими методами, которые используют только данные панхроматического канала, заключаются в способности обнаружить изменения в тех случаях, когда сравниваемые объекты имеют одинаковые значения альбедо на старом и новом снимках в панхроматическом канале, что позволяет существенно повысить достоверность выявления изменений. Высокая степень автоматизации процессов обработки спутниковых снимков позволяет с ис-

пользованием разработанной методики существенно снизить трудоемкость и тем самым повысить оперативность обновления карт.



Обнаруженные изменения    Вектор и старый снимок    Вектор и новый снимок

Рис. 6. Обнаруженные изменения и векторные слои, наложенные на растр

*Практическое применение* предложенной методики достаточно обширна, поскольку она позволяет проводить автоматизированное обнаружение изменений не только городской застройки, но и любых других природных и антропогенных объектов (дорожная сеть, растительные и водные объекты и т. п.). Поэтому она может быть использована в интересах как различных государственных служб, так и частных компаний и коммерческих структур. При программной реализации данной методики в виде геоинформационного веб-сервиса [11, 12] она может быть использована для оперативного информирования широких слоев населения — наиболее массового пользователя.

**Направления дальнейших исследований.** В настоящее время ведется отработка предложенной методики с использованием многоспектральных снимков различных участков Земли, полученных с действующих спутников субметрового разрешения, с целью определения оптимальных параметров обработки для основных типов современных бортовых сканеров с учетом региона и условий съемки. Проводится модернизация методики в части использования дополнительных масок растительности и водных объектов с целью повышения устойчивости и качества распознавания.

## ВЫВОДЫ

Предложена методика повышения эффективности автоматизированного обнаружения изменений городской застройки по мультиспектральным спутниковым снимкам субметрового пространственного разрешения видимого и инфракрасного диапазонов, обеспечивающая повышение оперативности и достоверности обновления карт городов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Satellite Missions Database*. — Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>
2. Борзов С.М. Обнаружение антропогенных зон на основе поиска пространственных аномалий в крупномасштабных спутниковых изображениях / С.М. Борзов, О.И. Потатуркин // *Автометрия*. — 2012. — № 5. — С. 104–111.
3. Арбузов С.А. Разработка методики автоматизированной обработки аэро- и космических снимков для мониторинга городских территорий: автореф. дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. — Новосибирск: ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия», 2011.
4. Барладін О.В. Геоінформаційний підхід та проблематика щодо оновлення планово-картографічних матеріалів з використанням аеро- та космічних знімків / О.В. Барладін, Л.І. Миколенко, О.Ю. Скляр // *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. — 2009. — Вип.. 71. — 76 с.
5. Алипбеки О.А. Контроль и мониторинг изменений инфраструктуры города Астаны по космическим данным ДЗЗ со спутника KazEOSat-1 / О.А. Алипбеки, Т.М. Мырзагалиев // *Геоматика*. — 2016. — № 1. — С. 55–58.
6. Філіпович В.Є. Особливості космічного моніторингу урбанізованих ландшафтів / В.Є. Філіпович // *Фізична географія та геоморфологія*. — 2013. — Вип.3. — С.143–150.
7. Хлебникова Е.П. Особенности обнаружения изменений инженерно-технических сооружений при интерпретации и анализе космических изображений / Е.П. Хлебникова, М.Т. Абишева // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр., 18–22 апреля 2016 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология»: сб. материалов: в 2 т.* — Новосибирск: СГУГиТ, 2016. — Т. 1. — С. 9–14.
8. Мясников Ф.С. Анализ алгоритмов обнаружения на космических снимках / Ф.С. Мясников // *Сборник научных трудов «Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации»*. — Екатеринбург, 2015. — С. 66–70.
9. *Satellite monitoring of deforestation as a result of mining* / V.V. Hnatushenko, D.K. Mozgovoy, V.V. Vasyliiev. — Available at: <http://www.nvngu.in.ua/index.php/en/monographs/1489-engcat/archive/2017-eng/contents-5-2017/environmental-safety-labour-protection/4138-satellite-monitoring-of-deforestation-as-a-result-of-mining>.
10. *Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine* / V.V. Hnatushenko, D.K. Mozgovoy, V.V. Vasyliiev, O.O. Kavats. — Available at: <http://www.nvngu.in.ua/index.php/en/component/jdownloads/finish/67-02/8619-02-2017-hnatushenko/0>.
11. Мозговой Д.К. Геоинформационные веб-сервисы EOS DA / Д.К. Мозговой, В.В. Васильев, М.В. Черненко // *Междунар. науч.-практ. форум «Наука и бизнес»*. — 1 июля 2016 года, Днепр. — С. 54–61.
12. Мозговой Д.К. Мониторинг природных и антропогенных процессов с помощью веб-сервиса Landsat Viewer / Д.К. Мозговой, В.В. Васильев // *Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка*. — 2016. — Вип. 13. — Т. 24. — № 4. — С. 95–101.

Поступила 02.04.2018

## ОЦІНЮВАННЯ ЙМОВІРНОСТІ БАНКРУТСТВА ПІДПРИЄМСТВ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИСКРИМІНАНТНОГО АНАЛІЗУ ТА НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

О.Л. ТИМОЩУК, К.М. ДОРУНДЯК

**Анотація.** Досліджено моделі дискримінантного аналізу та штучних нейронних мереж для прогнозування й обчислення ймовірності банкрутства підприємств. Проаналізовано визначення та сутність терміна «банкрутство», основні причини кризового фінансового стану підприємств України та статистичні дані, які відображають динаміку банкрутств українських підприємств протягом 1999–2017 рр. Розроблено модель штучної нейронної мережі типу перцептрон та проведено компаративний аналіз з моделями вітчизняних економістів на прикладі аналізу фінансового стану декількох відомих українських підприємств. Оцінено переваги та проблеми застосування розглянутих моделей, а також їх практичну значущість у сучасних умовах господарювання.

**Ключові слова:** підприємство, прогнозування, ймовірність банкрутства, дискримінантний аналіз, нейронна мережа.

### ВСТУП

Зростаючий рівень банкрутств українських підприємств підвищує вимоги до точності методів прогнозування ймовірності банкрутства. Наявність достовірних методик оцінювання фінансового стану українських підприємств важлива з погляду інвестиційної привабливості України, оскільки велика кількість непрогнозованих банкрутств підвищує фінансові ризики для зарубіжних інвесторів.

Бажання попереджати банкрутство заздалегідь, на етапах його зародження, спричинило появу великої кількості методик та моделей, за допомогою яких можна оцінити фінансовий стан організацій та підприємств [1–3]. Проте залежно від конкретної моделі прогнозування банкрутства є недоліки моделей як зарубіжних, так і вітчизняних авторів. По-перше, у деяких моделях не відображається значна частина коефіцієнтів фінансового стану підприємств, по-друге, в Україні немає великої кількості підприємств на фондовому ринку, що ускладнює або виключає варіанти розрахунків за багатьма моделями.

**Мета роботи** — аналіз основних методів обчислення ймовірності банкрутства та оцінювання перспектив їх застосування в українській практиці, визначення переваг, недоліків та практичної значущості розглянутих моделей у сучасних умовах господарювання; розроблення моделі нейронної мережі та проведення порівняльного аналізу за моделями вітчизняних економістів.

## **СУТНІСТЬ БАНКРУТСТВА**

У сучасному визначенні банкрутства [4] наявні деякі особливості, наприклад, установлення винятково через господарський суд самого факту банкрутства. Тобто фінансова збитковість підприємства та його нездатність задовольняти вимоги кредиторів не дорівнюють банкрутству доти, доки факт банкрутства не буде вирішений через господарський суд. Важливо відзначити, що з цього визначення банкрутством вважається нездатність відновлення платоспроможності. Але сам термін «платоспроможність» у законодавстві не визначений, проте він може бути трактований як протилежність до «неплатоспроможності».

Виділяють шість основних показників, які можуть призвести до кризового фінансового стану підприємства [5]:

- 1) призупинення поточних платежів і невиплати поставлених вимог;
- 2) падіння обсягів діяльності, низька заробітна плата або її невиплата, скорочений робочий день, конфлікти з керівництвом;
- 3) негативні зміни у фінансовій звітності, порушення їх характерної пропорційності;
- 4) наявність простроченої дебіторської та кредиторської заборгованості;
- 5) відсутність прибутку, зменшення попиту та збитковість;
- 6) наявність недоплат до бюджету і прострочена заборгованість податковим та фінансовим органам.

Проте найважливішим показником банкрутства вважається призупинення поточних платежів боржника і невиплати відповідно до поставлених вимог, оскільки саме невчасне погашення або взагалі несплата платежів дає право кредиторам відкрити арбітражне провадження у справі про порушення банкрутства.

Відсутність науково-доведеної класифікації причин кризового стану підприємства є вагомим недоліком оцінювання ймовірності настання банкрутства, адже саме за допомогою факторів, які впливають на підприємство, можна визначити підхід до управління компанією надалі, розраховувати напрям подальшого розвитку й одразу виявляти згаяння та помилки у здійсненні управління.

Питання банкрутств підприємств в Україні є актуальним через кризовий стан економіки країни. Щоб оцінити масштаби кризи, проаналізуємо статистику розгляду господарськими судами справ про банкрутство за 1999–2017 рр. (табл. 1).

Найбільшу кількість підприємств визнано банкрутом у 2007 р. – 4359 підприємств та у 2011 р. – 4086 (у кризові періоди). Найбільше ліквідовано підприємств у 2001 р. – 1811; найбільше порушено справ про банкрутство у 1999 р. для 6927 підприємств (у період перебудови). Таким чином, зростання кількості банкрутних підприємств порівняно з попереднім періодом свідчить про кризові умови розвитку економіки України, спричинені політичною, соціальною та економічною нестабільністю [6].

**Таблиця 1.** Статистика банкрутства українських підприємств за період 1999–2017 рр.

Роки	Статус підприємства			
	Визнано банкрутом	Ліквідовано	Порушено справу про банкрутство	Порушено справу про банкрутство та відкрито санацію
1999	11	404	6932	1
2000	229	1432	3101	6
2001	792	1811	837	9
2002	1260	1655	759	10
2003	1966	1399	811	15
2004	2839	1380	804	10
2005	2971	639	544	7
2006	3806	382	508	11
2007	4359	347	357	10
2008	3974	242	255	11
2009	3495	236	244	41
2010	3614	306	250	20
2011	4086	285	255	21
2012	3289	247	192	16
2013	2964	212	239	25
2014	2238	12	387	7
2015	2985	171	831	2
2016	2671	151	475	2
2017 (I півріччя)	712	–	242	–

На підставі розглянутої статистики можна відобразити динаміку зміни кількості банкрутств та порушених справ про банкрутство підприємств України (рис. 1).

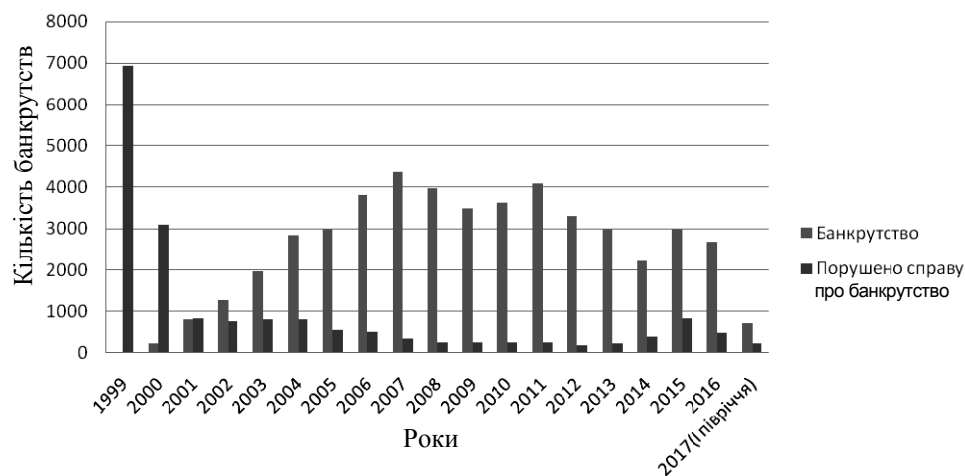


Рис. 1. Динаміка банкрутства українських підприємств за період 1999–2017 рр.



## ДИСКРИМІНАНТНІ МОДЕЛІ ВІТЧИЗНЯНИХ ЕКОНОМІСТІВ

Існує багато моделей та методів прогнозування банкрутства, що дозволяють оцінювати і діагностувати ступінь платоспроможності підприємства чи установи. Дискримінантний аналіз є методом багатовимірною статистичного аналізу, що належить до теорії розпізнавання образів. Натепер дискримінантні методи набули широкого застосування для побудови економіко-математичних моделей прогнозування банкрутства.

Однією з найбільш відомих дискримінантних моделей є універсальна дискримінантна модель українського дослідника О. Терещенка [7]:

$$Z = 1,5K_1 + 0,08K_2 + 10K_3 + 5K_4 + 0,3K_5 + 0,1K_6.$$

Описання змінних наведено в табл. 2.

**Таблиця 2.** Опис коефіцієнтів моделі Терещенка

Позначення	Коефіцієнт	Розрахунок
$K_1$	Відношення коштів до залученого капіталу	Гроші та їх еквіваленти / (Довгострокові зобов'язання + Поточні зобов'язання)
$K_2$	Відношення валюти балансу до залученого капіталу	Баланс / (Довгострокові зобов'язання + Поточні зобов'язання)
$K_3$	Відношення балансового прибутку до валюти балансу	Чистий прибуток(збиток) / Баланс
$K_4$	Відношення балансового прибутку до виручки від реалізації продукції	Чистий прибуток (збиток) / Чистий дохід від реалізації
$K_5$	Відношення виробничих запасів до виручки від реалізації продукції	Виробничі запаси / Чистий дохід від реалізації
$K_6$	Оборотності основного капіталу	Чистий дохід від реалізації / (Довгострокові зобов'язання + Необоротні активи)

Якщо  $Z > 2$ , підприємству банкрутство не загрожує; якщо  $1 < Z < 2$ , фінансова стійкість підприємства порушена; проте якщо своєчасно запровадити антикризові заходи, банкрутство не загрожуватиме; якщо  $0 < Z < 1$ , існує загроза банкрутства за відсутності заходів щодо санації; якщо  $Z < 0$ , підприємство вже майже збанкрутіло.

Переваги моделі: простота розрахунків, урахування галузевих особливостей підприємств, використовує різноманітні модифікації базової моделі до підприємств різних видів діяльності для визначення критичних значень показників як індикатора ймовірності банкрутства підприємства конкретної галузі [7]. Проте вона не позбавлена недоліків, оскільки дані прогнозу є суб'єктивними, що може впливати на точність оцінки. Крім того, модель націлена на універсальність більше, аніж на практичну ефективність.

Моделлю прогнозування оберемо модель Матвійчука [2] — одну з найпопулярніших моделей прогнозування банкрутства українських підприємств.

Матвійчуком запропоновано таку модель оцінки:

$$Z = 0,033X_1 + 0,268X_2 + 0,045X_3 - 0,018X_4 - 0,004X_5 - 0,015X_6 + 0,702X_7$$

Описання змінних наведено в табл. 3.

**Таблиця 3.** Опис коефіцієнтів моделі Матвійчука

Позначення	Коефіцієнт	Розрахунок
$X_1$	Мобільності активів	Оборотні активи / Необоротні активи
$X_2$	Оборотності кредиторської заборгованості	Чистий дохід від реалізації / Поточні зобов'язання
$X_3$	Оборотності власного капіталу	Чистий дохід від реалізації / Власний капітал
$X_4$	Окупності активів	Баланс / Чистий дохід від реалізації
$X_5$	Забезпеченості власними оборотними засобами	(Оборотні активи — Поточні зобов'язання) / Оборотної активи
$X_6$	Концентрації залученого капіталу	(Довгострокові зобов'язання + Поточні зобов'язання) / Баланс
$X_7$	Покриття боргів власним капіталом	Власний капітал / (Забезпечення наступних витрат і платежів + Довгострокові зобов'язання + Поточні зобов'язання)

Залежно від значення  $Z$  прогнозується така ймовірність банкрутства: якщо під час оцінювання фінансового стану підприємства отримано значення  $Z > 1,104$ , то це свідчить про задовільний фінансовий стан та низьку ймовірність банкрутства. Зі збільшенням значення  $Z$  підвищується стійкість стану компанії. За значення  $Z \leq 1,104$  виникає загроза фінансової кризи. Відповідно зі зменшенням  $Z$  росте загроза банкрутства аналізованого підприємства [2].

Перевагами такого підходу є значно вища точність діагностування банкрутства підприємства порівняно з іншими моделями. Серед недоліків варто відзначити виділення лише двох класів стану компанії, але з використанням дискримінантної моделі цього недостатньо для оцінювання реального фінансового положення.

### ПОБУДОВА МОДЕЛІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖИ

Для прогнозування банкрутства існує підхід, який ґрунтується на використанні штучних нейронних мереж, що були створені для відтворення і моделювання структури мозку та здатності біологічних нервових систем навчатися і виправляти помилки. Кожен нейрон подібної мережі взаємодіє лише із сигналами, які він періодично отримує, і сигналами, які він періодично надсилає іншим. Таким чином, генерується та виводиться результат (банкрут чи не банкрут).

Для навчання нейронних мереж застосовують алгоритми двох типів: кероване (навчання з учителем) і некероване (навчання без вчителя). Найчастіше застосовується навчання з учителем.

Більшість учених, які досліджували проблему прогнозування банкрутства, доходили висновку, що нейронні мережі більш точні, аніж класичні статистичні підходи [2].

Перевагами штучних нейронних мереж є здатність до навчання без припущень щодо функціональної залежності змінних. Особливістю нейронної мережі є те, що вона виглядає як «чорний ящик», тому отримати в явному вигляді знання проблематично. Іншим недоліком штучних нейронних мереж є складність процесу створення і оптимізації топології нейронної мережі.

Побудуємо штучну нейронну мережу типу перцептрон (рис. 2), який обчислює вихідні змінні через послідовне нелінійне перетворення у нейронах вхідного шару, зважених ваговими коефіцієнтами міжнейронних зв'язків.

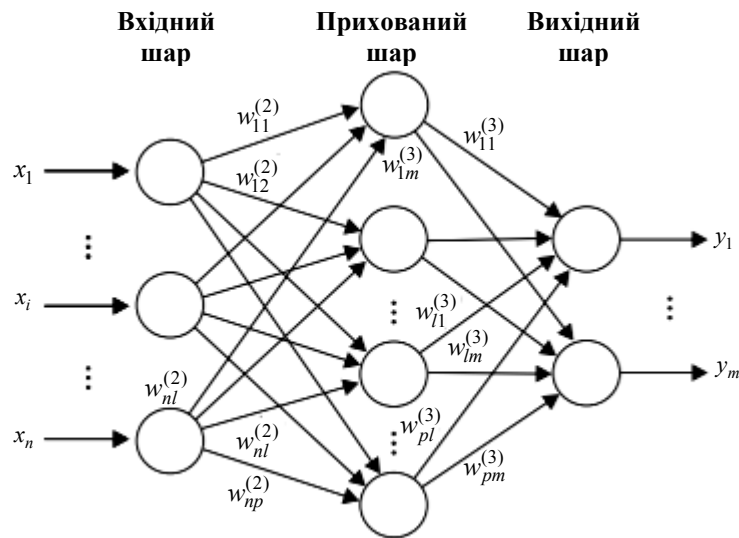


Рис. 2. Структура нейронної мережі типу перцептрон

Важливо визначити незалежні та залежні показники, які будуть використані для побудови моделі нейронної мережі. Як вхідні дані обрано такі фінансові показники: коефіцієнт трансформації (оборотності активів), коефіцієнт рентабельності активів, коефіцієнт швидкої ліквідності, коефіцієнт фінансової незалежності, частка оборотних виробничих фондів в обігових коштах. Залежною змінною буде клас кризового стану, визначений на основі фінансового стану компанії. На ймовірність настання банкрутства вказуватимуть такі значення вихідних змінних: 1 — підприємству нічого не загрожує, оскільки воно фінансово стійке; 2 — наявні певні фінансові труднощі, існує невелика ймовірність настання банкрутства; 3 — підприємство має високий рівень ризику стати банкрутом.

Для побудови та навчання нейронної мережі обрано мову програмування Python з використанням бібліотеки scikit-learn та функції MLPClassifier.

Навчальна вибірка складається із 43 спостережень підприємств різних галузей (зокрема, Публічне акціонерне товариство (ПАТ) «Світоч», Приват-

не акціонерне товариство (ПАТ) «Росинка» тощо), які мають різний фінансовий стан, з метою їх класифікації до різних кризових категорій. Вихідні класи кризи визначено на основі методики Міністерства фінансів України; 18 спостережень належало до першого класу, 10 — до другого і 15 — до третього.

Точність нейронної мережі на навчальній вибірці становила 97,7%, що свідчить про задовільний результат. Матрицю помилок наведено у табл. 4.

**Таблиця 4.** Матриця помилок моделі нейронної мережі

Клас кризи	1	2	3
1	18	0	0
2	1	9	0
3	0	0	15

Із таблиці видно, що лише один раз підприємство, що належало до другого класу, нейронною мережею віднесено до першого.

Звіт про класифікацію наведено у табл. 5.

**Таблиця 5.** Звіт про класифікацію моделі нейронної мережі

Значення вихідних змінних	Precision	Recall	F1-score	Кількість входів кожного класу
1	0,95	1,00	0,97	18
2	1,00	0,90	0,95	10
3	1,00	1,00	1,00	15
Середнє/усього	0,98	0,98	0,98	43

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ РОЗГЛЯНУТИХ МОДЕЛЕЙ

Для перевірки точності та якості моделі обрано два підприємства — Публічне акціонерне товариство (ПАТ) «Оболонь» та Публічне акціонерне товариство (ПАТ) «АВК», що досі функціонують і дані яких є достатньо інформативними. Для аналізу відібрано дані з фінансової звітності за 2011–2016 рр. з бази даних smida.gov.ua.

**Таблиця 6.** Результати застосування моделі Терещенка для ПАТ «Оболонь» (2011–2016 рр.)

ПАТ «Оболонь»	Відношення коштів до залученого капіталу						Модель Терещенка
2011	0,030466	1,370155	0,034853	0,025993	0,124459	1,623261	0,155311
2012	0,05521	1,442753	0,062262	0,046052	0,12932	1,568265	0,198236
2013	0,096199	1,565798	0,053338	0,047925	0,145671	1,331244	0,269563
2014	0,067411	1,173528	-0,18134	-0,19216	0,195766	1,134369	0,194998
2015	0,013601	1,010494	-0,12467	-0,12543	0,255258	1,755658	0,101242
2016	0,002921	1,400502	-0,03917	-0,05042	0,209723	1,044698	0,116421

Аналізуючи результати моделі Терещенка (табл. 6), можна зробити висновки, що всі значення  $Z$  становлять  $0 < Z < 1$ , тобто згідно з моделлю Терещенка існує загроза банкрутства за відсутності заходів щодо санації, причому значення  $Z$  у 2011 р. було меншим, ніж у 2014 р. Це свідчить про те, що за моделлю Терещенка підприємство було більш збитковим у 2011 р., ніж у 2014 р. Результати цієї моделі не можна вважати надійними, адже за даними фінансової звітності у 2011–2013 рр. підприємство було прибутковим і рентабельним, а отже, далеким від загрози банкрутства.

За даними моделі Матвійчука (табл. 7), якщо за результатами оцінювання фінансового стану значення  $Z \leq 1,104$ , то виникає загроза фінансової кризи. Порівняно з результатами моделі Терещенка за 2011–2013 рр. діяльності ПАТ «Оболонь» модель Матвійчука також оцінила як непродуктивний, але з меншою ймовірністю банкрутства, ніж визначено за даними моделі Терещенка. При цьому значення  $Z$  з роками тільки зменшувалась, що свідчить про неплатоспроможність підприємства після 2014 р.

**Таблиця 7.** Результати застосування моделі Матвійчука для ПАТ «Оболонь» (2011–2016 рр.)

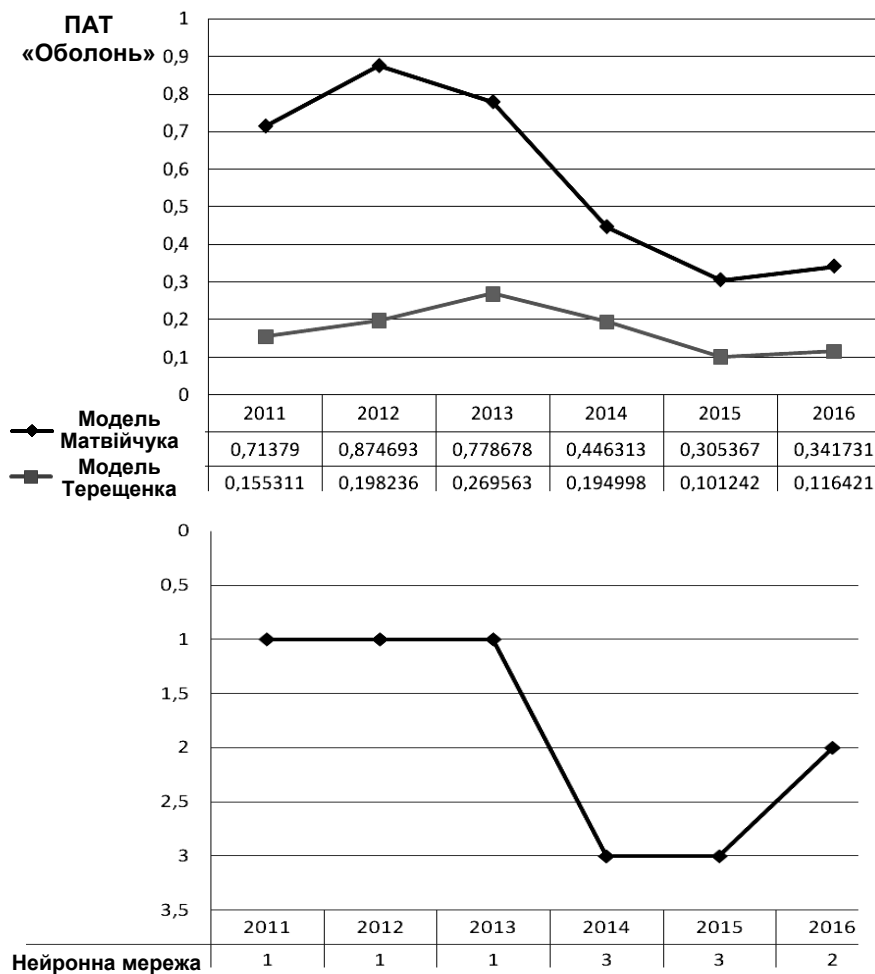
ПАТ «Оболонь»	Коефіцієнти							Модель Матвійчука
	мобільності активів	оборотності кредиторської заборгованості	оборотності власного капіталу	окупності активів	забезпеченості власними оборотними засобами	концентрації залученого капіталу	покриття боргів власним капіталом	
2011	0,625988	2,586316	4,963218	0,7458	-0,3475	0,729844	0,370155	0,71379
2012	0,682054	3,179795	4,405577	0,739653	-0,0492	0,69312	0,442753	0,874693
2013	0,689408	2,820626	3,07994	0,898529	0,033102	0,638652	0,565798	0,778678
2014	0,728072	1,575698	6,381959	1,059669	-0,42149	0,852132	0,173528	0,446313
2015	0,858557	1,033712	95,70678	1,006093	-1,08147	0,989615	0,010494	0,305367
2016	0,493616	1,214336	2,716934	1,287063	-0,93603	0,71403	0,400502	0,341731

Аналізуючи результати табл. 8, можна помітити, що у 2011–2013 рр. ПАТ «Оболонь» нічого не загрожувало, але у 2014 р. платоспроможність та показники різко знизилися. Таке явище може бути наслідком економічної кризи 2014 р., яка була причиною банкрутств багатьох підприємств. Це наочний приклад того, як зовнішні причини банкрутства, зокрема економічна ситуація у країні, впливають на діяльність та показники компанії. Варто зазначити, що до 2016 р. підприємство вживало заходи для свого збереження на ринку, що сприяло підвищенню показників і вже за два роки воно мало другу категорію кризового стану, що може свідчити про правильний вибір напряму розвитку. Можна зробити висновок, що порівняно з моделями Матвійчука та Терещенка модель нейронної мережі дає змогу більш детально аналізувати ситуацію на підприємстві і незначні фінансові труднощі не вважаються значною загрозою банкрутства.

**Таблиця 8.** Результати застосування моделі нейронної мережі для ПАТ «Оболонь» (2011–2016 рр)

ПАТ «Оболонь»	Частка оборотних виробничих фондів в обігових коштах	Коефіцієнти				Клас кризи
		швидкої ліквідності	трансформації	рентабельності	фінансової незалежності	
2011	0,475823	0,420224	1,39196	0,036181	0,270156	1
2012	0,472029	0,541896	1,389799	0,064004	0,30688	1
2013	0,437375	0,522132	1,123053	0,053823	0,361348	1
2014	0,458493	0,33968	0,87594	-0,16832	0,147868	3
2015	0,570253	0,189191	0,999887	-0,12541	0,010385	3
2016	0,519026	0,217981	0,922396	-0,04651	0,28597	2

Графіки порівняння значень результатів трьох розглянутих моделей зображено на рис. 3.



*Рис. 3.* Результати застосування моделей нейронної мережі, Матвійчука та Терещенка для ПАТ «Оболонь»

Як видно з табл. 9 значення  $Z$  моделі Терещенка для ПАТ «АВК» за весь період дуже низьке. Наприклад, значення за 2011 р. менше, ніж за 2013 р., хоча фінансові показники не перевищували нормативні значення, а отже, підприємство не мало значних фінансових криз. Із трьох розглянутих моделей модель Терещенка має найменшу точність, тому її результати можуть бути ненадійними. У розглянутих прикладах вона досить точно розпізнає збиткові показники, при цьому заносючи до класу банкрутів і досить рентабельні значення, що свідчить про певні недоліки щодо точності. Модель існує вже 15 років і її дані можуть не відображати зміни показників в сучасній економіці України.

**Таблиця 9.** Результати застосування моделі Терещенка для ПАТ «АВК» (2011–2016 рр.)

ПАТ «АВК»	Відношення коштів до залученого капіталу						Модель Терещенка
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
2011	0,01905	1,449544	0,043405	0,02594	0,05515	1,748639	0,144539
2012	0,028475	1,499818	0,071062	0,048404	0,060053	1,92334	0,162698
2013	0,029725	1,551554	0,055611	0,053348	0,077644	1,513131	0,168712
2014	0,032541	0,970613	-0,39646	-0,40578	0,076358	1,156225	0,12646
2015	0,000719	0,646951	-0,51357	-6,93602	0,445227	0,046814	0,052835
2016	0,000122	0,543383	-0,30476	-74,3625	7,108588	0,00241	0,043653

Результати застосування моделі Матвійчука для ПАТ «АВК» за період 2011–2012 рр. протилежні — підприємство перебувало у задовільному фінансовому стані, що більше відповідає реальній фінансовій ситуації на підприємстві (табл. 10). У 2013 р. значення  $Z$  становило 0,81, що свідчить про фінансові труднощі на підприємстві, а у 2015–2016 рр. значення майже дорівнювало 0, що вказує на швидке банкрутство компанії та невтішні прогнози для майбутньої діяльності.

**Таблиця 10.** Результати застосування моделі Матвійчука для ПАТ «АВК» (2011–2016 рр.)

ПАТ «АВК»	Коефіцієнти							Модель Матвійчука
	мобільності активів	оборотності кредиторської заборгованості	оборотності власного капіталу	окупності активів	забезпеченості власними оборотними засобами	концентрації залученого капіталу	покриття боргів власним капіталом	
2011	1,120991	8,187585	5,395452	0,597628	0,613258	0,689872	0,449544	2,231266
2012	1,545685	4,956067	4,405379	0,681151	0,512086	0,666748	0,499818	1,379234
2013	1,453202	2,869892	2,9324	0,959303	0,386823	0,644515	0,551554	0,817087
2014	1,389575	1,61824	-32,2691	1,023522	-0,03824	1,030277	-0,02939	0,479544
2015	0,113829	0,085911	-0,13568	13,50561	-7,43342	1,545711	-0,35305	0,02678
2016	0,061952	0,003791	-0,00488	244,0008	-17,5322	1,840322	-0,45662	0,00306

Аналізуючи результати табл. 11, можна помітити, що у 2011–2012 рр. ПАТ «АВК» мало задовільну фінансову стійкість, але у 2013 р. почали

з'являтися проблеми із показниками діяльності компанії. У 2014 р. підприємство не поліпшило ситуації та перейшло до третьої категорії кризового стану — збиткові підприємства. Таке явище також може бути наслідком економічної кризи 2014 р. Але на відміну від ПАТ «Оболонь» показники не вирівнялися, а тільки погіршувалися. Коефіцієнт фінансової незалежності становив -0,84 за нормативного значення 0,4, що свідчить про те, що невдовзі підприємство майже напевне стане банкрутом.

**Таблиця 11.** Результати застосування моделі нейронної мережі для ПАТ «АВК» (2011–2016 рр.)

ПАТ «АВК»	Частка оборотних виробничих фондів в обігових коштах	Коефіцієнт				Клас кризи
		швидкої ліквідності	трансформації	рентабельності	фінансової незалежності	
2011	0,179944	2,134159	1,750671	0,045413	0,310128	1
2012	0,148621	1,751913	1,591074	0,077015	0,333252	1
2013	0,139987	1,236694	1,155168	0,061626	0,355485	2
2014	0,128291	0,750127	0,962519	-0,39057	-0,03028	3
2015	0,322578	0,066182	0,071835	-0,49825	-0,54571	3
2016	0,499395	0,01616	0,004137	-0,30762	-0,84032	3

Варто зазначити, що модель нейронної мережі для двох розглянутих підприємств дала точніші результати, аніж моделі Матвійчука і Терещенка. Модель Матвійчука характеризується досить високою точністю, але має недоліки з віднесенням підприємства лише до двох категорій — банкрут і не банкрут. Модель Терещенка має недоліки щодо точності; вона правильно розпізнає лише збиткові підприємства, які мають значні фінансові труднощі, але при цьому відносить до банкрутних і ті, які ще перебувають у задовільному стані.

Графіки порівняння значень результатів трьох розглянутих моделей зображено на рис. 4.

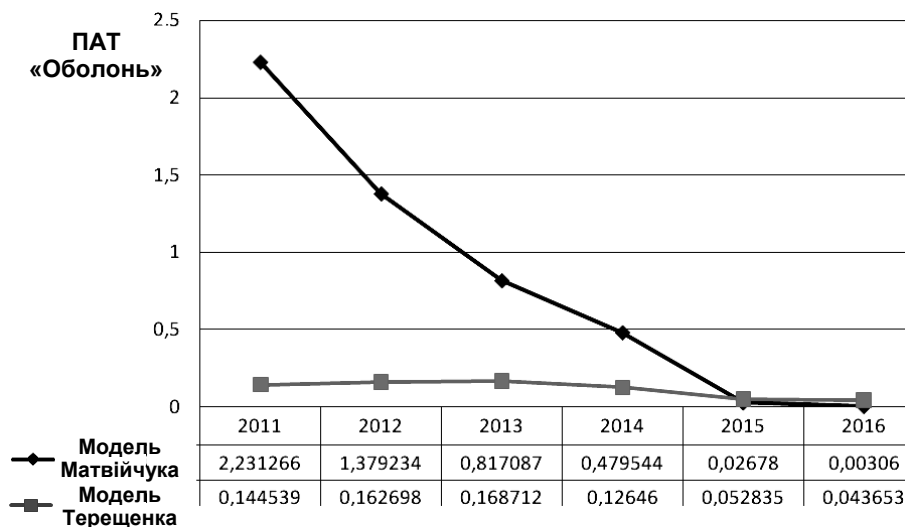


Рис. 4. Результати моделі нейронної мережі, Матвійчука та Терещенка для ПАТ «АВК» (Див. також. с. 33)



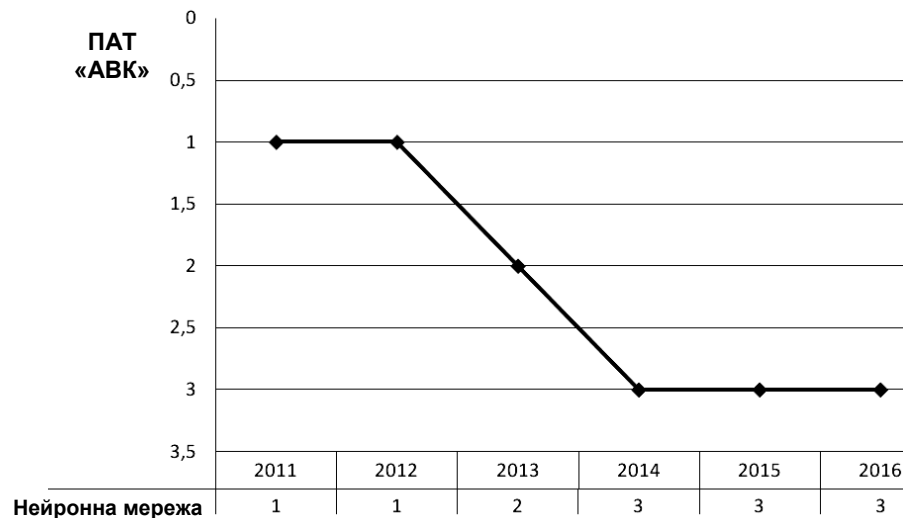


Рис. 4. Закінчення

## ВИСНОВКИ

Проведено порівняльний аналіз дискримінантних моделей Матвійчука та Терещенка з розробленою моделлю штучної нейронної мережі.

Підхід, оснований на використанні штучної нейронної мережі, порівняно з дискримінантними моделями показав вищу точність оцінок ймовірності банкрутства та здатність виявляти приховані залежності між основними фінансовими показниками. Нейронні мережі здатні виявити латентні форми кризи підприємства та сприяти підвищенню достовірності прогнозування, що підтверджено на прикладі аналізу фінансового стану декількох українських підприємств.

Розроблена модель нейронної мережі дозволила більш детально проаналізувати фінансовий стан підприємства, відносячи його до однієї із трьох категорій кризового стану. Точність моделі становила 97,7%, що є свідченням високої достовірності прогнозування.

Необхідно продовжити розроблення зі створення моделей, за допомогою яких в оцінюванні фінансового стану показників українських підприємств враховується більша кількість фінансових показників та специфіка різних галузей виробництва.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Тридід О.М. Економіко-математичні моделі оцінки фінансового стану суб'єктів господарювання: моногр. / О.М. Тридід, О.Г. Тижненко, Л.О. Тижненко. — К.: УБС НБУ, 2011. — 213 с.
2. Матвійчук А.В. Нечіткі, нейромережеві та дискримінантні моделі діагностування можливості банкрутства підприємств / А.В. Матвійчук // Нейронечіткі технології моделювання в економіці. — 2013. — № 2. — С. 71–118.

3. *Бідюк П.І.* Аналіз ризику банкрутства підприємств з використанням чітких та нечітких моделей / П.І. Бідюк, В.В. Вертелецький, А.О. Жирова // Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». — 2015. — № 12. — С. 477–490.
4. *Закон України* «Про відновлення платоспроможності боржника або визнання його банкрутом» від 14 травня 1992 року №2343-ХІІ // Відомості Верховної Ради України. — 1992. — № 31. — 440 с.
5. *Іванілов О.С.* Економіка підприємства: підруч. / О.С. Іванілов. — К.: Центр учбової літ-ри, 2009. — 728 с.
6. *Троц І.В.* Система попередження та економічні напрями запобігання банкрутству підприємств: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня. канд. екон. наук: спец. 08.00.04 «Економіка та управління підприємствами (за видами економічної діяльності)» / І.В. Троц. — Хмельн.: Хмельницький нац. ун-т, 2016. — 21 с.
7. *Терещенко О.О.* Фінансова санація та банкрутство підприємств: навч. посіб. / О.О. Терещенко. — К.: КНЕУ, 2009. — 412 с.

*Надійшла 19.03.2018*

## BIG DATA ANALYSIS VIA MODEL REDUCTION METHODS

STANISLAV ZABIELIN

**Abstract.** The enormous growth in the size of data has been observed in recent years being a key factor of the Big Data scenario. Big Data require a new high-performance processing. The use of big data preprocessing methods for data mining in big data is reviewed in this paper. The definition, attributes and categorization of data preprocessing approaches in big data are introduced. The relation between big data and data preprocessing throughout all families of methods and advanced data technologies are likewise analyzed. Furthermore, research challenges are discussed, while concentrating on improvements in certain families of data preprocessing methods and applications based on new big data learning paradigms.

**Keywords:** nonlinear mapping, dimension reduction, big data, modelling, non-linear dynamic objects, dimensional reduction, diffusion maps, kernel method of main components

### INTRODUCTION

Vast amounts of raw data are encompassing us in our world, information that can't be directly treated by humans or manual applications. Technologies as the Internet, engineering and science applications and networks, business services and much more create data in exponential development because of the development of powerful storage and connection tools. Organized knowledge and information can't be easily obtained because of this enormous data growth and neither one of its can be effectively understood or automatically extracted. These premises have prompted to the development of data science or data mining, a well-known discipline which is more and more present in the current world of the Information Age [1].

Nowadays, the current amount of data managed by systems all around the globe have surpassed the processing capacity of more traditional systems, and this applies to data mining as well. The arising of new technologies and services (like Cloud computing [9]) as well as the reduction in hardware price are leading to an ever-growing rate of information on the Internet. This phenomenon certainly represents a "Big" challenge for the data analytics community. Big Data can be thus defined as very high volume, velocity and variety of data that require a new high-performance processing [10].

Distributed computing has been widely used by data scientists before the advent of Big Data phenomenon. Many standard and time-consuming algorithms were replaced by their distributed versions with the aim of agilizing the learning process. However, for most of the current massive problems, a distributed approach becomes mandatory nowadays since no centralized architecture that is able to tackle these huge problems [12].

Nonlinear dimensionality reduction (NLDR) is an attractive topic in many scientific fields. The task of NLDR is to recover the latent low-dimensional structures hidden in high dimensional data. In many areas of artificial intelligence and data mining, the encountered high-dimensional data are intrinsically distributed on a smooth, low-dimensional manifold [8].

The NLDR problem on such data is specifically called “manifold learning” problem [13]. In recent years, there have emerged many manifold learning approaches which are applied to many real-world application problems (e.g., hyperspectral imaging classification and object tracking), aiming at discovering the intrinsic geometric representations of the nonlinear data manifolds. Based on the intrinsic construction principles, these approaches can be divided into two categories: global and local approaches. Global approaches, such as Isomap and CDA, attempt to preserve geometry at both local and global scales, essentially constructing entire isometric correspondences between all datapairs in the original and latent spaces [14]. Local approaches, such as LLE and Laplacian eigenmaps, attempt to preserve the local geometry of the data, intrinsically keeping invariance between all local areas in the original and latent spaces [13].

## PROBLEM

Suppose the data consist of  $N$  real-valued vectors  $X_i$ , each of dimensionality  $D$ , sampled from some underlying manifold. Provided there is sufficient data (such that the manifold is well-sampled), we expect each data point and its neighbors to lie on or close to a locally linear patch of the manifold. We characterize the local geometry of these patches by linear coefficients that reconstruct each data point from its neighbors. Reconstruction errors are measured by the cost function:

$$\varepsilon(W) = \sum_i \left| X_i - \sum_j W_{ij} X_j \right|^2.$$

Which adds up the squared distances between all the data points and their reconstructions. The weights  $W_{ij}$  summarize the contribution of the  $j$ th data point to the  $i$ th reconstruction. To compute the weights  $W_{ij}$ , we minimize the cost function subject to two constraints: first, that each data point  $X_i$  is reconstructed only from its neighbors, enforcing  $W_{ij} = 0$ , if  $X_j$  does not belong to the set of neighbors of  $X_i$ ; second, that the rows of the weight matrix sum to one:  $\sum_j W_{ij} = 1$ .

Suppose the data lie on or near a smooth nonlinear manifold of lower dimensionality  $d \ll D$ . To a good approximation then, there exists a linear mapping—consisting of a translation, rotation, and rescaling—that maps the high-dimensional coordinates of each neighborhood to global internal coordinates on the manifold. By design, the reconstruction weights  $W_{ij}$  reflect intrinsic geometric properties of the data that are invariant to exactly such transformations. We therefore expect their characterization of local geometry in the original data space to be equally valid for local patches on the manifold. In particular, the same weights  $W_{ij}$  that

reconstruct the  $i$ th data point in  $D$  dimensions should also reconstruct its embedded manifold coordinates in  $d$  dimensions.

## **DISTANCE PRESERVATION**

This part discusses methods that reduce the dimensionality of data using the distance preservation criterion. Ideally, saving the pairwise distances measured in the dataset ensures that the low-dimensional nesting inherits the basic geometric properties of the data, such as the global shape or local neighborhood relations. Unfortunately, in the nonlinear case the distances cannot be completely preserved. We will discuss various methods that try to overcome this difficulty. These methods use different types of distances; they also rely on various algorithms or optimization procedures to determine the nesting [15].

### **Multidimensional scaling**

The term multidimensional scaling (MDS) actually hides a family of methods, rather than one clearly defined procedure. Scaling refers to methods that build a configuration of points in the target metric space from information about intermediate distances, and MDS scales when the target space is Euclidean [7].

The optimization method is exact and purely algebraic: the optimal solution is obtained in a closed form. Metric MDS is also called the spectral method, since the kernel operation in its procedure is the EVD of the Gram matrix. The model is continuous and strictly linear. The mapping is implicit.

MDS is simple, durable, but strictly linear. But the metric MDS is flexible: it takes coordinates, as well as scalar products or Euclidean distances. On the other hand, the MDS metric requires memory to store the  $N$ -by- $N$  Gram matrix. Another limitation is the generalization to new data points, which includes an approximate formula for the double centering phase [16].

### **Sammon's nonlinear mapping**

In 1969, Sammon proposed a method for establishing a mapping between a high-order space and a lower one. The model is nonlinear and discrete, creating an explicit mapping [6].

NLM Sammon uses an approximate optimization procedure that can get stuck at a local minimum. The method does not include an estimate of its own dimension; the dimension size is actually fixed by the user. Incremental or layered attachments are not possible: the method must be run separately for each given dimension [11].

Compared to the classical MDS metric, NLM can efficiently handle nonlinear varieties, at least if they are not too complex. Among other non-linear versions of the metric MDS, the NLM remains relatively simple and elegant. As a major drawback, NLM does not have the ability to generalize mapping to new points.

Just like many other methods of preserving distance, NLM in its original version works with a full distance matrix, therefore, contains  $O(N^2)$  records. This can be an obstacle when embedding very large data sets. Another drawback of NLM is its optimization procedure, which can be slow and/or inefficient for

some data sets. In particular, the function of the stress of Sammon is not guaranteed concave; therefore, the optimization process may depend on the local minimum.

**Graph distances.** In short, these methods try to overcome some of the shortcomings of spatial metrics, such as Euclidean distance. The next subsection presents both geodetic and graphical distances, explains how they relate to one another, and motivates their use in the context of diminishing dimensionality. The following subsections describe methods for reducing the non-linear dimension, which use graph distances.

### **Isomap**

Isomap is the simplest method of NLDR, which uses the distance of the graph as an approximation of the geodetic distance. Isomap is an autonomous batch method that works with precise algebraic optimization. Since Isomap operates as a metric MDS, decomposing the Gram matrix into eigenvalues and eigenvectors is often qualified as a spectral method. In the literature, Isomap is described without preliminary processing of data, such as vector quantization [5]. The isomap relies on a nonlinear model. In fact, if the Euclidean distance can be considered as a "linear" metric, then the Isomap's ability to embed nonlinear varieties arises only because of the use of the distance of the graph [17]; Other parts of the method, such as the basic model of the optimization procedure, are based on the classical metric MDS and remain purely linear. Therefore, the Isomap data model is hybrid: the geodetic distance approximation along the face distances is discrete, whereas the subsequent MDS-like step can be considered continuous [18].

Isomap extends metric MDS in a very elegant way. However, the data model of Isomap, which relies on developable manifolds, still remains too rigid. Indeed, when the manifold to be embedded is not developable, Isomap yields disappointing results. In this case, the guarantee of determining a global error does not really matter.

Another problem encountered when running Isomap is the practical computation of the geodesic distances. The approximations given by the graph distances may be very rough, and their quality depends on both the data (number of points, noise) and the method parameters.

## **TOPOLOGY PRESERVATION**

This part discusses methods that reduce dimensionality while preserving the data topology, rather than their pairwise distances. Preservation of topology seems more powerful, but more difficult to implement than keeping distance. The methods described are divided into two classes, depending on the type of topology used. The simplest methods are based on a predefined topology, whereas more modern methods prefer a topology built in accordance with a set of data that will be re-embedded.

### **Self-Organizing Maps**

Along with multilayer perceptron (MLP), the self-organizing map is perhaps the most widely known method in the field of artificial neural networks. The SOM is

basically a vector quantization method. This means that vector quantization is mandatory in the SOM. As for the reduction in dimension, SOM models the data in a nonlinear and discrete way, representing it with a deformed lattice [4].

SOM is a neural network with learning without a teacher, performing the tasks of visualization and clustering. The idea of the network was proposed by the Finnish scientist T. Kohonen.

Most of the time, SOMs are implemented by standalone algorithms, similar to the Robbins-Monro procedure. Online versions can be easily obtained. There is a so-called "batch" version of SOM: instead of updating the prototypes, one after another, they all move simultaneously at the end of each epoch, as in the standard gradient descents [19].

The wide success of the SOM can be explained by the following advantages. The method is very simple from an algorithmic point of view, and its main idea, once understood, is intuitively attractive. SOMs are reliable enough and work very well in many situations, such as visualization of tagged data.

Nevertheless, the SOM have some known shortcomings, especially when they are used to reduce the dimension. Most implementations process only one or two-dimensional lattices. Vector quantization is mandatory, which means that the SOM does not really embed data points: base coordinates are calculated only for prototypes. Moreover, the form of the embedding is identical to the lattice, which, in turn, is determined in advance, arbitrarily. This means that the SOM cannot capture the shape of the data cloud in a low-dimensional attachment. From a computational point of view, it is very difficult to assess the convergence of the SOM, since an explicit objective function or an error criterion has been optimized [20]. In fact, it is proved that such a criterion cannot be determined, with the exception of some very special cases.

### **Generative Topographic Mapping**

The generic topographic mapping (GTM) was put forward by Bishop, Swensen and Williams as a fundamental alternative to the SOM. In fact, GTM is a specific density network based on generative modeling, as indicated by its name. [3]

The essential difference between GTM and almost all the other methods is that the GTM is based on the Bayesian learning principle [21]. This probabilistic approach leads to another optimization method: instead of using (stochastic) gradient descent or spectral decomposition, the EM algorithm is used. As described above, GTM is a batch method, but there is also a version that works with the stochastic EM procedure. Since GTM defines the parameters of the generating model of the data, the diminution of the dimension is easily generalized to new points. Therefore, we can say that GTM defines an implicit mapping, although the hidden space is discrete.

If the implementation does not impose a two-dimensional grid, an external procedure is needed to evaluate the internal dimension of the data to determine the correct measurement for the hidden space.

Compared to SOM, GTM provides a generative data model. Moreover, the probabilistic approach that has come has a number of advantages. First, apart from finding the hidden coordinates  $x$  of the point  $y$ , GTM can also approximate  $p$

$(x | y)$ , that is, the probability that the attachment will be located in  $x$  coordinates in a hidden space. This allows us to identify problems in diminishing dimensionality when, for example, the probability distribution is not unimodal [3].

Secondly, from an algorithmic point of view, GTM optimizes a clearly defined objective function. GTM optimizes the probability of using the EM algorithm. In comparison with these classical optimization methods, EM is guaranteed to maximize the probability monotonically and converge to a maximum after several dozen iterations [22].

## CONCLUSIONS

Dimension reduction often plays an important role in the analysis, interpretation and understanding of numerical data. In practice, reducing the dimension can help to extract some information from arrays of numbers that would otherwise remain useless because of their large size. To a certain extent, the goal is to improve the readability of the data. This can be achieved by visualizing the data in diagrams, diagrams, graphs and other graphical representations.

An important motivation (NL) DR is the prevention of its harmful consequences. Paradoxically, however, many NLDR methods do not completely solve the problem, but only shy away from it. Many NLDR methods give poor results when the internal dimension of the underlying variety exceeds four or five. In such cases, the size of the embedding space becomes high enough to observe undesirable effects associated with the curse of dimension, for example, the phenomenon of empty space. The future will show whether new methods can solve this problem.

## REFERENCES

1. *Big Data prediction for 2013*. Blog by Mike Gualtieri. (n.d.) — Available at: [http://blogs.forrester.com/mike\\_gualtieri](http://blogs.forrester.com/mike_gualtieri)
2. *Big Data prediction for 2013*. Blog by Mike Gualtieri. (n.d.) — Available at: [http://blogs.forrester.com/mike\\_gualtieri](http://blogs.forrester.com/mike_gualtieri)
3. *Horvath D. Generative Topographic Mapping of Conformational Space* / D. Horvath, I. Baskin, G. Marcou, A. Varnek // *Molecular Informatics*. — 2017. — **36** (10). — P. 22.
4. *Kohonen T. Essentials of the self-organizing map* / T. Kohonen // *Neural Networks*. — 2013. — N 37. — P. 52–65.
5. *Wang L. The Isomap Algorithm and Topological Stability* / L. Wang // *Science*. — 2002. — **295** (5552). — P. 81.
6. *Lerner B. On pattern classification with Sammons nonlinear mapping an experimental study* / B. Lerner // *Pattern Recognition*. — 1998. — **31**(4). — P. 371–381.
7. *Young F. Multidimensional Scaling: History, Theory, and Applications* / B. Lerner // Psychology Press. — 2017. — N 11. — P. 13.
8. *Lee J. Nonlinear dimensionality reduction* / J. Lee, M. Verleysen // NY: Springer. — 2010. — 29. — P. 110.
9. *Marinescu D. Cloud Computing: Theory and Practice* / D. Marinescu // Elsevier Science & Technology Books. — 2017. — 2. — P. 66.



10. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. Egyptian Journal of Medical Human Genetics. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0268401214001066>
11. *Ewing R.* Visualization of expression clusters using Sammons non-linear mapping / R. Ewing R., J. Cherry // *Bioinformatics*. — 2001. — **17**(7). — P. 658–659.
12. *Dinh H.* A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches / H. Dinh // *Wireless Communications and Mobile Computing*. — 2011. — **13**(18). — P. 1587–1611.
13. *Wang Q.* Combining local and global information for nonlinear dimensionality reduction / Q. Wang, J. Li // *Neurocomputing*. — 2009. — **72**(10–12). — P. 2235–2241.
14. *You S.* Think locally, fit globally: Robust and fast 3D shape matching via adaptive algebraic fitting / S. You, D. Zhang // *Neurocomputing*. — 2017. — N 89. — P. 119–129.
15. *Lee J.* Nonlinear projection with curvilinear distances: Isomap versus curvilinear distance analysis / J. Lee J., A. Lendasse, M. Verleysen // *Neurocomputing*. — 2004. — N 57. — P. 49–76.
16. *Cox T.* Multidimensional scaling / T. Cox, M. Cox // Boca Raton. — 2001. — 11. — P. 22.
17. *Law M.* Incremental nonlinear dimensionality reduction by manifold learning / M. Law, A. Jain // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. — 2006. — **28**(3). — P. 377–391.
18. *Lee T.* Improved criteria for sampled-data synchronization of chaotic Lur'e systems using two new approaches / T. Lee, J. Park // *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*. — 2017. — 24. — P. 132–145.
19. *Du K.* Clustering: A neural network approach / K. Du // *Neural Networks*. — 2010. — **23**(1). — P. 89–107.
20. *Wang L.* Local Dynamic Modeling with SelfOrganizing Maps and Applications to Nonlinear System Identification and Control / L. Wang // *Intelligent Signal Processing*. — 2009. — 15. — P. 21.
21. *Svensen J.* GTM: the Generative Topographic Mapping / J. Svensen // University of Aston in Birmingham. — 1998. — 12. — P. 981.
22. *Ghahramani Z.* Unsupervised Learning / Z. Ghahramani // *Advanced Lectures on Machine Learning Lecture Notes in Computer Science*. — 2004. — 15. — P. 72–112.

*Recieved 08.11.2017*

---

From the Editorial Board: the article corresponds completely to submitted manuscript.

## **МЕРЕЖЕВІ СТРУКТУРИ ТА СИСТЕМИ: І. ПОТОКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКЛАДНИХ МЕРЕЖ**

**О.Д. ПОЛИЩУК, М.С. ЯДЖАК**

**Анотація.** Розглянуто структурний та функціональний напрями дослідження складних мережевих систем. Мережева система визначається як складна мережа, по якій рухаються потоки. Проведено класифікацію мережевих систем за ознаками неперервності та рівня впорядкованості руху потоків. Поряд зі структурними характеристиками складних мереж уведено потокові характеристики мережевих систем. Досліджено проблему критичної завантаженості складових мережі, а також проблеми розмірності та адекватності моделей мережевих систем. Показано, як за допомогою потокових характеристик системи ідентифікуються і вилучаються з її структури фіктивні вузли та зв'язки і визначаються приховані елементи системи. Досліджено, як на основі аналізу потокових процесів у системі змінюється структура безмасштабних мереж не лише на стадії росту, але і протягом усього життєвого циклу відповідної мережевої системи. Розглянуто проблему ізольованих зон мережевих систем та запропоновано алгоритм пошуку альтернативних шляхів руху потоків в обхід недосяжних складових мережі.

**Ключові слова:** складна мережа, мережева система, потік, модель, розмірність, адекватність, альтернативні шляхи, ріст, переважне приєднання.

### **ВСТУП**

Системи різного походження, типу та призначення є чи не найскладнішим об'єктом наукових досліджень [1, 2]. Це пояснюється необхідністю визначення їх складу та структури, пізнання законів функціонування й особливостей взаємодії між собою та з навколишнім середовищем великої кількості різномірних об'єктів, які діють для досягнення спільної і часто недостатньо зрозумілої досліднику цілі [3, 4]. Складні системи вивчають багато дисциплін, які надалі називатимемо системними (загальна теорія систем, системний аналіз, дослідження операцій, системотехніка, математичне моделювання та оптимізація та ін.). У кожній із природничих та гуманітарних наук можна виокремити певний «системний» підрозділ, який стосується її предметної області [5–7]. Одним із напрямів системних досліджень, який почав бурхливо розвиватися протягом останніх десятиліть [8, 9], стало вивчення складних мережевих систем (СМС). Мережеві структури є у мікро- та макросвіті [10–12], біологічних системах та людському соціумі [13–15]. Існують

різні визначення складних мереж (СМ) [16]. У цій роботі вважатимемо, що СМ — це сукупності вузлів, поєднаних певними зв'язками (ребрами), які мають нетривіальні топологічні властивості [8]. З-поміж основних понять теорії складних мереж (ТСМ) можна назвати орієнтованість мережі, локальні характеристики вузлів та зв'язків, загальні топологічні властивості мережевих підструктур (клік, спільнот тощо) та мережі загалом. Предметом дослідження ТСМ [9] є створення універсальних моделей мережевих структур, визначення статистичних властивостей, які характеризують їх поведінку та прогнозування поведінки мереж у разі зміни їх структурних властивостей. Загалом ТСМ реалізовує структурний напрям досліджень СМС. Це зовсім не применшує її значущості, оскільки причиною неефективного функціонування багатьох реальних систем є саме вади їх структури. До того ж існували та існують системи, які можна вивчати, досліджуючи виключно їх структуру. Серед таких СМС можна назвати мережеві структури Всесвіту, дослідження яких дозволяє знайти вирішення багатьох космологічних проблем. Археологи виявляють численні інфраструктурні мережі зниклих цивілізацій, а палеонтологи — ареали існування вимерлих тварин та рослин. У свій час це були достатньо великі та складні системи, досліджувати які тепер можемо винятково на основі їх викопних «мережевих» залишків.

Природні та штучні, фізичні та біологічні мережі, мережі мікро- та макросвіту мають багато спільного [9]. У кожному великому місті існують системи електро-, газо- та водопостачання, стаціонарного телефонного зв'язку, кабельного телебачення, інтернет та поштових послуг тощо. Усі ці системи мають тотожну мережеву структуру, більшість вузлів якої складають окремі будинки, офіси та квартири. Однак, незважаючи на практичну ідентичність структур, це істотно різні системи. Схожість мережевих структур дає змогу розробляти універсальні методи дослідження цих структур, але не завжди відповідних систем. Системні дисципліни, які загалом реалізують функціональний напрям системних досліджень, оперують такими поняттями, як ціль, функція, стан, процес, поведінка, стійкість, керованість [17] тощо. Предметом їх дослідження є вивчення різних класів і типів систем, основних принципів та закономірностей їх поведінки, процесів цілеутворення, функціонування, розвитку та взаємодії із зовнішнім середовищем [2, 18]. У системних дисциплінах структура системи розглядається спільно з функціями, які реалізуються складовими цієї структури та системою загалом, причому функція має пріоритет над структурою. Однією з визначальних особливостей реально функціонуючих СМС є рух потоків у них. В одних випадках забезпечення руху потоків є основною метою утворення та функціонування таких систем, у інших — основним процесом, який забезпечує їх життєдіяльність. Теорія мережевих потоків, розвиток якої розпочався у середині 50-х років минулого століття [19], вирішує низку практично важливих проблем, які стосуються насамперед можливостей мережі як структури, щоб забезпечити рух потоків [20], і меншою мірою — особливостей процесу функціонування системи. Вивчення довільної системи потребує цілісного погляду на неї, який можна сформулювати лише, поєднуючи структурний та функціональний напрями системних досліджень.

**Мета роботи** — визначити, як аналіз мережевих потоків дозволяє зблизити функціональний та структурний напрями досліджень СМС; вирішити низку практично важливих проблем, які виникають під час моделювання поведінки цих систем.

## ПОТОКОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СКЛАДНИХ МЕРЕЖ

Для розрізнення та класифікації СМС використовуємо тип та рівень упорядкованості руху потоків у мережі [21]. Ці потоки можуть бути дискретними (потяги), неперервно-дискретними (автотранспортні потоки) та неперервними (газ, нафта). Рух потоків у мережі може бути повністю впорядкованим, частково впорядкованим та неупорядкованим. Під впорядкованим розумітимемо рух потоків, які пересуваються згідно з певним наперед установленим графіком. Таким є рух потягів у залізничній транспортній системі. Під частково впорядкованим розумітимемо рух потоків, частина з яких пересувається згідно з графіком. Прикладом є рух комунального транспорту у містах та регулярне приміське або міжміське автосполучення. Невпорядкованим називаємо рух потоків, пересування яких складно описати за допомогою детермінованих закономірностей. Прикладом є рух інформаційних потоків у Інтернеті. Зрозуміло, що мережі однакової структури з різними типами потоків та рівнем упорядкованості їх руху породжують різні мережеві системи. Класифікацію потоків у мережі можна поглибити за ознаками періодичності, рівномірності, керованості, типу матеріального носія тощо. Це дозволяє здійснити більш точну класифікацію СМС.

Структура СМ повністю визначається її матрицею суміжності  $\mathbf{A} = \{a_{ij}\}_{i,j=1}^N$ , де  $N$  — кількість вузлів, які входять до складу мережі [22]. Для найбільш досліджених бінарних мереж значення  $a_{ij}$  дорівнюють 1, якщо між вузлами  $n_i$  і  $n_j$  є зв'язок, і дорівнює 0, якщо такого зв'язку немає. Очевидно, що для неорієнтованих мереж матриця  $\mathbf{A}$  є симетричною. Одне з найважливіших понять ТСМ, а саме ступінь  $d_i$  вузла  $n_i$  для неорієнтованих бінарних мереж, визначається через елементи матриці суміжності за співвідношенням  $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ . Для орієнтованих мереж використовуються такі поняття, як вихідний ступінь  $d_i^{\text{out}}$  та вхідний ступінь  $d_i^{\text{in}}$  вузла  $n_i$ . Вихідний ступінь вузла визначає кількість зв'язків, які «виходять» з нього, вхідний ступінь – кількість зв'язків, які «входять» у цей вузол. Легко бачити, що  $d_i^{\text{out}} = \sum_{j=1}^N a_{ij}$ , а  $d_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^N a_{ji}$ , та для неорієнтованих мереж  $d_i^{\text{out}} = d_i^{\text{in}} = d_i$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ .

Розглянемо випадок, коли потоки неперервно розподілені ребрами СМ. Нехай вузли  $n_i$  і  $n_j$  сполучені ребром (кривою)  $y_{ij}(x)$ ,  $x \in [x_i, x_j]$ . Позначимо через  $\rho_{ij}(t, x, y_{ij}(x))$  щільність потоку, який рухається з вузла  $n_i$  у вузол  $n_j$  у точці  $(x, y_{ij}(x))$ ,  $x \in [x_i, x_j]$  у момент часу  $t \in [0, T]$ . Тоді загальний об'єм потоку, спрямовленого з вузла  $n_i$  у вузол  $n_j$  у момент часу  $t$  на ребрі  $(n_i, n_j)$ , становитиме

$$v_{ij}(t) = \int_{(n_i, n_j)} \rho_{ij}(t, x, y_{ij}(x)) dl = \int_{x_i}^{x_j} \rho_{ij}(t, x, y_{ij}(x)) \sqrt{1 + (y_{ij}'(x))^2} dx,$$

а об'єм потоку, який проходить із вузла  $n_i$  у вузол  $n_j$  за період  $[0, T]$

$$V_{ij} = \int_0^T v_{ij}(t) dt .$$

Уведемо потокову матрицю суміжності мережевої системи  $\mathbf{F} = \{f_{ij}\}_{i,j=1}^N$  за період  $[0, T]$  співвідношенням  $f_{ij} = V_{ij} / \max_{m,l=1,N} \{V_{ml}\}$ ,  $f_{ij} \in [0, 1]$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ .

Елементи матриці  $\mathbf{F}$  визначають потокову силу взаємозв'язку між вузлами мережі протягом періоду  $[0, T]$ . Беручи послідовно кілька таких періодів, можна відстежувати динаміку зміни об'ємів потоків у мережі в часі. Очевидно, що потокові матриці суміжності як для орієнтованих, так і для неорієнтованих мереж загалом є несиметричними. Якщо матриця суміжності  $\mathbf{A}$  відображає структурну модель СМ, то матриця  $\mathbf{V}(t) = \{v_{ij}(t)\}_{i,j=1}^N$ ,  $t \in [0, T]$ , — континуальну потокову модель мережевої системи, а матриця  $\mathbf{F}$  — її інтегральну потокову модель. Зрозуміло, що це не є математичними моделями у звичному розумінні, однак вони дають достатньо чітке кількісне уявлення про процес функціонування СМС, дозволяють аналізувати особливості та прогнозувати поведінку цього процесу, а також оцінювати його ефективність [21].

Визначимо вихідний потоковий ступінь вузла  $n_i$  через  $\delta_i^{\text{out}} = \sum_{j=1}^N f_{ij} / N$ , вхідний потоковий ступінь вузла  $n_i$  через  $\delta_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^N f_{ji} / N$ , а загальний потоковий ступінь вузла  $n_i$  — співвідношенням  $\delta_i = (\delta_i^{\text{out}} + \delta_i^{\text{in}}) / 2$ , де  $\delta_i^{\text{out}}, \delta_i^{\text{in}}, \delta_i \in [0, 1]$ ,  $i = \overline{1, N}$ . Очевидно, що зміст прийнятого у ТСМ ступеня вузла та зміст визначеного вище потокового ступеня вузла суттєво різняться. Ми використовуємо однаковий термін «ступінь», зважаючи на аналогічність способу їх визначення через елементи відповідних матриць суміжності. Надалі для уникнення двозначностей називатимемо визначений у ТСМ ступінь вузла структурним. Згідно з ТСМ усі вузли бінарної мережі з однаковим ступенем є рівноважливими для структури. Потоківі ступені вносять функціональну впорядкованість пріоритетності вузлів з однаковими структурними ступенями, тобто значення  $\delta_i$  визначає потокову завантаженість (функціональну важливість) вузла  $n_i$  у системі, а значення  $\varphi_{ij} = (f_{ij} + f_{ji}) / 2$  — функціональну важливість ребра, яке сполучає вузли  $n_i$  і  $n_j$  відповідно. Таким чином, вузли з меншим структурним, але більшим потоковим ступенем можуть відігравати важливішу роль у процесі функціонування системи. Локальною характеристикою СМС можна вважати параметр  $\gamma_{ij} = \varphi_{ij} / \delta_i$ , значення якого можна інтерпретувати як важливість для вузла  $n_i$  зв'язку з вузлом  $n_j$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ . Збільшення або зменшення потокової завантаженості вузлів та зв'язків, які належать певній зв'язній підмережі вихідної СМ, може свідчити про активізацію (пришвидшення розвитку) відповідної частини системи або навпаки – про розгортання депресивних процесів у ній.

Для бінарних мереж сила зв'язку між вузлами дорівнює 1, якщо між ними є ребро, та 0, якщо такого ребра немає. Отже, опосередкована сила зв'язку між довільними вузлами зв'язної мережі формально також дорівнює 1. У випадку незв'язних мереж сила зв'язку між двома довільними вузлами дорівнює 1, якщо існує шлях між ними, та дорівнює 0, якщо такий шлях відсутній (вузли належать незв'язним складовим СМ). Поточкові характеристики дають можливість скласти значно адекватнішу картину як прямої, так і опосередкованої сили зв'язку між безпосередньо зв'язаними або віддаленими вузлами мережі. А саме, дозволяють визначати поточкову силу зв'язку між двома довільними вузлами зв'язної мережі як максимальне з усіх мінімальних значень елементів поточної матриці суміжності, які лежать на шляхах, що сполучають ці вузли. Таким чином, поточкова сила зв'язку між віддаленими вузлами мережі визначає можливість опосередкованого впливу з боку одного вузла на інший. При цьому віддалений вузол може впливати сильніше, ніж вузол, з яким існує прямий зв'язок (ребро), і вплив вузла  $n_i$  на вузол  $n_j$  може відрізнятись від впливу вузла  $n_j$  на  $n_i$ . Сили зв'язку між вузлами мережі, визначені через її поточкові характеристики, дають кількісне вираження функціональної взаємодії елементів мережевих систем. Особливо важливою є точність визначення сили зв'язку для вирішення проблем синхронізації СМ [23].

Важливими характеристиками процесу функціонування СМС є критична завантаженість її вузлів та зв'язків, окремих підмереж та мережі загалом. Критично завантажені складові системи є потенційною загрозою виникнення збоїв в екстремальних умовах функціонування СМС. Параметри  $\omega_i = \sum_{j=1}^N (V_{ji} + V_{ij}) / (2NW_i^{\max})$ , де  $W_i^{\max}$  — пропускна здатність вузла, та  $\theta_{ij} = V_{ij} / V_{ij}^{\max}$ , де  $V_{ij}^{\max}$  — пропускна здатність ребра, визначають критичну завантаженість вузлів та ребер системи відповідно,  $i, j = \overline{1, N}$ . Позначимо через  $J_k = \{j_1, j_2, \dots, j_k\}$  послідовність вузлів, що лежать на шляху руху потоків, що сполучають вузли  $n_{j_1}$  і  $n_{j_k}$  мережі. Тоді параметр

$$\xi_{J_k} = \sum_{j \in J_k} \omega_j / k + \sum_{j \in J_{k-1}} \theta_{j, j+1} / (k-1)$$

визначає усереднену критичну завантаженість цього шляху, а параметр

$$\xi_{J_k}^{\max} = \max \{ \max_{j \in J_k} \{ \omega_j \}, \max_{j \in J_{k-1}} \{ \theta_{j, j+1} \} \}$$

ідентифікує найбільш загрозливий його елемент. Аналогічним чином визначаються критична завантаженість окремих підсистем та СМС загалом. Визначення умов критичної завантаженості дозволяє завчасно оцінювати ризики процесу функціонування системи та уникати їх, зокрема планувати необхідність збільшення пропускної здатності вузлів та ребер мережі, або у випадку неможливості це зробити, обирати альтернативні або формувати нові шляхи руху потоків.

## РОЗМІРНІСТЬ ТА АДЕКВАТНІСТЬ МОДЕЛЕЙ МЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ

Вивчаючи реальні складні системи, ми насправді досліджуємо побудовані на основі спостережень та експериментальних і теоретичних досліджень

моделі цих систем (інформаційні, структурні, функціональні, математичні тощо). Для великих систем, які налічують  $10^6$ – $10^9$  елементів, постає проблема розмірності таких моделей. Якщо процес функціонування кожного елемента такої СМС описується одним рівнянням, у результаті отримуємо систему рівнянь такої ж розмірності. Складність математичних моделей породжується багатофакторністю процесів, які перебігають у системі, адже в реальності одне й те саме явище може бути наслідком багатьох причин та однакові причини у різних умовах можуть призводити до різних наслідків. Зазвичай такі особливості призводять до нелінійності математичних моделей. Знаходити розв'язок багатовимірних нелінійних систем — надскладна проблема навіть для сучасних суперкомп'ютерів [24]. Різноманітні способи зменшення розмірності моделей часто спричиняють втрату їх адекватності. Одним з таких способів є ідеалізація, яка нерідко супроводжується надмірним спрощенням структури системи та процесів, які в них перебігають. Другим способом є декомпозиція, яка часто призводить до нехтування зв'язків досліджуваної складової з іншими системними та позасистемними об'єктами. Окрім того, існують системи, які можна досліджувати лише в цілому (конденсовані середовища [6]), до яких належать і складні мережеві системи. Для багатьох СМС проблемою, яка виникає під час їх досліджень, є неперервна і швидка зміна структури та процесу функціонування. Для таких систем модель, створення або удосконалення якої потребує певного часу, також може втратити свою адекватність.

Поняття складності як для мережевих структур та систем, так і для їх моделей загалом має різний зміст. Складність мережі визначається, зокрема, наявністю великої кількості вузлів та зв'язків між ними. Мережі з порівняно невеликою кількістю елементів (сотні, тисячі і навіть десятки тисяч) зазвичай складними не вважаються. Наукова лабораторія може налічувати десятки співробітників, опорно-руховий апарат людини складається з 206 кісток та 640 м'язів, до складу залізничної транспортної мережі України входить приблизно 1600 вузлів – станцій, кількість вузлів (населених пунктів) її автотранспортної мережі не перевищує 40 тисяч і т.ін. Але ці порівняно невеликі за розміром структури породжують безумовно складні системи [25, 26]. Багато задач моделювання СМ, наприклад керованості або спостережуваності, навіть для випадку найпростіших лінійних моделей поки що вдається розв'язати лише для мереж невеликої розмірності (до сотні елементів) [27, 28].

Натепер лише в англійському сегменті Інтернету налічується понад 1 млрд веб-сайтів та понад 5 млрд веб-сторінок. Більшість із них після початкової стадії активності перестають відвідуватися (архіви великих новинних сайтів містять сотні тисяч сторінок, однак з часом інтерес до них згасає і кількість звертань зменшується до нуля). Серед багатомільйонної аудиторії користувачів соціальних мереж кількість активних не перевищує 10–30% [29]. Активний словниковий запас пересічної англійської людини не перевищує 10 тис. слів, хоча загальна їх кількість сягає півмільйона [30]. Google за запитом може видавати сотні тисяч або мільйони результатів пошуку, але пересічний користувач зазвичай обмежується переглядом кількох десятків або сотень результатів. Можна навести ще чимало прикладів вузлів та зв'язків реальних мереж, які насправді не беруть участі у функціонуванні

системи, тобто не забезпечують рух відповідного типу потоків. Такі елементи СМС називатимемо фіктивними. Поточкова матриця суміжності дає можливість визначати у структурі вихідної СМ (рис. 1, а) фіктивні вузли та зв'язки (рис. 1, б) та видаляти їх (рис. 1, в). Як впливає з наведених прикладів, у багатьох випадках це дозволяє суттєво зменшити розмірність моделі системи без утрати адекватності.

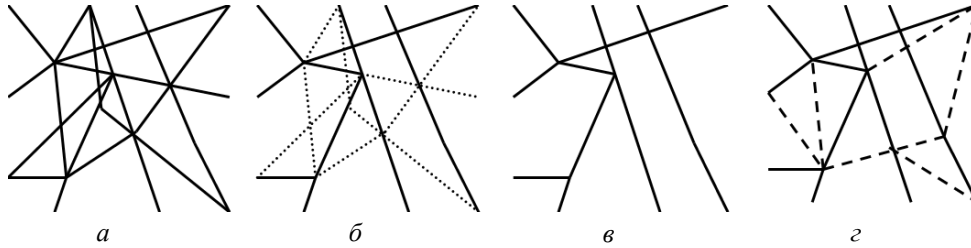


Рис. 1. Фрагмент мережі з фіктивними та прихованими елементами: а — вихідна мережа; б — фіктивні зв'язки; в — мережа без фіктивних зв'язків; г — приховані зв'язки

Поряд з величезними обсягами всесвітньої павутини, веб-сторінки якої індексуються пошуковими системами, існують невидимий і темний Web [31], розміри яких натепер установити не вдається. Якщо в країні існує великий тіньовий сектор, підприємства якого не сплачують податки, це істотно обмежує її бюджетні можливості, спотворює уявлення про реальний стан економіки та перспективи її розвитку. Вузли та зв'язки, які забезпечують рух певного типу потоків у системі, але формально не включені в її структуру, називатимемо прихованими. Саме наявність руху потоків дозволяє виявляти такі елементи СМС. Надалі вважатимемо, що до складу СМ включені лише реальні вузли та зв'язки (рис. 1, г).

Об'єм потоку, який виходить з вузла  $n_i$  у напрямку вузла  $n_j$  за період  $[0, T]$ , визначаємо за співвідношенням

$$w_{ij, \text{out}} = \int_0^T \rho_{ij}(t, x(n_i), y_{ij}(x(n_i))) dt .$$

Нехай потік рухається ребром  $(n_i, n_j)$  із середньою швидкістю  $u_{ij}$  та  $l_{ij}$  — довжина ребра  $(n_i, n_j)$ . Тоді об'єм потоку, який повинен надійти у вузол  $n_j$  з вузла  $n_i$  за період  $[l_{ij}/u_{ij}, T + l_{ij}/u_{ij}]$ , визначаємо за формулою

$$w_{ij, \text{in}} = \int_0^T \rho_{ij}(t + \frac{l_{ij}}{u_{ij}}, x(n_j), y_{ij}(x(n_j))) dt .$$

Порівнюючи значення  $w_{ij, \text{out}}$  і  $w_{ij, \text{in}}$ , можна аналізувати втрати або зростання об'ємів потоків, які виходять з вузла  $n_i$  і повинні надійти у вузол  $n_j$ . Незбіжність цих значень свідчить про наявність прихованих вузлів на ребрі  $(n_i, n_j)$ , які відбирають або додають певні об'єми потоків. Загалом за відсутності прихованих вузлів та зв'язків виконується нерівність  $|w_{ij, \text{out}} - w_{ij, \text{in}}| \leq \varepsilon_{ij}$ , де



$\varepsilon_{ij} \geq 0$ ,  $i, j = \overline{1, N}$ , — природні втрати або набуття (наприклад, зменшення або збільшення вологості транспортованого продукту) об'ємів потоків.

Нехай  $W_{i,\text{in}}$  — сумарний об'єм потоків, який надходить за період  $[0, T]$  у вузол  $n_i$ . Позначимо через  $J_i = \{j_1, j_2, \dots, j_i\}$  сукупність номерів вузлів, пов'язаних з  $n_i$ . Тоді виконання нерівності

$$\left| W_{i,\text{in}} - \sum_{j \in J_i} w_{ji,\text{out}} \right| > \varepsilon_{J_i}, \varepsilon_{J_i} \geq 0,$$

свідчить про наявність прихованих зв'язків вузла  $n_i$ , через які відбувається надходження додаткових об'ємів потоків,  $i = \overline{1, N}$ . Аналогічно можна визначити наявність прихованих елементів, через які відбираються певні об'єми потоків.

Таким чином, урахування руху потоків дає змогу шляхом вилучення зі складу мережі формальних вузлів та зв'язків і введенням «прихованих» елементів скласти більш точне уявлення про структуру системи, водночас зменшуючи розмірність та поліпшуючи адекватність відповідних моделей.

## РІСТ ТА ПЕРЕВАЖНЕ ПРИЄДНАННЯ У БЕЗМАСШТАБНИХ МЕРЕЖАХ

Серед СМ різних типів найбільший інтерес з прикладного погляду становлять безмасштабні мережі [9]. Визначальною особливістю цих мереж поряд зі ступеневим розподілом структурних ступенів вузлів є невелика кількість вузлів, які мають високий ступінь, та величезна кількість вузлів з невисоким ступенем (кількість мегаполісів у кожній країні є невеликою порівняно із загальною кількістю населених пунктів, однак їх значущість у житті країни важко переоцінити). Із безмасштабними мережами пов'язані два важливі поняття, які описують процес їх розвитку [32]. Першим поняттям є ріст, тобто додавання нових вузлів, які пов'язуються з уже існуючими вузлами мережі. Друге важливе поняття — переважне приєднання, яке визначає, що новий вузол з більшою ймовірністю пов'язується з існуючими вузлами мережі з високим структурним ступенем. Загалом запропонована А.Л. Барабаші та Р. Альберт модель розвитку безмасштабних мереж достатньо адекватно відображає процес освоєння нових територій, упровадження новітніх технологій, розширення інфраструктурних, транспортних, торговельних, інформаційних мереж тощо. У той же час у життєвому циклі довільної реальної системи можна виділити принаймні три основні етапи: 1) росту або «дорослішання», який супроводжується розгортанням структури та налагодженням руху потоків; 2) усталеного функціонування або «дорослості», який характеризується злагодженим рухом потоків за майже незмінної структури СМ; на цьому етапі основна увага приділяється нарощуванню об'ємів потоків та підвищенню ефективності функціонування СМС загалом; 3) згортання або «старіння», який характеризується процесами, зворотними до тих, які відбувалися на стадії росту СМС: спочатку зникає необхідність у забезпеченні руху потоків у певні вузли системи, а потім ці вузли та ребра, через

які ці потоки проходили, поступово «відключаються» до повного припинення процесу функціонування СМС. При цьому в багатьох системах насамперед «відключаються» не периферійні вузли, які були приєднані до мережі останніми, а вузли, з яких починався ріст мережі (у пік розвитку такі вузли зазвичай мають найвищий структурний ступінь). Прикладом є розвиток залізничної транспортної системи, яка замінила гужовий транспорт (першими будувалися залізничні колії, які сполучали основні міста країни, та зникла потреба у кінній тязі між ними).

Ріст мережі спонукається необхідністю спрямування потоків у нові вузли. Обставиною, яка доповнює модель Барабаші–Альберт, є той факт, що переважно приєднання нових вузлів у реальних мережах з більшою ймовірністю здійснюється з тими вузлами, через які проходять більші потоки (рис. 2, а). Дійсно, вузол А з більшою ймовірністю встановить зв'язок з вузлом В, якщо через нього проходять значно більші потоки, ніж через вузол С. При цьому структурний ступінь вузла В дорівнює 2, а структурний ступінь вузла С дорівнює 4. У багатьох країнах існують регіони, які після періодів інтенсивного розвитку перейшли в стан депресії (вичерпання покладів корисних копалин, які видобувалися у регіоні; зменшення попиту на продукцію, яка вироблялася у регіоні тощо). У таких регіонах зазвичай залишається розвинена інфраструктура, зокрема щільна транспортна мережа та мережа енергопостачання, але об'єми потоків суттєво скорочуються. Це робить малоімовірним переважно приєднання до вузлів таких складових мережі незалежно від їх структурного ступеня. Тобто зростання або зменшення структурного ступеня вузла безпосередньо залежить від об'ємів потоків, які проходять через цей вузол. Таким чином, функціональний підхід дає змогу прогнозувати напрями розвитку або згортання мережевих структур.

Ріст безмасштабних мереж означає приєднання нових вузлів до вже введених у структуру мережі. Однак виникає потреба у визначенні того, який із двох нових вузлів буде першим уведений у цю структуру, адже налагодження зв'язку інколи потребує значних витрат (побудова доріг, ліній електропередач, трубопроводів тощо). Урахування руху потоків дає однозначну відповідь на це питання: насамперед буде введений вузол, у який (або з якого) передбачається спрямувати більші об'єми потоків (вузол В, рис. 2, б).

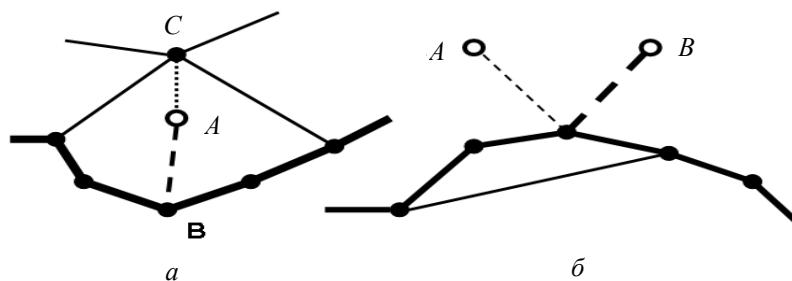


Рис. 2. Ріст та переважно приєднання у безмасштабних мережах (товщина ліній пропорційна об'ємам руху потоків)

Із функціонального погляду важливим є рівень покриття елементів мережі необхідними потоками та можливості мережі таке покриття здійснити.

Уведемо кілька понять, які визначають тенденції розширення та звуження СМС. Нехай  $N$  — кількість вузлів у складі мережі, між якими організовано рух заданого типу потоків, а  $\tilde{N}$  — кількість вузлів, між якими необхідно забезпечити рух цих потоків. Тоді величина  $P_N = \tilde{N}/N$  визначає рівень покриття вузлів рухом потоків заданого типу. Нехай  $M$  — кількість зв'язків, які забезпечують рух заданого типу потоків, а  $\tilde{M}$  — кількість зв'язків, необхідних для залучення тих вузлів мережі, які потребують забезпечення руху цих потоків. Тоді величина  $C_M = \tilde{M}/M$  визначає рівень покриття зв'язками вузлів мережі, необхідних для організації руху заданого типу потоків. Легко бачити, що якщо значення  $P_N > 1$  і  $C_M > 1$ , то СМС перебуває на стадії росту. Ріст мережі завершується, коли значення  $P_N$  і  $C_M$  стануть близькими до 1 і система переходить до стадії «дорослості». Якщо  $P_N < 1$  і  $C_M < 1$ , то СМС перейшла у стадію старіння. Зазвичай процеси, які перебігають у системі, можуть бути значно складнішими, наприклад, звуження мережі в одному напрямку може супроводжуватись її розширенням в іншому.

### **ІЗОЛЬОВАНІ ЗОНИ МЕРЕЖІ ТА ПОШУК АЛЬТЕРНАТИВНИХ ШЛЯХІВ РУХУ**

У реальних мережах часто розгортаються процеси, які необхідно швидко зупинити: розповсюдження епідемій, лісових пожеж, сільськогосподарських шкідників, комп'ютерних вірусів, процесів інвазії тощо. Для запобігання поширенню таких явищ зазвичай використовуються методи теорії перколяції [22], які полягають у послідовному вилученні певної частини вузлів та зв'язків СМ доти, доки перколяційний кластер не розпадеться на незв'язні складові, в одній з яких і міститься загроза. Однак існує ще один спосіб вирішення подібних проблем, який полягає в ізоляції певних частин (зон) мережі. Ізольовані зони часто виникають унаслідок стихійних лих, регіональних військових конфліктів, радіоактивного або хімічного забруднення тощо. Із функціонального погляду ізоляція певної підмережі вихідної СМ означає повне припинення або суттєве обмеження руху потоків з (у, через) неї. Це породжує проблеми, які зумовлюються процесом функціонування СМС загалом. По-перше, в ізольованій зоні можуть міститися вузли-генератори потоків, які потребують свого заміщення. Так, унаслідок землетрусу в Японії 11 березня 2011 р. у районі Фукусіми були зруйнованими майже 40 підприємств – виробників комплектуючих для автомобільної промисловості. У результаті свої конвеєри тимчасово зупинили майже всі японські автовиробники. По-друге, в ізольованій зоні можуть міститися вузли-приймачі потоків, які також потребують свого заміщення. Економічні санкції, які час від часу застосовуються до окремих країн, потребують пошуку нових ринків збуту продукції, яка раніше до них поставлялася. У такому разі країн-виробників цієї продукції очікують багатомільярдні втрати. Нарешті виникає проблема пошуку альтернативних шляхів руху транзитних потоків, які проходили через ізольовану зону. Тобто вилучення окремої підмережі вихідної мережі часто призводить до дестабілізації роботи всієї системи.

На рис. 3, *a* схематично зображено залізничну мережу західного регіону України (відображаються вузли зі структурним ступенем 3 і більшим), частина якої стала недосяжною (сірі ділянки на рис. 3, *б–д*). Із наведених прикладів (рис. 3, *б, в*) випливає, що ізоляція окремих зон СМ призводить до втрати зв'язності мережі (перетину перколяційного порога). Інколи такі заходи є вимушеними і є метою ізоляції. Однак у цьому випадку пошук альтернативних шляхів руху потоків істотно ускладнюється. Якщо ізольована зона не призводить до втрати зв'язності СМ (рис. 3, *г, д*), альтернативні шляхи руху визначають, виходячи з таких міркувань.

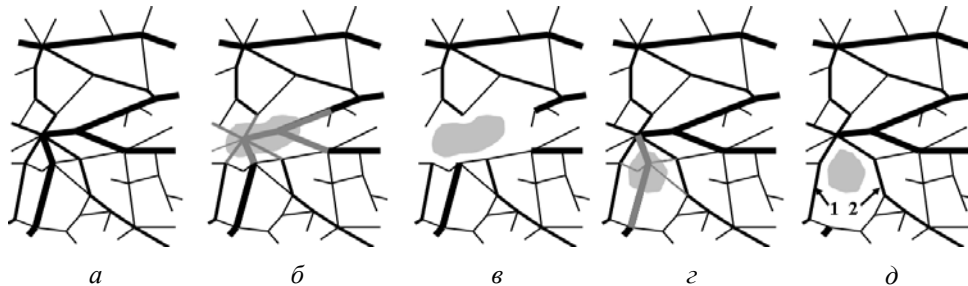


Рис. 3. Ізольовані зони та пошук альтернативних шляхів руху потоків

Зі структурного погляду достатньо знайти принаймні один найкоротший шлях в обхід ізольованої зони, а з функціонального нашою метою є проблема перерозподілу руху потоків. Зазвичай спрямувати всі транзитні потоки по одному найкоротшому шляху фізично неможливо. Це зумовлено обмеженістю пропускної здатності шляхів. У кожній мережевій системі окремі потоки мають різний пріоритет. Цей пріоритет може визначатися типом потоку (міжнародні потяги мають вищий пріоритет ніж приміські), його призначенням, важливістю генератора або приймача потоку тощо. Тоді потоки перерозподіляються за таким алгоритмом: 1) найбільш пріоритетні потоки спрямовуються по найкоротшому шляху поки не вичерпана його пропускна здатність (досягнуто поріг його критичної завантаженості); 2) у міру зменшення пріоритетності потоки спрямовуються по інших (довших) шляхах або із затримкою. Тобто, чим вища пріоритетність потоку, тим коротшим є шлях або меншою затримка його руху. В окремих випадках виникає потреба виводити певні об'єми потоків за найкоротший час з ізольованої зони (евакуація) або вводити в цю зону (гуманітарна допомога, силові підрозділи тощо).

## ВИСНОВКИ

Натепер теорія складних мереж та мережевих систем перебуває на стадії становлення. Вона все ще потребує розвитку й узгодження понятійного апарату, осмислення та строгого математичного формулювання задач, які потребують розв'язання та розроблення відповідних методів, розширення і конкретизації прикладних аспектів застосування. У роботі розглянуто лише деякі основні поняття ТСМ та введено їх потокові аналоги. Отримані результати свідчать, що врахування руху потоків у мережі дозволяє наблизити проблематику ТСМ до проблематики відомих системних дисциплін: прово-

дити класифікацію мережевих систем, ідентифікувати цілі їх утворення та розвитку, визначати функції, які сприяють реалізації цих цілей тощо. Визначення потокових характеристик мережі дає змогу в кожному конкретному випадку побудувати потокову модель реальної мережевої системи, своєчасно її коригувати та визначати перспективи розвитку СМС. Потоківі характеристики мережевих систем дозволяють більш реалістично визначати напрями пріоритетного росту і переважного приєднання у безмасштабних мережах та досліджувати процеси функціонування СМС на всіх етапах їх життєвого циклу. Вони також дають можливість зменшувати розмірність моделей СМС та підвищувати їх адекватність, пов'язувати з елементами структури параметри їх функціонування та визначати критично завантажені складові системи. Поєднання структурного та функціонального напрямів дослідження мережевих систем дозволяє розв'язувати важливі задачі, які проблематично розв'язати з використанням лише можливостей ТСМ: ідентифікувати фіктивні та приховані вузли і зв'язки та визначати реальну силу взаємодії між вузлами мережі, здійснювати пошук альтернативних шляхів руху потоків поза ізольованими зонами СМС тощо.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Morin E.* On Complexity: Advances in systems theory, complexity, and the human sciences / E. Morin. — New York: Hampton Press, 2008. — 127 p.
2. *Northrop R.B.* Introduction to complexity and complex systems / R.B. Northrop. — Boca Raton: CRC Press, 2011. — 520 p.
3. *Laszlo E.* The Interconnected Universe: Conceptual foundations of transdisciplinary unified theory / E. Laszlo. — New Jersey: World Scientific, 1995. — 166 p.
4. *Johnson S.* Emergence: The Connected lives of ants, brains, cities / S. Johnson. — New York: Scribner, 2001. — 288 p.
5. *Small M.* Dynamics of biological systems / M. Small. — Boca Raton: CRC Press, 2012. — 264 p.
6. *Spickermann C.* Entropies of condensed phases and complex systems / C. Spickermann. — Berlin: Springer, 2011. — 223 p.
7. *Валлерстайн И.* Исторические системы как сложные системы / И. Валлерстайн // Философские перипетии: Вестн. Харьков. гос. ун-та. — 1998. — № 409. — С. 198–203.
8. *Boccaletti S.* Complex networks: Structure and dynamics / S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno et al. // Physics reports. — 2006. — Vol. 424(4). — P. 175–308. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2005.10.009>.
9. *Barabási A.-L.* Linked: the new science of networks / A.-L. Barabási, J. Frangos. — New York: Basic Books, 2002. — 280 p.
10. *Bianconi G.* Bose-Einstein condensation in complex networks / G. Bianconi, A.-L. Barabási // Physical review letters. — 2001. — Vol. 86(24). — 5632. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.5632>.
11. *Coutinho B.C.* The Network Behind the Cosmic Web / B. C. Coutinho, S. Hong, K. Albrecht et al. // arXiv:1604.03236 [astro-ph.CO], 12 Apr 2016, 7 p.
12. *de Regt R.* Network analysis of the COSMOS galaxy field / R. de Regt, S. Apuneych, C. von Ferber et al. // arXiv:1707.00978v1 [astro-ph.CO], 4 Jul 2017, 12 p.
13. *Dorogovtsev S.N.* Evolution of Networks: From Biological Nets to the Internet and WWW / S. N. Dorogovtsev, J. F. F. Mendes. — Oxford: Oxford University Press, 2013. — 280 p.
14. *Bornholdt S.* Handbook of Graphs and Networks: From the Genome to the Internet / S. Bornholdt, H.G. Schuster. — New York: Jon Wiley & Sons, 2006. — 396 p.

15. *Caldarelli G.* Large Scale Structure and Dynamics of Complex Networks: From Information Technology to Finance and Natural Science / G. Caldarelli, A. Vespignani. — New York: World Scientific, 2007. — 251p.
16. *Евин И.А.* Введение в теорию сложных сетей / И.А. Евин // Компьютерные исследования и моделирование. — 2010. — 2, № 2. — С. 121–141.
17. *Антонов В.А.* Системный анализ / В.А. Антонов. — М.: Высш. шк., 2004. — 456 с.
18. *Scott W.R.* Organizations and organizing: Rational, natural and open systems perspectives / W.R. Scott, G.F. Davis. — London: Routledge, 2015. — 464 p.
19. *Ford L.R.* Flows in networks / L.R. Ford, D.R. Fulkerson. — Princeton: Princeton University Press, 1962. — 152 p.
20. *Li B.* A survey of network flow applications / B. Li, J. Springer, G. Bebis, M. H. Gunes // Journal of Network and Computer Applications. — 2013. — Vol. 36(2). — P. 567–581. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2012.12.020>.
21. *Поліщук Д.О.* Комплексне детерміноване оцінювання складних ієрархічно-мережевих систем: I. Опис методики / Д. О. Поліщук, О. Д. Поліщук, М. С. Яджак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2015. — № 1. — С. 21–31.
22. *Головач Ю.* Складні мережі / Ю. Головач, О. Олеськой, К. фон Фербер та ін. // Журнал фізичних досліджень. — 2006. — 10, № 4. — С. 247–289.
23. *Novikov A.V.* Oscillatory neural networks based on the Kuramoto model for cluster analysis / A.V. Novikov, E.N. Benderskaya // Pattern Recognition and Image Analysis. — 2014. — Vol. 24(3). — P. 365–371. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661814030146>.
24. *Суперкомпьютер* несколько месяцев создавал модели спиральных галактик [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://hyser.com.ua/tehnology/superkompyuter-neskolko-mesyatsev-sozdaval-modeli-spiralnyh-galaktik-200853>.
25. *Демидюк М.* Задачі математичного моделювання ходи людини з урахуванням біомеханічних експериментальних даних / М. Демидюк, Б. Литвин // Прикладні проблеми механіки і математики. — 2012. — Вип. 10. — С. 123–134.
26. *Polishchuk D.* About evaluation of complex dynamical systems / D. Polishchuk, O. Polishchuk // Journal of Complex Systems. — 2013, Article ID 204304, 6 p. — Available at: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/204304>.
27. *Lombardi A.* Controllability analysis of networks / A. Lombardi, M. Hörnquist // Physical Review E. — 2007. — Vol. 75(5). — 056110. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.75.056110>.
28. *Sedoglavic A.* A probabilistic algorithm to test local algebraic observability in polynomial time / A. Sedoglavic // Proc. of the 2001 Intern. Symp. on Symbolic and algebraic computation. — 23–29 July 2001. — P. 309–317. DOI: <https://doi.org/10.1145/384101.384143>.
29. *Prell C.* Social Network Analysis: History, Theory and Methodology / C. Prell. — New York: SAGE, 2012. — 263 p.
30. *Francis W.N.* Frequency Analysis of English Usage / W.N. Francis, H. Kucera. — Boston: Houghton Mifflin, 1982. — 213 p.
31. *Price G.* The Invisible Web: Uncovering Information Sources Search Engines Can't See / G. Price, C. Sherman. — New York: CyberAge Books, 2001. — 147 p.
32. *Albert R.* Statistical mechanics of complex networks / R. Albert, A.-L. Barabasi // Review of Modern Physics. — 2002. — Vol. 74 (1). — 47. DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.47>.

Надійшла 08.02.2018

## **ВЫЯВЛЕНИЕ ПРИЧИН ТРУДОЕМКОСТИ СОПРОВОЖДЕНИЯ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**Е.В. МОЖЕНКОВА, А.И. ПАРАМОНОВ**

**Аннотация.** Рассмотрена структура корпоративных вычислительных сетей (КВС) и классификация проблем, возникающих при работе с КВС, по ее уровням. Выделена основная группа элементов КВС, которая является объектом исследования, — корпоративная информационная система (КИС). Освещен этап сопровождения КИС в разрезе трудозатрат на этом этапе жизненного цикла. Для наглядности процесс сопровождения представлен в виде замкнутой итерационной системы, в которой длительность и перечень выполняемых работ зависят от типа возникающей проблемы. В соответствии со стандартом СТБ ИСО/МЭК 14764-2003 предложена трехуровневая классификация типов проблем для работ по сопровождению КИС. Проведен статистический анализ временных затрат сопровождения КИС согласно предложенной классификации в разрезе работ и типов ошибок. По результатам анализа выделены основные причины затрат временных ресурсов на сопровождение, которые определили направление дальнейшего исследования — обработка банков данных в режиме реального времени с последующей локализацией бизнес-процесса для сокращения временных и финансовых затрат на сопровождение КИС.

**Ключевые слова:** корпоративная вычислительная сеть, корпоративная информационная система, жизненный цикл, сопровождение, локализация бизнес-процесса.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Корпоративная вычислительная сеть (КВС) позволяет автоматизировать процесс производства на предприятии путем своевременного получения достоверной информации, ее аналитического анализа и интеграции данных между корпоративными информационными системами (КИС). Изменение схемы ведения бизнеса предприятия меняет и требования, предъявляемые к КВС, что обуславливает основное условие существования — возможность своевременной гибкой реконструкции сети, которое позволит конкурировать с другими предприятиями. Популярность использования КВС вызвало большой интерес к исследованию подходов решения различного рода проблем, возникающих на этапах жизненного цикла (ЖЦ). Сопровождение КВС составляет 2/3 части ЖЦ, поэтому предприятие тратит большую часть ресурсов на этап сопровождения. Корпоративная вычислительная сеть является сложноорганизованной системой, которая зависит от многих факторов: многообразия сетевых технологий, особенностей проектирования, спектра решаемых задач, различия внутренней организации, ЖЦ и др. Эти факторы (каждый в отдельности и в совокупности) существенно усложняют создание

единого подхода к комплексному решению проблем. Исследованиям данной предметной области занимались международные и отечественные ученые [1–3]. Анализ литературы в области сопровождения отразил основные направления в исследованиях: классификация сопровождения программных средств (ПС), адаптация технологии выбора моделей ЖЦ, исследования вопросов проектирования ПС для дальнейшего сопровождения, оценка возможности поддержки и сопровождение системы по разным показателям, унификация процесса внедрения различных ERP-систем и пр. Исходя из проведенного анализа, следует отметить, что большая часть исследований посвящена оптимизации проектирования новых систем с целью сокращения затрат на последующее сопровождение. В большинстве публикаций рассматривается поддержка ПС в зависимости от факторов и особенностей исследуемого ПС. Однако остается актуальная проблема, недостаточно проработанная в области сопровождения — это оптимизация затрат сопровождения уже существующих и введенных в эксплуатацию ПС.

**Цель работы** — выявление основных причин трудозатрат по сопровождению корпоративных информационных систем.

### АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ КОРПОРАТИВНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Для систематизации проблем, возникающих при работе с КВС, предлагается классифицировать их в виде многоуровневой схемы по аналогии со структурой строения самой КВС (рис. 1) [4, 5].



Рис. 1. Структура КВС и классификация проблем по ее уровням

Основываясь на структуре КВС, можно сделать вывод, что для каждого уровня характерны свои особенности функционирования подсистемы, свои



типы ошибок и соответственно свой класс специалистов, решающих эти проблемы.

Корпоративная информационная система является основной составляющей КВС и включает в себя: прикладное программное обеспечение, системные сервисы и банки данных. Конечная цель любой КВС реализована в прикладных программах верхнего уровня, поэтому особое внимание стоит уделить исследованию подходов сокращения затрат на сопровождение КИС предприятия.

## **СОПРОВОЖДЕНИЕ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Этап сопровождения в ЖЦ КИС является критическим фактором для определения стоимости программного обеспечения. На этапе сопровождения разработчик получает уже существующую и введенную в эксплуатацию систему со своей спецификой работы. Программисту, который мог не участвовать на этапе разработки, приходится приспосабливаться к стилю и содержанию программы, а иногда нарушать структуру кода для расширения функциональности с учетом сохранения алгоритмов работы бизнес-процессов предыдущих решений.

Согласно проведенным статистическим исследованиям, сопровождение ПС может составлять от 40% до 90% от общей стоимости любого программного продукта [6, 7]. Возможность сопровождения программного обеспечения и легкость, с которой может быть изменена система, — атрибуты оценки качества программного продукта [8]. Корпоративная информационная система относится к средствам, которые имеют продолжительный период ЖЦ, в том числе продолжительный этап сопровождения. Поэтому сокращение затрат процессов этапа сопровождения является актуальной задачей.

При сопровождении ПС обычно производится его исправление, не затрагивающее основного функционального назначения и включающее в себя локализацию и устранение обнаруженных дефектов в программных модулях, переработку интерфейсов ПС, модификацию кодов, документации или структуры баз данных ПС и др. [9].

Процессы сопровождения КИС можно представить в виде замкнутой итерационной системы (рис. 2). Этап сопровождения может включать в себя работы процесса разработки из группы основных процессов ЖЦ (подготовку процесса разработки, анализ требований, проектирование, программирование и тестирование, сборку обновлений и т.д.), а также работы вспомогательной группы процессов ЖЦ КИС (документирование, совместный анализ и др.). Длительность инкремента и перечень выполняемых работ может варьироваться и зависеть от типа возникающей проблемы по доработке или исправлению функциональности бизнес-процесса, а также степени реализованности существующей функциональности программного средства.

В соответствии со стандартом [9] введем трехуровневую классификацию типов проблем. Это позволит систематизировать работы по сопровождению КИС согласно описанным процессам итерационной системы. Верхний уровень классификации включает в себя разделение проблем на следующие типы:

- ошибки реализации — сбои, приводящие к нарушению работоспособности системы; ошибки, исключающие или затрудняющие использование бизнес-функций; несоответствие законодательству или стандарту; прочие ошибки;
- модернизация — необходимость выполнения трудоемких работ в случае изменений (дополнений) законодательства;
- развитие функциональности — расширение функциональности, реализация которых является условием внедрения системы, предложения по быстрдействию или эргономики.

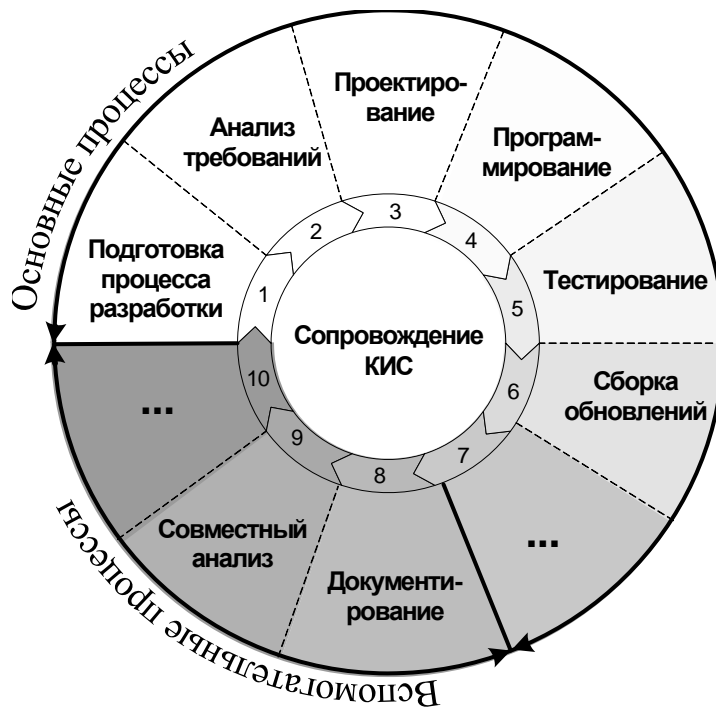


Рис. 2. Процессы сопровождения КИС

В зависимости от типа проблемы различаются и работы, выполняемые в каждом процессе сопровождения КИС (табл. 1). Особое внимание следует обратить на процесс «Подготовка процесса разработки», перечень работ которого сильно зависит от типа проблемы. Это увеличивает его трудоемкость и является наиболее уязвимым.

Процесс «Подготовка процесса разработки» необходим для планирования и документального оформления стратегии проведения сопровождения. Для типа проблем «Ошибка реализации» выполняются работы по локализации бизнес-процесса КИС. Под локализацией бизнес-процесса (проблемы) понимается проверка и подтверждение повторяемости описанной пользователем последовательности действий и конечного результата на тестовой базе данных организации-разработчика. Для проблем по модернизации системы проводятся работы по анализу существующих бизнес-процессов и последующей их доработке согласно законодательным изменениям. При развитии функциональности составляется план-график сопровождения и разработки, определяются организационные взаимоотношения с заказчиком.

**Таблица 1.** Классификация работ по сопровождению КИС

Наименование процесса	Наименование работ по типам проблем		
	Ошибка реализации	Модернизация	Развитие функциональности
Подготовка процесса разработки	Локализация бизнес-процесса	Анализ доработки системы согласно законодательным изменениям	Составление план-графика
	Анализ ресурсов Оценка стоимости Определение сроков выполнения		
Анализ требований	Аналитическая оценка бизнес-процесса. Разработка вариантов реализации		
	Составление аналитической записки		
	Согласование решения		
Проектирование	Создание контрольных примеров	Составление технического проекта	
Программирование	Кодирование Разработка пользовательской документации		
Сборка обновлений	Подготовкой дистрибутивов компонентов Предварительное тестирование		
Тестирование	Проведения испытаний (тестирования) Оценка результатов испытаний		
Документирование	Подготовка информационных обновлений для конечного пользователя		
Совместный анализ	Оценка результатов решения		

Процесс «Подготовка процесса разработки» необходим для планирования и документального оформления стратегии проведения сопровождения. Для типа проблем «Ошибка реализации» выполняются работы по локализации бизнес-процесса КИС. Под локализацией бизнес-процесса (проблемы) понимается проверка и подтверждение повторяемости описанной пользователем последовательности действий и конечного результата на тестовой базе данных организации-разработчика. Для проблем по модернизации системы проводятся работы по анализу существующих бизнес-процессов и последующей их доработке согласно законодательным изменениям. При развитии функциональности составляется план-график сопровождения и разработки, определяются организационные взаимоотношения с заказчиком.

#### **СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ ЗАТРАТ СОПРОВОЖДЕНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

Для дальнейшего исследования возможности облегчения процесса «Подготовка процесса разработки» проведен анализ статистических данных распределения временных затрат на сопровождение КИС программистов компании УП «ТопСофт» в период 2014–2016 гг. (табл. 2).

**Таблица 2.** Распределение временных затрат программистов (2014–2016 гг.)

Виды работ	2014	2015	2016
Локализация	3154,47	3641,76	5907,69
Аналитическая проработка	801,00	427,05	232,86
Кодирование	11260,60	10891,70	13326,80
Выпуск обновлений	1309,50	972,00	256,50
Предварительное тестирование	197,25	405,00	1009,95
<b>ИТОГО</b>	<b>16722,80</b>	<b>16337,50</b>	<b>20733,80</b>

График распределения затрат показан на рис. 3. Основная активность разработчиков связана с процессами 1–5 сопровождения КИС (см. табл. 1). В связи с этим для статистики были рассмотрены работы: локализация, аналитическая проработка, кодирование, выпуск обновлений, предварительное тестирование. Статистика подтвердила, что основное рабочее время затрачивается на этапы кодирования (65%) и локализации (23%). Остальные 12% времени приходится на работы: аналитическую проработку, выпуск обновлений и предварительное тестирование.

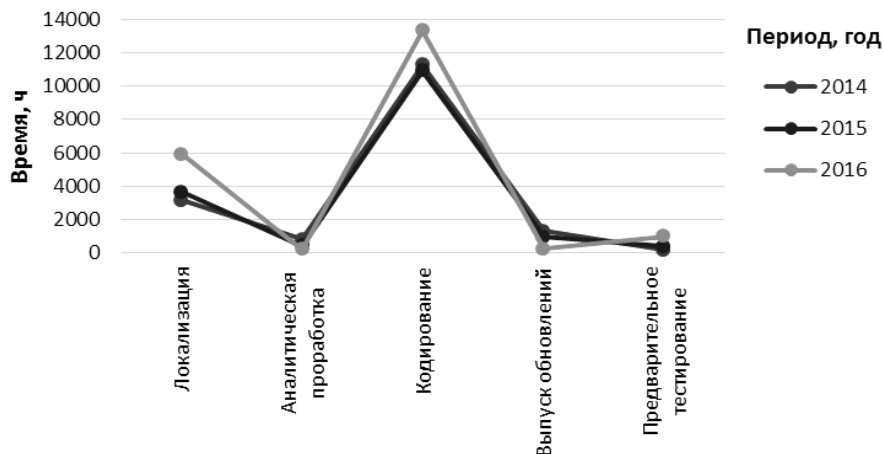


Рис. 3. График распределения затрат времени

Исследовано также распределение проблем по типам в соответствии с классификацией второго уровня за тот же период (рис. 4).

Можно заметить, что основная доля затрат разработчика при сопровождении КИС приходится на решение проблем с типом «Ошибка реализации» (2014 — 38%; 2015 — 35%; 2016 — 35%). А значит, большая часть временных затрат разработчика приходится именно на локализацию проблем с этим типом. Это подтверждает актуальность результатов исследований [10, 11]. Решение рассмотренных проблем лежит в плоскости локализации причин ошибок и оперативного их устранения.

Затраты временных ресурсов на локализацию проблемы определяются следующими причинами:

- кратко описан бизнес-процесс, настроенный у клиента, разработчик не может проявить проблему (не все настройки указаны);
- для передачи и настройки копии базы данных, на которой смоделирован пример с ошибкой, требуется дополнительное время;

- клиент не предоставляет доступ к информации: нет удаленного подключения, либо представителю отдела внедрения не предоставляют доступ на тестовую копию базы данных клиента;
- в организации высокий уровень защиты корпоративных данных и клиент может прислать только название интерфейса, описание последовательности действий, выбранный пункт меню и значение результата, который он считает ошибочным;
- для локализации проблемы необходимо создавать отладочный ресурс и отправлять клиенту для выполнения и дальнейшего предоставления протокола отладки;
- актуальным источником описания работы программы является сам исходный код.

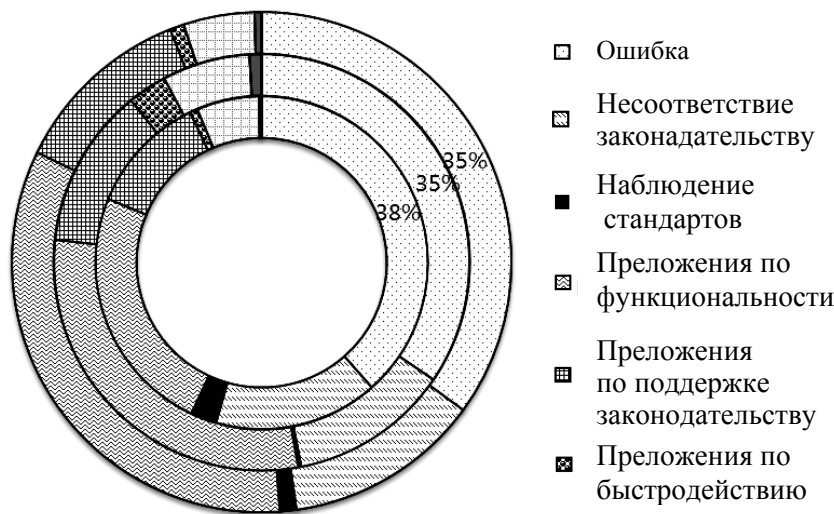


Рис. 4. График распределения проблем по типам

Описанные причины напрямую либо косвенно связаны с набором данных пользователя. Набор данных включает в себя: информацию банка данных, пользовательские настройки системы, информацию о рабочей станции и установленных компонентах системы. Поэтому в дальнейших исследованиях особое внимание предлагается уделить обработке банков данных в режиме реального времени с последующей локализацией бизнес-процесса клиента на машине разработчика для сокращения временных и финансовых затрат при сопровождении КИС.

## **ВЫВОДЫ**

1. Анализ статистических данных временных затрат выполнения работ по сопровождению КИС показал, что большая часть трудоемкости приходится на процесс «Подготовка процесса разработки», работу «Локализация бизнес-процесса» проблемы с типом «Ошибка реализации».

2. Рассмотрен набор ключевых причин, влияющих на трудоемкость задачи локализации проблемы бизнес-процесса КИС. Анализ этих причин показал, что работы по локализации проблемы требуют дальнейшего изучения с целью поиска системного подхода решения данной задачи.

3. Определено основное направление дальнейших исследований — обработка банков данных в режиме реального времени для локализации бизнес-процесса клиента. Это позволит сократить время и финансовые затраты на обслуживание КИС.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Chapin N.* Types of software evolution and software maintenance / N. Chapin, J. Hale, K. Khan et al. // *Journal of Software Maintenance and Evolution: Research and Practice*, 13(1), January-February 2001. — P. 3–30.
2. *Mens T.* Towards a taxonomy of software change / T. Mens, J. Buckley, M. Zenger et al. // *Journal of Software Maintenance and Evolution: Research and Practice*, 17(5), September 2005. — P. 309–322.
3. *Домарацкий А.Н.* Жизненный цикл разработки программных изделий / А.Н. Домарацкий, Н.К. Ласточкин // Программные продукты и системы. — Тверь: ЗАО Науч.-исслед. ин-тут «Центрпрограммсистем», 2001. — С. 2–7.
4. *Олифер В.Г.* Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. — 3-е изд. — СПб: Изд-во «Питер», 2008. — 958 с.
5. *Кульгин М.В.* Практика построения компьютерных сетей. Для профессионалов / М.В. Кульгин. — СПб.: Питер, 2001. — 320 с.
6. *Dehaghani S.M.H.* Which factors affect software projects maintenance cost more? / S.M.H. Dehaghani, N. Najrahimi // *Acta Informatica Medica*, 21(1), 63, March 2013. — P. 63–66.
7. *Coen J. Burki* How to save on software maintenance costs. An Omnnext white paper on software quality / Coen J. Burki, Dr. Harald H. Vogt. — November 2014. — P. 3–11.
8. *ISO/IEC 9126-1:2001-2004.* Программная инженерия. Качество продукта. — Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/22749.html>
9. *СТБ ИСО/МЭК 14764-2003.* Информационные технологии. Сопровождение программных средств. — Режим доступа: <http://www.gknt.gov.by/upload/Deyatelnost/standarti/STB-14764-2003.rar>.

Поступила 14.03.2018

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ОПТИМАЛЬНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ  
У РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

**Г.Г. ЦЕГЕЛИК, Р.П. КРАСНЮК**

**Анотація.** Розглянуто задачі оптимізації використання обчислювальних ресурсів розподіленої інформаційної системи. Виконано математичні постановки оптимізаційних задач та запропоновано ефективні обчислювальні алгоритми побудови розв'язку задач, які ґрунтуються на стратегії «жадібного» вибору та використанні генетичних алгоритмів. Для генетичних алгоритмів побудови розв'язків, близьких до оптимальних, у задачах бінарного та дійсного кодування запропоновано та досліджено обчислювальну ефективність введення параметрів самонавчання алгоритму, що забезпечує коригування популяцій у напрямі найкращої пристосованості.

**Ключові слова:** математичне моделювання, оптимізація, розподілені інформаційні системи, «жадібний» алгоритм, генетичний алгоритм.

**ВСТУП**

Ефективне використання інформаційних систем потребує розв'язання сукупності задач керування ресурсами системи та розподілу вхідних задач між вузлами. Метою керування є визначення ефективності розподілу задач і ресурсів з використанням різних критеріїв. Процес керування здійснюється динамічно (у процесі надходження задач та зміни конфігурації розподіленої інформаційної системи) спеціальною програмою — балансиром навантаження системи. Балансир навантаження керує потоком задач, що надходять у систему, розбиває їх на підзадачі та розподіляє між вузлами системи. Крім того, оброблення задач у вузлах інформаційної системи може вимагати додаткових ресурсів (зміни ємності запам'ятовувальних пристроїв, реплікації баз даних, використання спеціалізованих програмних комплексів тощо). Балансир навантаження має оптимізувати загальний час виконання завдань, а також мінімізувати вартість використання обчислювальних ресурсів.

Зазвичай керування ресурсами інформаційної системи та потоком задач зводиться до багатокритеріальних задач оптимізації, розв'язки яких доволі складно отримати із застосуванням точних методів, і для отримання результатів з достатньою для практики точністю застосовують низку евристичних підходів, що враховують специфіку предметної галузі, масштабованість

окремих задач у завданнях і таких, що використовують можливості паралельного виконання незалежних задач.

Оскільки натеper не існує універсального за ефективністю методу, який може забезпечити оптимальний розподіл для довільного класу задач та сукупності доступних ресурсів, то для проектування розподіленої інформаційної системи необхідно використовувати у сукупності якомога більше математичних моделей та обчислювальних алгоритмів, що мають бути закріплені за окремими функціональними модулями балансира навантаження. Вибір відповідної моделі або обчислювального алгоритму має ґрунтуватися на динамічній природі та забезпечувати ефективне керування у режимі реального часу.

**Мета роботи** — дослідити проблему оптимізації використання обчислювальних ресурсів розподіленої інформаційної системи.

Для досягнення поставленої мети потрібно:

- сформулювати та дослідити математичні моделі оптимізації використання обчислювальних ресурсів розподіленої інформаційної системи;
- навести ефективні обчислювальні алгоритми пошуку наближеного розв'язку однокритеріальних та двокритеріальних оптимізаційних задач, що використовують стратегію «жадібного» вибору та генетичні алгоритми;
- для генетичних алгоритмів побудови розв'язків запропонувати та дослідити обчислювальну ефективність введення параметрів самонавчання алгоритму, що забезпечує коригування популяцій у напрямі найкращої пристосованості.

## ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Для збереження оптимального стану обчислювальної системи використовується балансування навантаження для усіх її ресурсів. Перевага динамічного балансування ресурсами перед статичним полягає в тому, що інформаційна система не повинна мати інформацію про поведінку завдання під час його виконання до його запуску на оброблення. Крім того, за динамічного планування бажаним є резервування ресурсів для отримання деякої впевненості в продуктивності ресурсів. Як наслідок, оптимальною стратегією оброблення завдань за такого сценарію є мінімізація часу виконання вхідних завдань, що складаються з наборів задач.

За динамічних сценаріїв керування за прийняття глобальних рішень щодо планування ресурсів може відповідати як один центральний планувальник, так і декілька розподілених планувальників. Вибір центрального планувальника має перевагу у простоті реалізації, але цей варіант погано масштабується, не є відмовостійким і зазвичай стає вузьким місцем для продуктивності системи. Наприклад, у праці [1] розглядається центральний метапланувальник, який використовує алгоритм зворотного заповнення (*Backfill*) для планування паралельного виконання завдань. У праці [2] досліджено повністю децентралізований, динамічний та ініційований відправником алгоритм планування та балансування навантаження для розподілених обчислювальних середовищ, головною особливістю якого є використання інтелектуальної стратегії пошуку вузлів-партнерів, на які можуть бути перенесені задачі. Якщо вся інформація про стан ресурсів і стан



завдань відома, оптимально поєднати завдання відповідно до ресурсів можна з використанням деякої цільової функції, що забезпечує мінімізацію часу виконання завдань.

Оскільки керування процесами у розподіленій інформаційній системі у загальному випадку є *NP*-повною задачею [3], то довести оптимальність алгоритмів чи зробити певні раціональні припущення щодо оптимальності не завжди можливо. Тому у прикладних дослідженнях розглядаються субоптимальні розв'язки, з яких виокремлюють такі категорії:

- наближені алгоритми, що використовують формальні обчислювальні моделі замість отримання усього простору розв'язків та вибору з нього оптимального варіанта. Ці алгоритми виконують пошук прийняттого результату, близького до оптимального за метрикою, що дозволяє оцінити похибку обчислень;

- евристичні методи, що є класом алгоритмів, які надають найбільш реалістичні припущення про апріорні знання щодо характеристик навантаження системи та процесів виконання завдань. Оцінки результатів, знайдених за цими методами, зазвичай ґрунтуються на числових експериментах над тестовими даними або на моделюванні. Найбільш популярними у дослідженнях є економічні підходи [4–6] та евристики, що ґрунтуються на природних процесах: генетичний алгоритм (*GA – Genetic Algorithm*) [7–9], імітаційний відпал (*SA – Simulated Annealing*) [10, 11], заборонений пошук (*TS – Taboo Search*) [10] та комбінована евристика [12].

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Нехай необхідно розподілити  $m$  задач серед  $n$  комп'ютерів розподіленої інформаційної системи (комп'ютери можуть мати неоднакову потужність). Задається план за часом та продуктивністю кожного комп'ютера системи:

- $T_i, i = \overline{1, m}$  – час активності кожного вузла системи, що є важливою характеристикою розподілених обчислень, які працюють за схемою «оплата за використання»;

- на кожному  $j$ -му комп'ютері системи має бути виконано не менше  $C_j$  задач.

Необхідно скласти такий план роботи вузлів системи, щоб забезпечити мінімальні витрати на оброблення пакета задач, якщо відомі час виконання кожної  $j$ -ї задачі на  $i$ -му комп'ютері системи — продуктивності  $\tau_{ij}$  та вартість одиниці машинного часу  $p_{ij}$ , що витрачається на оброблення та транспортування  $j$ -ї задачі до  $i$ -го вузла розподіленої системи.

Інакше кажучи, потрібно визначити час роботи  $i$ -го комп'ютера з оброблення  $j$ -ї задачі в  $i$ -му вузлі мережі  $x_{ij}$ , щоб забезпечити мінімальні витрати на оброблення пакета задач за дотримання обмежень на час роботи вузлів мережі та задану мінімальну кількість задач  $C_j$ , які обробляються у вузлах.

За умовою пакет задач обробляється за заданий час  $\max_{i=1, m} \{T_i\}$ , тому це обмеження можна подати так:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq T_i, \quad i = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Обмеження за заданою мінімальною кількістю задач, які можуть бути оброблені у вузлі, виглядає таким чином:

$$\sum_{i=1}^m \tau_{ij} x_{ij} \geq C_j, \quad j = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Ураховуючи невід'ємність змінних  $x_{ij} \geq 0$ , можна сформулювати як однокритеріальну оптимізаційну задачу — пошук мінімуму витрат на оброблення пакета підзадач для цільової функції

$$F(\{x_{ij}\}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad (3)$$

так і двокритеріальну — пошук мінімуму цільової функції (3) з умовою мінімізації загального часу оброблення пакета задач:

$$\max_{i=1, m} \{T_i\}. \quad (4)$$

Задачу поставлено так, щоб витратити весь відведений час (за потреби мінімізувавши його) роботи комп'ютерів на оброблення пакета задач, але кількість розв'язаних задач на кожному комп'ютері системи не повинна бути меншою за  $C_j$ .

У деяких випадках можна послабити умову (2), тобто накласти обмеження на максимально допустиму кількість задач, які можуть бути оброблені у вузлі:

$$\sum_{i=1}^m \tau_{ij} x_{ij} \leq C_j, \quad j = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Оптимізаційні моделі (1)–(5) стосувалися випадку, коли розподілена система розв'язує пакет незалежних задач. Розглянемо ситуацію, коли у розподіленій інформаційній системі має бути розв'язана задача, що складається з  $m$  різних підзадач, які допускають паралельне виконання у  $n$  вузлах системи. Через неоднорідність комп'ютерів системи продуктивність виконання  $j$ -ї підзадачі неоднакова і дорівнює  $p_{ij}$ . Кожен  $i$ -й комп'ютер має максимальний сумарний ресурс часу для оброблення  $m$  задач, що дорівнює  $T_i$ . Потрібно максимізувати розв'язок задач, що за сутністю еквівалентно забезпеченню мінімізації дисбалансу, який виникає через затримання оброблення задач на комп'ютерах системи.

Необхідно визначити витрати часу на оброблення  $j$ -ї задачі на  $i$ -му вузлі системи, які не перевищують за сумою часові ресурси  $i$ -го вузла і забезпечують максимальну кількість оброблених задач.

Нехай  $x_{ij}$  — час, необхідний для розв'язання задачі  $j$  на комп'ютері  $i$ . Тоді загальна кількість задач, які можуть бути розв'язані на  $i$ -му комп'ютері системи, становить

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} x_{ij}, \quad j = \overline{1, m}.$$

Оскільки кожна задача складається з різних підзадач, наявних в одному екземплярі, то кількість підзадач, які може обробити інформаційна система, повинна дорівнювати кількості задач, якщо загальна їх кількість є мінімальною:

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} x_{ij} \rightarrow \min, \quad j = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Умова задачі (6) установлює обмеження на час, який використовує вузол  $i$ . Таким чином, математичну модель можна подати в такому вигляді:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} \leq T_i, \quad i = \overline{1, n}; \quad (7)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (8)$$

Модель (6)–(8) є нелінійною, тому її можна звести до лінійної форми за допомогою перетворення, увівши в розгляд кількість розв'язаних задач

$$C\{(x_{ij})\} = \min \left( \sum_{i=1}^n p_{ij} x_{ij}, \quad j = \overline{1, m} \right), \quad (9)$$

Виразу (9) з математичної точки зору еквівалентне таке формулювання: максимізувати  $F\{(x_{ij})\} = C\{(x_{ij})\}$  за обмежень

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} x_{ij} - C\{(x_{ij})\} \geq 0, \quad j = \overline{1, m} \quad (10)$$

та задач (7), (8).

### ОПТИМАЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРІВ РОЗПОДІЛЕНОЇ МЕРЕЖІ ЗА ПАРАЛЕЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ

Нехай  $n$  — кількість доступних вузлів розподіленої інформаційної системи;  $m$  — загальна кількість задач, що допускають паралельне виконання у вузлах інформаційної системи;  $\tau_{ij}$  — час, потрібний для розв'язування  $i$ -ї задачі у вузлі  $j$ ;  $T_j$  — час, протягом якого можна використовувати обчислювальні потужності  $j$ -го вузла;  $c_{ij}$  — затрати на розв'язання  $i$ -ї задачі в  $j$ -му вузлі інформаційної системи;  $x_{ij} \in \{0, 1\}$ , де 1 відповідає випадку розв'язання  $i$ -ї задачі в  $j$ -му вузлі, а нуль — у протилежному випадку. Тоді задача оптимального використання обчислювальних потужностей розподіленої інформаційної системи полягає у такому розподілі задач між вузлами системи, щоб забезпечити одночасно мінімальний час розв'язання усіх обчислювальних задач та мінімальні затрати на їх розв'язування.

Математична модель задачі є такою:

$$F\{(x_{ji})\} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \tau_{ij} x_{ij} \rightarrow \min; \quad E\{(x_{jik})\} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min \quad (11)$$

за умов:

$$\sum_{i=1}^m \tau_{ij} x_{ij} \leq T_j, \quad j = \overline{1, n}; \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, m}; \quad x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (12)$$

Оскільки розглянуті вище оптимізаційні задачі характеризуються великою розмірністю, то застосовувати точні методи до побудови їх розв'язків недоцільно через значні часові втрати. Задовільні для практичного використання результати можна отримати, застосувавши евристичні алгоритми, зокрема такі, як «жадібні» та генетичні, що дають наближений розв'язок поставленої задачі.

## СТРАТЕГІЯ «ЖАДІБНОГО» ВИБОРУ ЗА ОПТИМІЗАЦІЇ ОБЧИСЛЕНЬ У РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

«Жадібні» алгоритми [13–16] є інтуїтивними евристичними, у яких на кожному кроці приймається найбільш вигідне для цього кроку рішення, без урахування того, що відбувається на наступних кроках пошуку.

Опишемо загальну схему алгоритму для сформульованих вище математичних моделей (1)–(5) і (7)–(10), яка використовує ідею «жадібного» вибору.

Позначимо:  $X(x_{ij}^*)$  — множина допустимих планів вихідної задачі, для яких  $x_{ij} = x_{ij}^*$ ;  $I = \{i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}\}$  — множина індексів змінних;  $I_{00}$  — множина індексів змінних, яким процедурою «жадібного» вибору присвоєні нові значення.

### Алгоритм.

**Крок 0.** Покладемо  $X_{00} = X$ ,  $I_{00} = \emptyset$  і виберемо початковий допустимий план  $x^0 = (x_{11}^0, x_{12}^0, \dots, x_{nm}^0) \in X_{00}$ . Для кожної з  $n \times m$  змінних знаходимо межі  $x_{ij}^L \leq x_{ij} \leq x_{ij}^R$  такі, що  $x^0 = (x_{11}^0, x_{12}^0, \dots, x_{ij}^0, \dots, x_{nm}^0) \in X_{00}$  для всіх  $x_{ij}$ ,  $x_{ij}^L \leq x_{ij} \leq x_{ij}^R$ . Межі нерівностей можуть задаватись наближено.

Нехай сформовано множини  $I_{kl}$  та  $X_{kl} \in X$ .

**Крок 1.** Якщо  $I_{kl} = I$ , то всі змінні набули нових значення. Тобто побудовано допустимий вектор  $x$ , який береться за наближений розв'язок. В іншому випадку переходимо до кроку 2.

**Крок 2.** Для  $(i, j) \in I \setminus I_{kl}$  знаходимо

$$(i_0, j_0) = \max_{(i, j) \in I \setminus I_{kl}} \left\{ \min_{x_{ij}^L \leq x_{ij} \leq x_{ij}^R} F(\{x_{ij}\}) \right\},$$

$$\text{де } x_{kl}^{L,R} = \begin{cases} x_{kl}^0, & (k, l) \in I \setminus I_{kl}, k \neq i, l \neq j; \\ x_{kl}^*, & (k, l) \in I_{kl}. \end{cases}$$

Покладемо  $x_{i_0 j_0}^* = \min_{x_{i_0 j_0}^L \leq x_{i_0 j_0} \leq x_{i_0 j_0}^R} F$ ,  $X_{k+1, l+1} = X_{kl}(x_{i_0 j_0}^*)$ ,  $I_{k+1, l+1} = I_{kl} \cup (\{i_0, j_0\})$  і переходимо до кроку 1.

Для зменшення похибки наближеного розв'язку, отриманої з використанням цього алгоритму, пропонується процедура покращення результату. Зокрема, припускати, що змінні вектора  $x$  пронумеровані в послідовності отримання значень у «жадібному» алгоритмі.

**Алгоритм покращення розв’язку.**

Як початковий план беремо розв’язок, отриманий за «жадібним» алгоритмом. Покладемо  $M = \{(1,1), (1,2), \dots, (n,m)\}$ ,  $(p, q) = (1,1)$ .

**Крок 1.** Вибираємо ще не опрацьовану змінну  $x_{pq} > 0$  з мінімальними індексами  $(p, q) \in M$  і підбираємо значення  $\delta_{pq} > 0$ , на яке необхідно зменшити величину  $x_{pq}$ .

**Крок 2.** Знаходимо змінну  $x_{rs}$ ,  $r > p$ ,  $s > q$  і величину  $\delta_{rs} > 0$ , на яку можна зменшити значення  $x_{rs}$ , не порушуючи допустимості плану та збільшивши при цьому цільову функцію. Для цього  $\delta_{pq}$  та  $\delta_{rs}$  повинні задовольняти умову

$$F(\dots, x_{pq} - \delta_{pq}, \dots, x_{rs}, \dots) < F(\dots, x_{pq} - \delta_{pq}, \dots, x_{rs} - \delta_{rs}, \dots).$$

Після закінчення кроку 2 незалежно від того, знайдена чи ні змінна  $x_{rs}$ , покладемо  $M = M \setminus \{(p, q)\}$  і переходимо до наступного значення із множини  $M$  і повертаємося до кроку 1. Процес припиняється, коли всі змінні у початковому плані будуть переглянуті ( $M = \emptyset$ ).

Як показали результати числових експериментів (табл. 1), середня похибка наближеного розв’язку порівняно з точним, отриманим методом повного перебирання, знижується від 20% до 5% із застосуванням алгоритму покращення розв’язку.

**Таблиця 1.** Оцінка точності використання «жадібного» алгоритму та алгоритму покращення розв’язку в задачах (1–5) і (7)–(10) у відсотках

Розмірність задачі	Величина середньої похибки «жадібного алгоритму» задачі (1)–(5)	Величина середньої похибки алгоритму покращення розв’язку задачі (1)–(5)	Величина середньої похибки «жадібного алгоритму» задачі (7)–(10)	Величина середньої похибки алгоритму покращення розв’язку задачі (7)–(10)
$m = 10, n = 5$	15,2	3,9	16,7	4,2
$m = 18,0, n = 5$	17,4	4,8	18,9	5,4
$m = 28,0, n = 6$	21,9	5,1	22,3	5,8

**СТРАТЕГІЯ ВИБОРУ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ, БЛИЗЬКОГО ДО ОПТИМАЛЬНОГО, З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ**

Генетичні алгоритми (*Genetic Algorithms*) є варіантами еволюційних методів пошуку, за якими створюється популяція елементів (особин), де в задачі оптимізації кожна особина відповідає одному з можливих розв’язків. Для пошуку найкращого розв’язку використовується цільова функція або пов’язана з нею функція пристосування, значення якої показують, наскільки особина відповідає розв’язку задачі. Для забезпечення процесу еволюційно-

го пошуку до початкової популяції застосовуються основні генетичні операції (селекції, схрещування, мутації та клонування), за результатами яких генерується нова популяція за допомогою додавання нових елементів з кращими показниками цільової функції або функції пристосування.

Генетичні алгоритми поділяють на дві групи: генетичні алгоритми з бінарним кодуванням [17, 18] та генетичні алгоритми з дійсним кодуванням [19]. Перша група використовує двійкову систему числення для кодування розв'язків на множині допустимих значень. Це забезпечує високу ефективність пошуку екстремального значення на множині допустимих розв'язків, що досягається використанням теореми про схеми [18].

Друга група виникла як результат відмови від ідеї кодування, тобто розв'язок в особині подається у вигляді набору дійсних чисел. У цьому випадку реалізація алгоритмів змінюється, а операції кодування–декодування відсутні.

Далі пропонується реалізація генетичних алгоритмів за двома підходами, що зумовлюється структурами математичних моделей.

### **Підхід 1 — для задач бінарної оптимізації**

#### **Крок 1. Формування початкової популяції.**

1. Задається номер популяції  $nr = 0$ , максимальна кількість популяцій  $max$ , номер ітерації  $itern = 0$ .

2. Задається розмір популяції  $q$  і випадковим чином формується початкова популяція розміру  $q$ . Для цього за допомогою рівномірного розподілу генерується  $q$  матриць розміру  $m \times n$  (наприклад, для задачі (11)–(12)) — особин популяції, елементи яких є випадкові значення з одиничного відрізка  $(0,1)$ . Однак усі елементи матриці мають бути цілими числами з множини  $\{0,1\}$ . Тому в роботі пропонується вводити матрицю самонавчання алгоритму  $\mu = \{\mu_{ij}\}$ , що буде засобом цілеспрямованого впливу на характеристики пошуку, де елементи цієї матриці спочатку також розраховуються випадковим чином з відрізка  $(0,1)$  із застосуванням рівномірного розподілу. Зауважимо, що за такого підходу до кодування розв'язку особиною популяції є матриця, стовпці якої є хромосомами особини.

3. Для кожної матриці — особини з популяції перед розрахунком цільової функції — застосовуватиметься процедура дискретизації: якщо значення елемента матриці менше або дорівнює відповідному значенню матриці коригування, то значення зменшується до нуля, у протилежному випадку — зростає до одиниці. Якщо за умовою обмежень оптимізаційної задачі тільки одне значення в стовпці (хромосомі) матриці популяції має дорівнювати одиниці, то збільшується до одиниці тільки перше значення стовпця, що є більшим від відповідного значення елемента матриці самонавчання.

4. Для кожної дискретизації матриці з популяції розраховується значення цільової функції (або функції пристосування) і перевіряється задоволення додаткових обмежень, сформованих в оптимізаційній моделі. Якщо у сформованій популяції відсутні варіанти, що задовольняють обмеження оптимізаційної моделі, то популяція має бути перестворена заново.

**Крок 2. Селекція.** Особини для схрещування пропонується обирати відповідно до стратегії панміксії — випадкового рівномірного вибору двох батьківських особин — двох матриць з популяції.

**Крок 3. Схрещування** — формування нових нащадків у популяції. Для формування нащадків пропонується застосування односточкового та багатоточкового схрещування. За першого варіанта кожна пара стовпців (хромосом) матриць батьків випадково розривається в одній точці і формуються два нові стовпці матриць нащадків з використанням двох частин хромосоми кожної батьківської особини: перший нащадок отримує, наприклад, кожен верхню частину вектора-стовпчика першого батька і нижню другого, тоді як другий нащадок — навпаки.

За другого варіанта схрещування випадково вибираються дві або більше точок розриву для кожної пари хромосом з матриць батьків, і нащадки отримують нові хромосоми, що складатимуться із сегментів, розміщених між цими точками. Зауважимо, що варіант вибору кількості сегментів розбиття також визначається випадковим чином для кожної нової популяції

Результатом цього кроку є два нащадки, що отримуються з використанням вибраних на другому кроці алгоритму батьківських особин.

**Крок 4. Мутація** — перетворення хромосоми, що випадково змінює один або декілька з її генів. Застосовується для підтримання різноманітності хромосом у популяції.

У роботі пропонується для мутації використовувати оператор інверсії, за яким кожен стовпець (хромосома) матриці особини випадково ділиться на дві частини, які потім обмінюються місцями — нижня частина стає верхньою і навпаки.

Як наслідок, результатом цього кроку є два нащадки-мутанти, що були отримані застосуванням оператора мутації до двох нових особин, отриманих на третьому кроці алгоритму.

**Крок 5. Формування нової популяції.** З отриманих на попередньому кроці особин вибирається одна, результат застосування якої до цільової функції є найкращим. Вона замінить у вихідній популяції особину, що має найгіршу пристосованість. Зауважимо, що значення пристосовуваності обраховується з використанням матриці самонавчання алгоритму за схемою, наведеною на кроці 3.

Далі перевіряються умови:

- якщо  $itern < q$ , то покласти  $itern = itern + 1$  і перейти до кроку 2;
- якщо  $itern = q$ , то покласти  $nr = nr + 1$  і перейти до кроку 6.

**Крок 6. Перевірка умови завершення роботи генетичного алгоритму.** Умовою завершення роботи генетичного алгоритму є формування заданої кількості популяцій  $nr > rmax$ :

- якщо умову не виконано, то покладаємо  $itern = 1$  і переходимо до кроку 2. Уточнюється матриця самонавчання алгоритму. Для цього значення матриці  $\mu$  обраховуються за формулою

$$\mu_{ij} = \begin{cases} 0, & \mu_{ij} \pm (1 - F_0 / F_1) \leq 0; \\ \mu_{ij} \pm (1 - F_0 / F_1), & 0 < \mu_{ij} \pm (1 - F_0 / F_1) < 1; \\ 1 & \mu_{ij} \pm (1 - F_0 / F_1) \geq 1, \end{cases}$$

де знак плюс вибирається для оптимізаційних задач на максимум, мінус — для задач пошуку мінімуму цільової функції. Значення  $F_1$  — найкраще значення функції пристосовуваності для поточного покоління популяції;  $F_0$  — відповідно найкраще значення функції пристосовуваності для попереднього покоління. Очевидною є вимога побудови двох поколінь популяцій перед

застосуванням цієї процедури уточнення для матриці самонавчання. Уведення такої залежності робить процес самонавчання генетичного алгоритму більш чутливим до змін якості розв'язку. Дійсно, за малих змін функції пристосовуваності значення елементів матриці змінюються незначно і навпаки;

- якщо умову завершення роботи виконано, то як розв'язок (наближений) вибираємо особину з найбільшою пристосованістю з поточної популяції, застосувавши процедуру дискретизації (із кроку 3).

Як показали проведені числові експерименти побудови розв'язку задачі (11)–(12), уведення у генетичний алгоритм процедури самонавчання алгоритму дозволило у середньому зменшити кількість поколінь при формуванні популяцій на п'ятнадцять відсотків, а кількість задач, для яких розв'язок не був знайдений за десять тисяч поколінь популяцій, зменшився на п'ять відсотків (табл. 2).

**Таблиця 2.** Оцінка точності використання генетичного алгоритму в задачі (11)–(12) з урахуванням процедури самонавчання алгоритму

Функція пристосування (13)	Середня кількість поколінь генетичного алгоритму без самонавчання	Кількість задач, розв'язків для яких не було знайдено за десять тисяч поколінь за алгоритмом без самонавчання	Середня кількість поколінь генетичного алгоритму із самонавчанням	Кількість задач, розв'язків для яких не було знайдено за десять тисяч поколінь за алгоритмом із самонавчанням
1	1220	11	1040	10
2	1300	21	1110	19
3	1450	8	1230	7
4	1180	45	1000	40

Функція пристосування визначалася такими залежностями:

$$1) F_p(\{x_{ij}\}) = \frac{1000^{F(\{x_{ij}\})}}{E(\{x_{ij}\})}; \quad 2) F_p(\{x_{ij}\}) = \frac{e^{F(\{x_{ij}\})}}{E(\{x_{ij}\})};$$

$$3) F_p(\{x_{ij}\}) = \frac{F(\{x_{ij}\})}{E(\{x_{ij}\})}; \quad 4) F_p(\{x_{ij}\}) = \frac{F(\{x_{ij}\})}{e^{E(\{x_{ij}\})}},$$

де вирази для функцій  $F(\{x_{ij}\})$  та  $E(\{x_{ij}\})$  наведено у формулі (11).

### Підхід 2 — для задач оптимізації з дійсними розв'язками

#### Крок 1. Формування початкової популяції.

1. Як і для задачі бінарної оптимізації задається номер популяції  $pr = 0$ , максимальна кількість популяцій  $prmax$ , номер ітерації  $itern = 0$ .

2. Задається розмір популяції  $q$  і випадковим чином формується початкова популяція розміру  $q$ . Для цього за допомогою рівномірного розподілу генерується  $q$  матриць  $\{x_{ij}^0\}$  розміру  $m \times n$  (наприклад, для задачі (1)–(3)) — особин, елементи яких є випадковими значеннями з одиничного відрізка  $[0,1]$ . Із використанням лінійного перетворення кожне значення елемента



матриці відображається на відповідний проміжок  $[\alpha_{ij}, \beta_{ij}]$ :  $x_{ij} = (\beta_{ij} - \alpha_{ij})x_{ij}^0 + \alpha_{ij}$ , коли, наприклад, за умовою (1)  $\alpha_{ij} = 0$ ,  $\beta_{ij} = T_i$ .

3. Обчислюється значення функції пристосування для кожної матриці  $\{x_{ij}\}$  — особини популяції і перевіряється задоволення додаткових обмежень, що сформовані в оптимізаційній моделі. Якщо у сформованій популяції немає варіантів, що задовольняють обмеження оптимізаційної моделі, то популяція має бути перестворена заново.

**Крок 2. Селекція.** Особини для схрещування, як і у випадку бінарної оптимізації, пропонується обирати із застосуванням стратегії панміксії — випадкового рівномірного вибору двох батьківських особин — двох матриць з популяції.

**Крок 3. Схрещування** — формування нових нащадків у популяції. Для формування нащадків пропонується застосування кросоверу, що імітує двійковий [20], коли нащадки формуються з особин батьків за формулою

$$x_{ij}^{c1} = \frac{1}{2}[(1 - \chi_1)x_{ij}^{p1} + (1 + \chi_1)x_{ij}^{p2}]; \quad x_{ij}^{c2} = \frac{1}{2}[(1 + \chi_2)x_{ij}^{p1} + (1 - \chi_2)x_{ij}^{p2}],$$

де  $\{x_{ij}^{p1}\}$ ,  $\{x_{ij}^{p2}\}$  — батьківські особини;  $\{x_{ij}^{c1}\}$ ,  $\{x_{ij}^{c2}\}$  — матриці нащадків. Значення  $\chi_r$ ,  $r = 1, 2$  обчислюються за формулою

$$\chi_r = \begin{cases} (2u)^{\frac{1}{\eta+1}}, & u \leq \frac{1}{2}; \\ (2(1-u))^{\frac{-1}{\eta+1}}, & u > \frac{1}{2}, \end{cases}$$

де значення  $u$  обирається випадковим чином з інтервалу  $(0, 1)$  на кожній ітерації алгоритму. Значення  $\eta$  за працею [20] має належати інтервалу  $\eta \in [2, 5]$ . Надалі, як і за варіантом бінарної оптимізації, пропонується застосовувати підхід самонавчання алгоритму, тобто змінювати коефіцієнт схрещування  $\eta$  відповідно до кращого пристосування популяції. Тобто, зафіксувавши на початку формування першої популяції деяке початкове значення  $\eta$  з інтервалу  $[2, 5]$ , для кожної наступної, починаючи з другої, буде застосовуватися схема самонавчання алгоритму

$$\eta = \begin{cases} 2, & \eta \pm (1 - F_0 / F_1) \leq 2; \\ \eta \pm (1 - F_0 / F_1), & 2 < \eta \pm (1 - F_0 / F_1) < 5; \\ 5, & \eta \pm (1 - F_0 / F_1) \geq 5, \end{cases} \quad (13)$$

де, як і раніше, знак плюс вибирається для оптимізаційних задач на максимум, знак мінус — для задач пошуку мінімуму цільової функції. Значення  $F_1$  — найкраще значення функції пристосованості для поточного покоління популяції,  $F_0$  — відповідно найкраще значення функції пристосованості для попереднього покоління.

Очевидно, що за такого вибору оператора схрещування значення матриць особин-нащадків також будуть задовольняти обмеження відповідної

оптимізаційної задачі, якщо координати батьківських особин також задовольняли ці обмеження.

**Крок 4. Мутація.** У роботі пропонується для мутації використовувати випадкову мутацію: випадковим чином вибирається декілька елементів кожної матриці нащадків і їх значення замінюються випадковим чином на нові за схемою формування особини 1.2. Як наслідок, результатом цього кроку є два нащадки-мутанти, що були отримані застосуванням оператора мутації до двох нових особин, отриманих на третьому кроці алгоритму.

**Крок 5. Формування нової популяції.** З отриманих на попередньому кроці особин вибирається одна, результат застосування якої до цільової функції є найкращим. Вона замінить у вихідній популяції особину, що має найгіршу пристосованість.

Далі перевіряються умови:

- якщо  $itern < q$ , то покласти  $itern = itern + 1$  і перейти до кроку 2;
- якщо  $itern = q$ , то покласти  $pr = pr + 1$  і перейти до кроку 6.

**Крок 6. Перевірка умови завершення роботи генетичного алгоритму.** Умовою завершення роботи генетичного алгоритму є формування заданої кількості популяцій  $pr > pmax$ :

- якщо умову не виконано, то покладаємо  $itern = 1$  і переходимо до кроку 2. При цьому відбувається процедура (13) самонавчання алгоритму — уточнення коефіцієнта схрещування  $\eta$ ;

- якщо умову завершення роботи виконано, то як розв'язок (наближений) вибираємо особину з найкращою пристосованістю з поточної популяції.

Як наслідок, модифікація генетичного алгоритму — уведення параметрів самонавчання алгоритму — забезпечує коригування популяцій у напрямі найкращої пристосованості. Тобто рівномірний процес генетичного алгоритму отримує властивість пам'яті, що зменшує кількість генерацій покоління популяцій для досягнення необхідної точності результату.

## ВИСНОВКИ

Інтеграція інформаційних та обчислювальних ресурсів у єдине середовище та організація ефективного доступу до них є одним з основних напрямів розвитку сучасних інформаційних технологій. На перший план виходить проблема ефективного використання обчислювальних ресурсів кожного вузла мережі для вирішення складних наукових, виробничих і технологічних завдань. Тому одним з актуальних завдань сьогодення є ефективне керування обчислювальними ресурсами у розподіленому середовищі. Зростання кількості ресурсних центрів, що складають розподілену інфраструктуру, за відсутності або низької оптимальності підсистеми планування, яка забезпечує керування потоком задач, не тільки знижує ефективність використання усієї розподіленої інфраструктури, але й може зробити беззмисливим її створення. Тому розширення класу математичних моделей та інструментарію числових методів, які можуть бути залучені у комп'ютерні системи адміністрування розподілу ресурсів, є актуальною науковою проблемою, що і

зумовило значущість досліджень цієї роботи; здійснено побудову та досліджено математичні моделі оптимального оброблення даних у розподілених інформаційних системах.

Побудовано наближені обчислювальні алгоритми з використанням процедури «жадібного» вибору. Для зниження обчислювальної похибки розв'язку, що отримується за сформованими алгоритмами, запропоновано процедуру покращення розв'язку, яка зменшує відносну обчислювальну похибку до рівня, прийняттого у прикладних дослідженнях.

Наведено дві схеми розрахунку наближеного розв'язку задач оптимізації за бінарного та дійсного кодування параметрів моделі. Запропоновано модифікацію генетичного алгоритму — уведення параметрів самонавчання алгоритму, що забезпечує коригування популяцій у напрямі найкращої пристосованості. Тобто рівномірний процес генетичного алгоритму отримує властивість пам'яті, що зменшує кількість генерацій поколінь популяцій для досягнення необхідної точності. Як показали числові експерименти, уведення в генетичний алгоритм процедури самонавчання алгоритму дозволило у середньому зменшити кількість поколінь у формуванні популяцій на двадцять відсотків, а кількість задач, для яких розв'язок не був знайдений за десять тисяч поколінь популяцій, зменшився на п'ять відсотків.

Як наслідок, сформульовані та досліджені математичні моделі оптимізації розподілу ресурсів та наближені методи розв'язання відповідних оптимізаційних задач можуть бути покладені в основу створення програмних комплексів керування розподіленою комп'ютерною інфраструктурою, що можна розглядати предметом подальших досліджень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Sabin G.* Scheduling of Parallel Jobs in a Heterogeneous Multi-Site Environment / G. Sabin, R. Kettimuthu // Job Scheduling Strategies for Parallel Processing (JSSPP'03): Proceedings of the 9th International Workshop (Seattle, WA, USA, June 24, 2003). — Springer, Lecture Notes in Computer Science, 2003. — Vol. 2862. — P. 87–104.
2. *Arora M.* A Decentralized Scheduling and Load Balancing Algorithm for Heterogeneous Grid Environments / M. Arora, S.K. Das, R. Biswas // International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'02): Proceedings of International Conference (Vancouver, British Columbia Canada, August 20–23, 2002). — IEEE Computer Society, 2002. — P. 499–505.
3. *El-Rewini H.* Task Scheduling in Parallel and Distributed Systems / H. El-Rewini, T. Lewis, H. Ali. — Prentice Hall, 1994. — 290 p.
4. *Buyya R.* The Grid Economy / R. Buyya, D. Abramson, S. Venugopal // Proceedings of the IEEE. — 2005. — Vol. 93, N 3. — P. 698–714.
5. *Zhu Y.* Incentive-based P2P Scheduling in Grid Computing / Y. Zhu, L. Xiao // Proceedings of the 3rd International Conference on Grid and Cooperative Computing (GCC2004), Wuhan, China, October 21–24, 2004. Springer, Lecture Notes in Computer Science, 2004. — P. 209–216.
6. *Young L.* Scheduling Architecture and Algorithms within the ICENI Grid Middleware / L. Young, S. McGough // Proceedings of UK e-Science All Hands Meeting. — Nottingham, UK: IOP Publishing Ltd., 2003. — P. 5–12.
7. *You S.Y.* Task Scheduling Algorithm in GRID Considering Heterogeneous Environment / S.Y. You, H.Y. Kim // Proceedings of the International Conference on

- Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications (PDPTA '04), June 21–24, 2004. — Nevada, USA: CSREA Press, 2004. — P. 240–245.
8. *Kim S.* A Genetic Algorithm Based Approach for Scheduling Decomposable Data Grid Applications / S. Kim, J.B. Weissman // Proceedings of the 2004 International Conference on Parallel Processing (ICPP'04), Montreal, Quebec Canada, August 15–18, 2004). IEEE Computer Society, 2004. — P. 406–413.
  9. *Song S.* Security–Driven Heuristics and A Fast Genetic Algorithm for Trusted Grid Job Scheduling / S. Song, Y. Kwok, K. Hwang // Proceedings of 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05), Denver, Colorado USA, April 25–29, 2005. IEEE Computer Society, 2005. — P. 65–74.
  10. *Braun R.* A Comparison of Eleven Static Heuristics for Mapping a Class of Independent Tasks onto Heterogeneous Distributed Computing Systems / R. Braun, H.Siegel // Journal of Parallel and Distributed Computing. — 2001. — Vol. 61, N 6. — P. 810–837.
  11. *Young L.* Scheduling Architecture and Algorithms within the ICENI Grid Middleware / L. Young, S.McGough // Proceedings of UK e–Science All Hands Meeting, September 2003). — Nottingham, UK: IOP Publishing Ltd., 2003. — P. 5–12.
  12. *Abraham A.* Nature's Heuristics for Scheduling Jobs on Computational Grids / A. Abraham, R. Buyya, B. Nath // Proceedings of 8th IEEE International Conference on Advanced Computing and Communications (ADCOM 2000), Cochin, India, December 14–16, 2000. IEEE Computer Society, 2000. — P. 45–52.
  13. *Ахо А.В.* Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А.В. Ахо, Д.Э. Хонкрофт, Д.Д. Ульман. — М.: Мир, 1979. — 380 с.
  14. *Ахо А.В.* Структуры данных и алгоритмы / А.В. Ахо, Д.Э. Хонкрофт, Д.Д. Ульман. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. — 426 с.
  15. *Новиков Ф.А.* Дискретная математика для программистов / Ф.А. Новиков. — СПб.: Питер, 2011. — 526 с.
  16. *Сигал И.Х.* Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные методы / И.Х. Сигал, А.П. Иванова. — М.: Физматлит, 2002. — 320 с.
  17. *Chambers D.L.* Practical Handbook of Genetic algorithms, Applications / D.L. Chambers. — Chapman and Hall; CRC Press, 2001. — 650 p.
  18. *Holland J.N.* Adaption in natural and artificial systems / J.N. Holland. — Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press, 1975. — 726 p.
  19. *Michalewicz Z.* Genetic algorithms, numerical optimization and constraints / Z. Michalewicz // Proceedings of the 6th Intern. Conference on Genetic Algorithms, 1995. — P. 151–158.
  20. *Deb K.* Realcoded genetic algorithms with simulated binary crossover: Studies on multimodal and multiobjective problems / K. Deb, A. Kumar // Complex Systems, 1995. — Vol. 9, N 6. — P. 431–454.

Надійшла 12.02.2018

## АДАПТИВНИЙ КВАНТОВИЙ ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ 0–1 ЗАДАЧИ ПАКУВАННЯ РЮКЗАКА

В.М. ТКАЧУК

**Анотація.** Розглянуто квантовий генетичний алгоритм (QGA), який порівняно з його класичною реалізацією має ряд переваг завдяки швидкодії, невеликому розміру популяції, автоматичному балансу між глобальним та локальним пошуком розв'язку. Основу QGA становлять ідеї традиційних еволюційних алгоритмів, покладені на технологію квантових обчислень, які оперують квантовими бітами, суперпозицією станів та квантовими вимірюваннями. Запропоновано новий QGA, для реалізації якого використано новий адаптивний оператор квантового гейту та технологію відновлення квантової хромосоми під час розв'язання комбінаторних задач з обмеженнями. Для забезпечення ефективності роботи алгоритму виконано метаоптимізацію основних параметрів, покладених в основу його роботи. Можливості запропонованого підходу ілюструють модельні дослідження з використанням широкого спектру тестових 0–1 задач пакування рюкзака.

**Ключові слова:** квантові обчислення, квантовий біт, квантовий генетичний алгоритм, оператор квантового гейту, 0–1 задача пакування рюкзака.

### ВСТУП

Генетичний алгоритм є евристичним алгоритмом, що використовується для наближеного розв'язку задач оптимізації та пошуку [1]. В основу його роботи покладено принципи еволюції природних біологічних систем, зокрема відбору, схрещування та мутації [2–4]. Алгоритм працює із множиною потенційних розв'язків, використовуючи найкращий для його відтворення та послідовного наближення до точного значення в ході еволюції.

У класичній його реалізації мінімальною одиницею інформації є біт-структура із двома станами: 0 та 1. Квантовий генетичний алгоритм (QGA) є новим еволюційним алгоритмом, що ґрунтується на поєднанні ідеології квантових обчислень і технології класичних генетичних алгоритмів [5, 6].

Імовірнісний механізм квантових обчислень забезпечує глобальний пошук розв'язку за швидкої локальної збіжності та невеликого розміру популяції. Хоча теоретичного обґрунтування роботи алгоритму поки що не існує, він показує задовільну ефективність у багатьох областях. Так, цей клас алгоритмів був успішно застосований до широкого спектру задач, як то комбінаторна та функціональна оптимізація, проблеми оптимізації в машинобудуванні, оброблення зображення та багатьох інших [7–11].

Основні ідеї QGA запропонували Narayanan і Moore [12], згідно з якими мінімальною одиницею інформації в квантових обчисленнях є кубіт – квантова система, що може перебувати в двох основних станах:  $|0\rangle$  та  $|1\rangle$ . Кван-

това природа кубіта полягає в принципі суперпозиції, відповідно до якого він може перебувати у довільному стані, що є лінійною комбінацією базових:

$$|q\rangle = \alpha_0|0\rangle + \alpha_1|1\rangle \tag{1}$$

з умовою нормування

$$\alpha_0^2 + \alpha_1^2 = 1.$$

Наслідком принципу суперпозиції є те, що простір станів кубіта незрівнянно більший від простору станів класичного біта. Інформація, що міститься в амплітудах  $\alpha_0$  та  $\alpha_1$ , є власне квантовою частиною інформації. Фактично  $\alpha_0^2$  та  $\alpha_1^2$  — імовірності перебування кубіта в стані  $|0\rangle$  та  $|1\rangle$  відповідно.

Як і класичний, квантовий біт можна виміряти. Результатом вимірювання буде кубіт в одному з основних станів. При цьому важливо, що результат вимірювання не детермінований, як у класичному обчисленні, а ймовірнісний.

Для реалізації QGA використовується матричне подання основних станів кубіта:

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}.$$

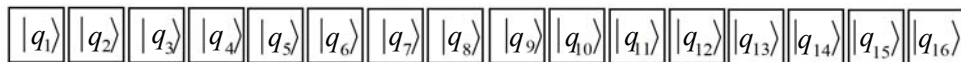
Стан суперпозиції (1) у такому поданні можна записати у вигляді

$$|q\rangle = \begin{pmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \end{pmatrix}.$$

Упорядкований набір з  $N$  кубітів формує квантову хромосому. Вектор стану такої хромосоми являє собою розклад по  $2^N$  базових станах  $|i_1, i_2, \dots, i_N\rangle$ ,  $i_1, i_2, \dots, i_N = \{0, 1\}$ :

$$|\Psi\rangle = \sum_{k=1}^N \alpha_{i_1, i_2, \dots, i_N} |i_1, i_2, \dots, i_N\rangle.$$

Оскільки заплутаність квантових станів у QGA не використовується, то хромосома може бути сформована як упорядкований набір незалежних кубітів. Так, якщо  $N = 16$  кубітів, схематично її можна подати таким чином:



Уся інформація про систему кубітів визначається вектором стану  $|\Psi\rangle$ . Єдине, що можна зробити з такою системою, — це перетворити вектор початкового стану  $|\Psi\rangle$  до деякого нового  $|\Psi'\rangle$  за допомогою оператора квантового гейту. Тобто QGA — це перехід системи з початкового в кінцевий стан відповідно до алгоритму, закладеного у роботу квантового гейту. Розв’язок задачі отримується як результат квантового вимірювання вектора кінцевого стану системи  $|\Psi'\rangle$  та переходу до його класичного подання.

## КВАНТОВИЙ ГЕНЕТИЧНИЙ АЛГОРИТМ ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ В ЗАДАЧАХ КОМБІНАТОРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

У цілому структура QGA аналогічна звичайному генетичному алгоритму, а принципова відмінність полягає лише в особливостях реалізації квантових операторів з урахуванням подання хромосоми у вигляді системи кубітів та принципу суперпозиції.

Загальна схема роботи алгоритму може бути реалізована у вигляді такого алгоритму:

### Алгоритм 1. Квантовий генетичний алгоритм

```
1  $t = 0$ 
2   ініціалізація  $Q(t)$ 
3   вимірювання  $Q(t)$  та перехід до  $P(t)$ 
4   оцінювання пристосованості  $P(t)$ 
5   відновлення  $P(t)$ 
6   відновлення  $Q(t)$ 
7   знаходження  $b$  – найкращого розв'язку в  $P(t)$ 
8   while (умова завершення еволюції)
9      $t = t + 1$ 
10    оновлення  $Q(t)$  за допомогою квантового гейту
11    вимірювання  $Q(t)$  та перехід до  $P(t)$ 
12    оцінювання пристосованості  $P(t)$ 
13    відновлення  $P(t)$ 
14    відновлення  $Q(t)$ 
15    знаходження  $b$  – найкращого розв'язку в  $P(t)$ 
16  end while
```

Тут  $Q(t)$  — квантова популяція розв'язків на момент часу  $t$ ;  $P(t)$  — класичне (бінарне) подання популяції, отримане в результаті квантового вимірювання.

Операцію квантового вимірювання (етапи 3 та 11) детально розглянуто, наприклад у працях [6, 8], й окремого опису не потребує. Необхідність операції відновлення (етапи 5, 6 і 13, 14) та алгоритм її роботи більш детально розглянуто далі.

Для розширення області пошуку та виходу з локальних мінімумів QGA у разі потреби можна доповнити традиційними операторами, притаманними чисто класичному генетичному алгоритму, як то квантової мутації, схрещування чи катастрофи [13].

Зважаючи на ймовірнісний механізм процесу квантового вимірювання у використанні оператора мутації у його класичному розумінні в розгляданому випадку потреби немає. Операція квантового гейту до певної міри виконує роль операції схрещування в її класичному розумінні.

Для реалізації QGA використовується матричне подання квантових хромосом. Наприклад, якщо хромосома складається з  $N$  кубітів, кількість яких визначається розмірністю комбінаторної задачі, то вона може бути реалізована так:

$\alpha_0^1$	$\alpha_0^2$	$\alpha_0^3$	$\alpha_0^4$	$\alpha_0^5$	...	...	...	$\alpha_0^N$
$\alpha_1^1$	$\alpha_1^2$	$\alpha_1^3$	$\alpha_1^4$	$\alpha_1^5$	...	...	...	$\alpha_1^N$

Тут  $\{\alpha_0^i, \alpha_1^i\}$  визначає стан  $i$ -го кубіта  $|q_i\rangle$ , а  $N$  кубітів формують одну особину популяції. Оскільки початковий стан не містить інформації про розв'язок задачі, то найпростішим способом ініціалізації популяції є рівність між собою всіх амплітуд імовірностей станів [12]. Тобто на етапі 2 роботи алгоритму кожен кубіт буде переведений у стан

$$|q\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|1\rangle.$$

Для пошуку розв'язку в ході еволюції відбувається зміна амплітуд імовірностей станів унаслідок послідовної дії квантових операторів (етапи роботи 9–15). Визначальним серед них є оператор квантового гейту, робота якого реалізована на етапі 10.

## МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження була побудова нових квантових операторів у реалізації QGA для забезпечення, порівняно із традиційними підходами, більшої ефективності роботи алгоритму як за часом роботи, так і за ефективністю пошуку оптимального значення.

Усю інформація про задачу та алгоритм її розв'язку закладено у квантовому гейті, тому його робота є визначальною для побудови будь-якого QGA. Він маніпулює амплітудами ймовірностей квантових станів, забезпечуючи виконання умови нормування.

Під час реалізації обертання квантових станів для визначення кута повороту традиційним є використання таблиці пошуку, що обмежує універсальність роботи алгоритму. Крім того, фіксоване значення кута негативно впливає на швидкість збіжності, тому QGA інколи реалізують як адаптивний процес зміни його величини в ході еволюції. Більш ефективним, як показали виконані дослідження, є закладання адаптивного характеру у сам алгоритм роботи оператора.

Роботу запропонованого оператора можна поділити на два етапи. На першому етапі збільшується амплітуда ймовірності вибраного квантового стану  $b$ :

$$(\alpha_k^b)' = \sqrt{[\alpha_k^b]^2 + \mu \cdot (1 - \alpha_k^b)}, \quad (2)$$

де  $k \in \{0, 1\}$ .

Стан  $b$  визначається  $k$ -м значенням класичного подання найкращої особини популяції, отриманої на попередній ітерації еволюції в часі. Функціональна залежність (2) забезпечує також той факт, що амплітуда ймовірності  $\alpha_k^b$  не може перевищувати 1. Значення параметра  $\mu$  лежить у межах  $[0, 1]$  і підбирається за результатами попередніх досліджень.

На другому етапі необхідно зменшити амплітуду ймовірності іншого стану кубіта для забезпечення виконання умови нормування. Загалом алго-



ритм роботи оператора до квантової хромосоми, що складається з  $N$  кубітів, можна реалізувати таким чином:

**Алгоритм 2.** Оператор квантового гейту

```

1 for  $i$  in  $1, \dots, N$  do
2    $bestamp = i$  -е значення гена найкращої особини популяції
3   if  $bestamp = 0$ 
4      $\alpha_0^i = \sqrt{[\alpha_0^i]^2 + \mu(1 - \alpha_0^i)}$ 
5      $\alpha_1^i = \sqrt{1 - [\alpha_0^i]^2}$ 
6   end if
7   if  $bestamp = 1$ 
8      $\alpha_1^i = \sqrt{[\alpha_0^i]^2 + \mu(1 - \alpha_1^i)}$ 
9      $\alpha_0^i = \sqrt{1 - [\alpha_0^i]^2}$ 
10  end if
11 end for

```

На етапі 4 (8) алгоритму відбувається адаптивний поворот вектора квантового стану, що відповідає найкращій особині популяції, а на етапі 5 (9) — перерахунок амплітуди іншої імовірності для забезпечення виконання умови нормування.

Таким чином, у кожному новому поколінні забезпечується збільшення ймовірності того, що в результаті спостереження генеруються класичні особини, більш схожі на найкращу. За такого алгоритму роботи також можна обійтися без таблиці пошуку, що є одним із принципових недоліків QGA.

Адаптивний механізм, покладений в основу роботи квантового гейту, як показали моделювання, дозволяє для розв'язання 0–1 задачі пакування рюкзака покласти  $\mu = 1$ .

## ЗАДАЧА ПАКУВАННЯ РЮКЗАКА

Проблема 0–1 пакування рюкзака є  $NP$  повною задачею дискретної комбінаторної оптимізації, яка традиційно використовується для тестування пошукових алгоритмів. Вона зводиться до знаходження для скінченної множини  $N$  речей такого бінарного вектора заповнення рюкзака  $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_N\}$ , який забезпечує максимальне значення функції

$$f(X) = \sum_{i=1}^N p_i x_i \quad (3)$$

з обмеженням

$$\sum_{i=1}^N \omega_i x_i \leq C, \quad (4)$$

де  $p_i$  — вартість  $i$ -го предмета;  $\omega_i$  — маса  $i$ -го предмета;  $C$  — максимально можлива маса рюкзака.

У процесі ініціалізації популяції, чи в ході її еволюції завжди є ймовірність отримати ряд «поганих» особин (3), які не задовольняють умову (4).

Для врахування цього використовується або метод штрафних функцій, або метод відновлення, який і буде використано в роботі. Процедура відновлення зводиться до видалення випадковим чином елементів з рюкзака доти, доки не буде задоволено обмеження (4).

Після відновлення функція пристосованості буде такою:

$$f(X') = \sum_{i=1}^N p_i x'_i,$$

де  $X' = \{x'_1, x'_2, x'_3, \dots, x'_N\}$  — відновлена версія бінарного вектора  $X$ .

Дослідження показали, що жадібний алгоритм відновлення, коли всі речі, що пакуються, сортуються відповідно до вагових коефіцієнтів  $p_i/\omega_i$  та видаляються з рюкзака відповідно до їх росту, веде до зменшення різноманітності популяції. Наслідком цього є зменшення ефективності глобального пошуку та погіршення кінцевих результатів.

Процедура відновлення в QGA принципово інша, ніж в генетичному алгоритмі, бо потребує коригування і квантової хромосоми. Вона може бути розбита на два етапи і потребувати значних обчислювальних ресурсів. Відсоток відновлених особин може змінюватися від 0 до 100% і є одним з параметрів роботи оператора. Надалі для простоти реалізації вважатимемо, що відновлюються всі хромосоми, що не задовольняють умову за масою (4).

На першому традиційному етапі, якщо рюкзак надто важкий, елементи видаляються з нього доти, доки не буде задоволено обмеження (4). Якщо рюкзак занадто легкий, то процедура відновлення додає елементи в рюкзак доти, доки це дозволяє обмеження маси.

Схематично перший етап можна подати у вигляді такого алгоритму.

### Алгоритм 3. Відновлення класичної хромосоми $P(t)$

```

1  переповнення_рюкзака=false
2  if  $\left(\sum_{i=1}^N \omega_i x_i > C\right)$  then переповнення_рюкзака=true
3  while (переповнення_рюкзака=true)
4       $i = \text{random}\{1..N\}$  – вибір випадковим чином пред-
мета з рюкзака
5       $x_i = 0$  – видалення предмета із рюкзака
6      if  $\left(\sum_{i=1}^N \omega_i x_i \leq C\right)$  then переповнення_рюкзака=false
7  end while
8  for  $i$  in  $\{1, 2, \dots, N\}$ 
9      if  $\left(\sum_{i=1}^N \omega_i x_i + \omega_i > C\right)$  OR  $(x_i = 0)$  then continue
10      $x_i = 1$ 
11  end for

```

Етапи 2–7 відповідають за видалення випадковим чином елементів із рюкзака, поки не виконається обмеження (4). На етапах 8–11, якщо це можливо, у рюкзак послідовно додаються додаткові елементи.

На другому етапі необхідно відкоригувати амплітуди ймовірності квантової хромосоми відповідно до відновленої хромосоми  $X'$ . Процес відновлення реалізовано у вигляді такого алгоритму:

**Алгоритм 4.** Відновлення квантової хромосоми  $Q(t)$

```

1  for  $i$  in  $\{1, 2, \dots, N\}$ 
2    if  $(x_i = 1)$ 
3       $\alpha_i^0 = \beta$ 
4       $\alpha_i^1 = \sqrt{1 - \beta^2}$ 
5    end if
6    if  $(x_i = 0)$ 
7       $\alpha_i^0 = \sqrt{1 - \beta^2}$ 
8       $\alpha_i^1 = \beta$ 
9    end if
10 end for

```

Тут  $\beta \in [0, 1]$  — параметр роботи алгоритму. Проведені дослідження показали, що він не залежить від розміру системи  $N$ , а вплив його значення на ефективність роботи QGA ілюструє рис. 1. Рівень кореляції вхідних даних не впливає на параметр  $\beta$  і оптимальним в подальших моделюваннях в даній роботі припускається  $\beta = 0,971$ .

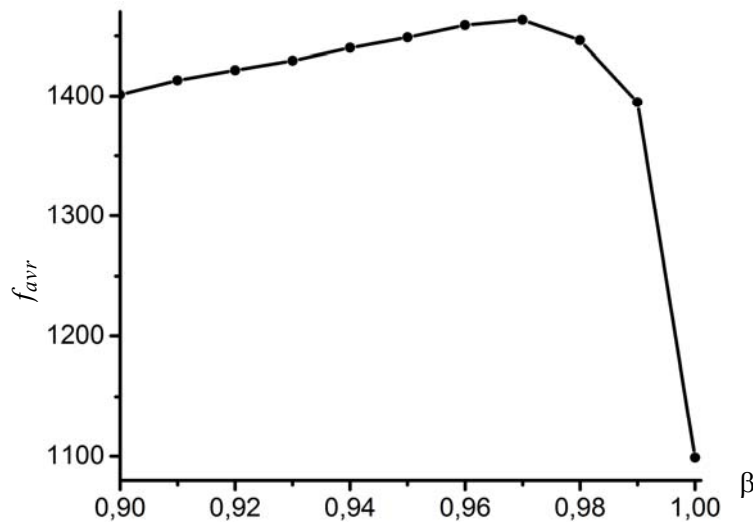


Рис. 1. Вплив  $\beta$  на середню за 100 запусками QGA пристосованість найкращої особи для  $N = 100$  слабкорельованих вхідних даних

## РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЛОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

QGA реалізовано мовою програмування C++, моделювання виконано на процесорі Intel Celeron CPU G1840 2,80 GHz, 4,0 Гбіт оперативної пам'яті. Для ілюстрації ефективності роботи алгоритму розглянуто ряд задач комбінаторної оптимізації різної розмірності та ступеня кореляції вхідних даних.

Потужність популяції  $s$  у QGA є важливим параметром роботи та критичним особливо за великих значень  $N$ : чим більше його значення, тим більшою має бути різноманітність потенційних розв'язків, що охоплюють всю область пошуку. Надалі для реалізації QGA взято  $s = 10$ , що забезпечує 5000 звернень до функції пристосованості у процесі еволюції в часі  $t = 500$ .

Наведені нижче параметри, де це не оговорено окремо, оцінено як результат усереднення за 1000 запусками алгоритму. Ефективність роботи оцінено за середньою пристосованістю найкращої особини популяції  $f_{avr}$  та середньоквадратичним відхиленням  $f_{sd}$ . Їх типову поведінку в часі показано на рис. 2 і 3.

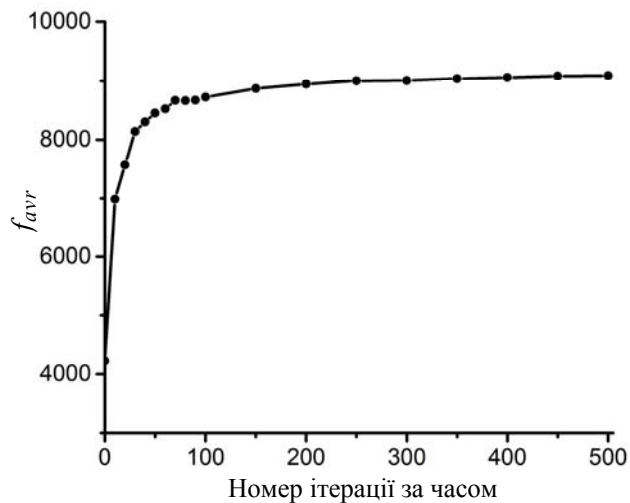


Рис. 2. Усереднена за 100 запусками алгоритму еволюція середньої пристосованості найкращої особини  $f_{avr}$  для  $N = 100$  нескорельованих вхідних даних

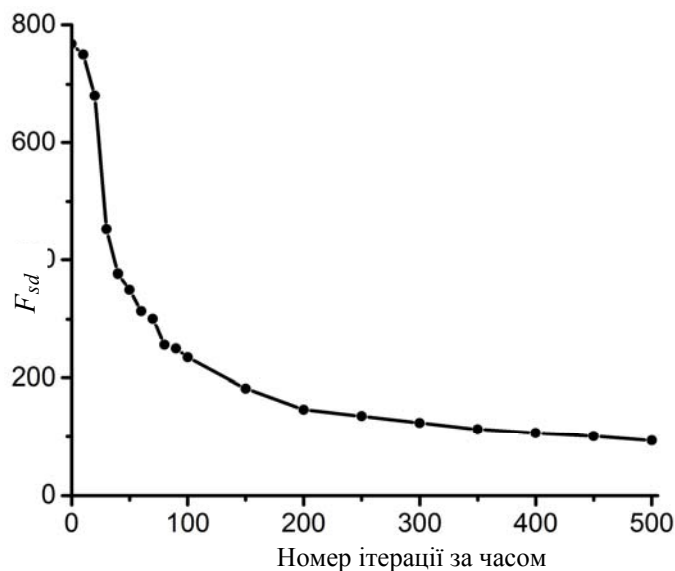


Рис. 3. Усереднена за 100 запусками алгоритму еволюція середньоквадратичного відхилення найкращої особини  $f_{sd}$  для  $N = 100$  нескорельованих вхідних даних

Ініціалізована на початку популяція ( $t = 0$ ) включає всі розв'язки з однаковою ймовірністю (рис. 4). Це означає, що робота QGA починається з випадкового пошуку, а окремі піки на розподілі зумовлені дискретним характером оптимізації та роботою оператора відновлення квантової хромосоми.

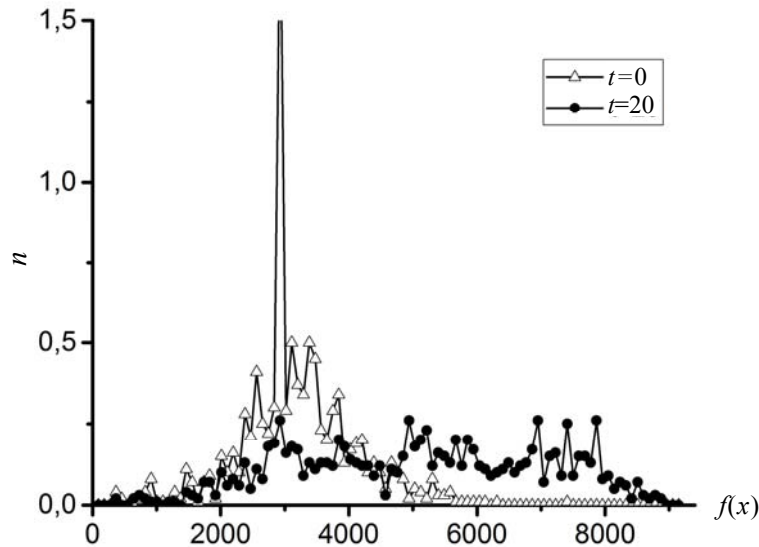


Рис. 4. Розподіл особин популяції по області пошуку на початкових етапах еволюції

У міру еволюції в часі характер розподілу зазнає принципових змін (рис. 5).

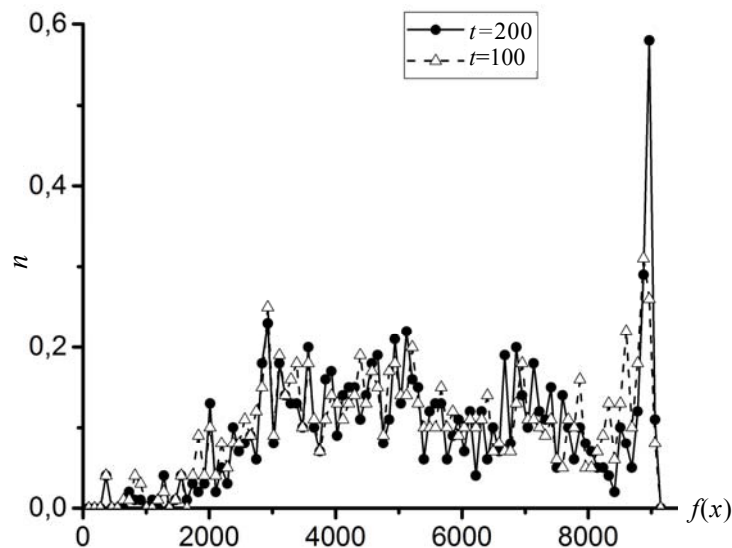


Рис. 5. Розподіл особин популяції по області пошуку на кінцевих етапах еволюції

Зростає ймовірність знаходження особини в області точного розв'язку, який в розгляданому випадку дорівнює 9147. Велика їх кількість тут веде до ефективного локального пошуку за рахунок квантового гейту. Оператор відновлення квантової хромосоми забезпечує різноманітність популяції.

Так, у разі його вилучення із QGA, як показують результати дослідження, різноманітність популяції набагато менша. У результаті зростає ймовірність потрапляння в локальні оптимуми та зменшується ефективність глобального пошуку.

Підсумовуючи, можна відзначити, що QGA починає свою роботу з глобального пошуку та автоматично переходить до локального завдяки зміні структурних характеристик розподілу особин популяції.

Статистичні результати, включаючи середнє значення найкращої особини популяції  $f_{avr}$ , його середньоквадратичне відхилення  $f_{sd}$ , найкращий та найгірший результати, середній час роботи алгоритму  $t_{avr}$ , отримані під час комбінаторної оптимізації тестових завдань різної розмірності, зведено в табл. 1 і 2.

**Таблиця 1.** Результати оптимізації тестових задач малої розмірності

Розмірність $N$	$f_{avr}$	$t_{avr}$ , с	Точне значення
4	35	0,0015	35
10	52	0,0039	52
15	481	0,0061	481
20	1024	0,0078	1024
23	9767	0,0093	9767

**Таблиця 2.** Результати оптимізації тестових задач великої розмірності

Нескорельовані дані						
$N$	$f_{avr}$	$f_{sd}$	$t_{avr}$ , с	Найкраще значення	Найгірше значення	Точне значення
100	9084,1	98,2	0,049	9147	8628	9147
200	10763,0	331,9	0,111	11227	8861	11238
200*	11178,0	68,28	0,591	11238	10814	
500	14668,0	942,2	0,284	18551	12012	28857
500*	16963,0	908,3	1,454	20127	14539	
Слабоскорельовані дані						
100	1462,5	51,7	0,050	1514	1208	1514
200	1476,7	31,28	0,114	1600	1387	1634
200*	1530,5	25,11	0,602	1624	1449	
500	3283,8	84,49	0,276	3635	3044	4566
500*	3448,2	77,80	1,434	3805	3161	
Сильноскорельовані дані						
100	2338,4	48,74	0,050	2397	2292	2397
200	2552,5	72,68	0,110	2697	2297	2697
200*	2628,4	58,10	0,599	2697	2397	
500	5065,7	156,0	0,271	5712	4715	7117
500*	5394,7	151,98	1,447	5914	4917	

\* Моделювання виконано за розміру популяції 50 особин.

Як впливає з наведених результатів, середній час роботи  $t_{avr}$  залежить лише від розміру області пошуку, яка визначається розміром квантової хромосоми  $N$ .

Роль оператора відновлення ілюструють дані табл. 3. Така реалізація QGA потребує підбору параметра  $\mu$  та показує значно гірші результати. Використання операції відновлення квантової хромосоми веде до збільшення часу роботи алгоритму майже в два рази.

**Таблиця 3.** Результати оптимізації тестових задач великої розмірності в разі реалізації QGA без оператора відновлення квантової хромосоми ( $s = 10$ )

Розмірність $N$	$f_{avr}$	$f_{sd}$	$t_{avr}, c$
<b>Нескорельовані дані</b>			
100	8253,9	486,6	0,027
200	8758,0	701,1	0,055
500	14425,0	1472,1	0,145
<b>Слабоскорельовані дані</b>			
100	1271,9	93,3	0,027
200	1297,9	82,9	0,054
500	3004,4	145,3	0,135
<b>Сильноскорельовані дані</b>			
100	2065,3	112,3	0,028
200	2147,0	123,6	0,055
500	4359,1	210,2	0,135

У цілому отримані результати порівняно з даними, доступними в літературі [6, 14], показують підвищення ефективності QGA за рахунок використання запропонованих квантових операторів.

## ВИСНОВКИ

У роботі побудовано новий QGA та проілюстровано ефективність його роботи з використанням набору тестових даних різної розмірності та рівня кореляції. Запропонований підхід ілюструє хорошу можливість глобального пошуку завдяки використанню процедури відновлення квантової хромосоми та оператора квантового вимірювання. Швидка локальна збіжність забезпечується адаптованим алгоритмом роботи оператора квантового гейту, який для своєї реалізації не потребує використання таблиці пошуку.

Експериментальні результати 0–1 задачі пакування рюкзака ілюструють можливості застосування QGA до задач різної розмірності. Результати, отримані за значних розмірів досліджуваних систем ( $N = 500$ ), указують на необхідність збільшення розміру популяції та пошуку додаткових методів поліпшення роботи алгоритму, що буде предметом наступних досліджень.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Holland J.H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence / J.H. Holland. — Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, 1975.
2. Whitley Darrell. A genetic algorithm tutorial / Darrell Whitley. — Statistics and computing. — 1994. — Vol. 4, N 2. — P. 65–85.

3. Michalewicz Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs / Z. Michalewicz // New York: Springer, 3rd (extended) edition, 1996.
4. Jantos P. Evolutionary algorithms for global parametric fault diagnosis in analogue integrated circuits / P. Jantos, D. Grzechca, J. Rutkowski // Bull. Pol. Ac.: Tech. — 2012. — Vol. 60, N 1. — P. 133–142.
5. Han K.-H. Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem / K.-H. Han, J.-H. Kim // Proceedings of IEEE Congress on Evolutionary Computation, USA. — 2000. — Vol. 2. — P. 1354–1360.
6. Nowotniak R. Higher-Order Quantum-Inspired Genetic Algorithms / R. Nowotniak, J. Kucharski // Federated Conference on Annals of Computer Science and Information Systems. — 2014. — P. 465–470.
7. Jopek Ł. Zastosowanie kwantowych algorytmów genetycznych do selekcji cech / Ł. Jopek, R. Nowotniak, M. Postolski et al. // Automatyka, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. — 2009. — Vol.13, N 3. — P. 1219–1231.
8. Talbi H. A Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for Multiobjective Image Segmentation / H. Talbi, M. Batouche, A. Draa // International Journal of Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 2007. — Vol. 1, N 2. — P. 109–114.
9. Li B.B. A hybrid quantum-inspired genetic algorithm for multiobjective flow shop scheduling / B.B. Li, L. Wang // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics. — 2007. — Vol. 37, N 3. — P. 576–591.
10. Lau T. Quantum-inspired evolutionary algorithm approach for unit commitment / T. Lau, C. Chung, K. Wong, T. Chung, S. Ho // IEEE Trans. on Power Systems. — 2009. — Vol. 24, N 3. — P. 1503–1512.
11. Su-Hua L. Application of quantum-inspired evolutionary algorithm in reactive power optimization / L. Su-Hua, W. Yao-Wu, P. Lei, X. Xin-Yin // Relay. — 2005. — Vol. 33. — P. 30–35.
12. Narayanan A. Quantum-inspired genetic algorithms / A. Narayanan, M. Moore // IEEE Evolutionary Computation. — 1996. — Vol.1. — P. 61–66.
13. Wang H. The improvement of quantum genetic algorithm and its application on function optimization / H. Wang, J. Liu, J. Zhi, C. Fu // Math. Probl. Eng. — 2013. — Vol. 2013. — P. 1–10.
14. Kuk-Hyun Han. Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for a Class of Combinatorial Optimization / Kuk-Hyun Han, Jong-Hwan Kim // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. — 2002. — Vol. 6, N 6. — P. 580–593.

Надійшла 12.04.2018



**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОЇ  
ВЗАЄМОДІЇ ДВОХ ЕЛЕКТРОПРУЖНИХ ПІВПРОСТОРІВ  
ПІД ЧАС СТИСКАННЯ ЗА НАЯВНОСТІ ЖОРСТКОГО  
ДИСКОПОДІБНОГО ВКЛЮЧЕННЯ МІЖ НИМИ**

**В.С. КИРИЛЮК, О.І.ЛЕВЧУК, О.В. ГАВРИЛЕНКО**

**Анотація.** Розвинено математичну модель для аналізу контактної взаємодії двох електропружних трансверсально-ізотропних півпросторів під час стискання за наявності жорсткого дископодібного включення сталої товщини між ними. Модель базується на використанні зв'язаної системи рівнянь електропружності для кожного з п'єзоелектричних півпросторів. Аналітичний розв'язок задачі отримано за допомогою загального подання розв'язків рівнянь електропружності на основі гармонічних функцій, зведення задачі до розгляду інтегрального рівняння і розкладу шуканої функції за малим параметром. Як окремий випадок з отриманих виразів впливають параметри контакту для двох пружних трансверсально-ізотропних півпросторів (за наявності включення між ними). Проведено числові дослідження, вивчено вплив зв'язаності силових і електричних полів на параметри контактної взаємодії.

**Ключові слова:** математичне моделювання, зв'язана система рівнянь електропружності, п'єзоелектричний півпростір, жорстке дископодібне включення, параметри контактної взаємодії.

**ВСТУП**

У різних галузях промисловості п'єзоелектричні матеріали широко застосовуються для створення різних датчиків, перетворювачів енергії та елементів вимірювальних приладів, що, у свою чергу, потребує детального вивчення та аналізу розподілу силових і електричних полів у електропружних тілах поблизу концентраторів напружень, а також під час їх контактної взаємодії. У той же час розв'язання просторових задач електропружності є надто складною математичною проблемою, оскільки базова система рівнянь для знаходження напруженого і електричного станів є зв'язаною системою диференціальних рівнянь у частинних похідних [1–5, 10, 12, 16]. Натепер найбільш повно досліджено двовимірні задачі електропружності (з урахуванням зв'язаності силових та електричних полів) [6, 8, 9, 14, 17]. Для випадку трансверсально-ізотропних властивостей електропружного матеріалу у працях [12, 15] запропоновано підходи до побудови загальних розв'язків системи зв'язаних рівнянь електропружності за допомогою гармонічних функцій.

Контактна взаємодія для двох пружних ізотропних півпросторів під час стискання за наявності жорсткого дископодібного включення між тілами вивчалась у працях [7, 11, 13]. Але моделювання контактної взаємодії для двох електропружних тіл (за наявності між ними включення) є проблемою значно складнішою, оскільки необхідно розв'язувати систему зв'язаних рівнянь електропружності, у яку входять по десять незалежних сталих для кожного п'єзоелектричного матеріалу півпростору, у той час, як пружні властивості ізотропного матеріалу залежать тільки від двох пружних сталих, а система рівнянь пружності містить лише три рівняння і має значно простішу структуру від системи рівнянь електропружності.

У цій роботі на основі математичного моделювання, яке враховує зв'язаність силових і електричних полів у п'єзоелектричному матеріалі, вивчено контактну взаємодію двох п'єзоелектричних півпросторів під час стискання за наявності між ними жорсткого дископодібного включення сталої товщини. У постановці задачі припускається, що поверхня поділу двох електропружних тіл розташована у площині ізотропії кожного п'єзоелектричного матеріалу і вважається, що під час контактної взаємодії відбувається гладкий (без тертя) контакт. За допомогою подання розв'язку рівнянь електропружності через гармонічні функції, зведення задачі до інтегрального рівняння та розкладу шуканої функції за малим параметром отримано аналітичний розв'язок задачі, знайдено параметри контактної взаємодії півпросторів (за наявності дископодібного включення між ними). Зі знайдених виразів впливають параметри контактної взаємодії двох пружних трансверсально-ізотропних півпросторів за наявності включення, а також параметри контакту двох пружних ізотропних півпросторів [7].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянути математичну модель, за допомогою якої вивчити контактну взаємодію двох різних за властивостями електропружних трансверсально-ізотропних півпросторів під час стискання, між якими розташоване жорстке дископодібне включення сталої товщини (рис. 1).

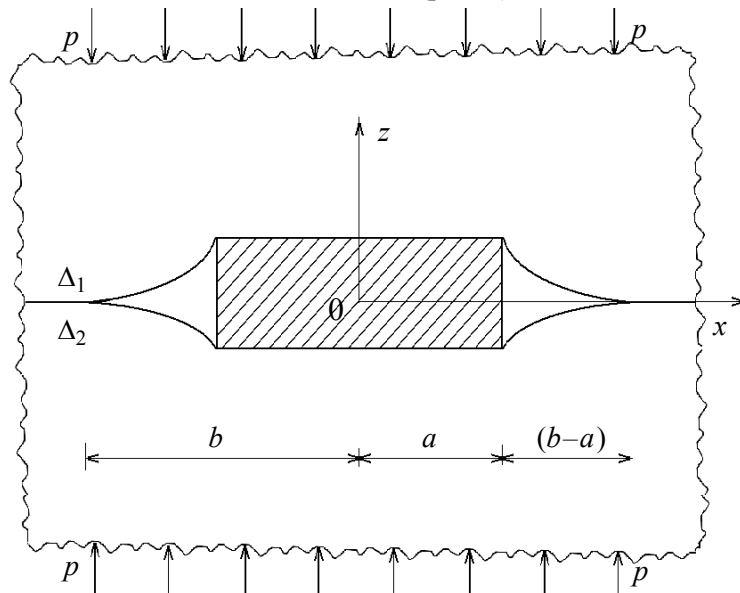


Рис. 1. Контактна взаємодія двох електропружних півпросторів за наявності жорсткого дископодібного включення між ними

Припускаємо, що площина  $z = 0$  (рис. 1), яка обмежує два півпростори, є площиною ізотропії кожного з електропружних трансверсально-ізотропних матеріалів, тобто вісь  $Oz$  — вісь симетрії кожного з п'єзоелектричних матеріалів. Вважаємо, що поверхні півпросторів є неелектродованими (не містять електродного покриття) і в площині контактної взаємодії  $z = 0$  виконуються умови гладкого (без тертя) контакту. При цьому розміри ділянки розшарування двох електропружних півпросторів (рис. 1) є невідомими і визначаються під час розв'язання задачі контактної взаємодії. Параметри контактної взаємодії п'єзоелектричних тіл залежать від значення стискальних зусиль  $p$ , електропружних властивостей двох п'єзоелектричних матеріалів (усього двадцять незалежних величин) і двох геометричних параметрів жорсткого включення (його радіуса і товщини).

Електропружний стан у кожному з п'єзоелектричних півпросторів подамо суперпозицією основного (пов'язаного зі стискальними навантаженнями) та збуреного станів. Для знаходження збуреного стану в кожному з електропружних півпросторів у площині  $z = 0$  отримуємо такі умови:

$$\begin{aligned} u_z^{(1)}(r,0) &= \Delta_1, 0 \leq r \leq a; \\ \sigma_{zz}^{(1)}(r,0) &= p, a < r < b; \\ \sigma_{rz}^{(1)}(r,0) &= \sigma_{rz}^{(2)}(r,0) = 0, 0 < r < \infty; \\ u_z^{(2)}(r,0) &= -\Delta_2, 0 \leq r \leq a; \\ \sigma_{zz}^{(2)}(r,0) &= p, a < r < b; \\ \sigma_{zz}^{(1)}(r,0) &= \sigma_{zz}^{(2)}(r,0), b \leq r < \infty; \\ u_z^{(1)}(r,0) &= u_z^{(2)}(r,0), b \leq r < \infty; \\ D_z^{(1)}(r,0) &= D_z^{(2)}(r,0) = 0, 0 \leq r < \infty; \end{aligned} \tag{1}$$

$$\Delta_1 + \Delta_2 = \Delta,$$

де індекси «1» і «2» відповідають першому і другому п'єзоелектричному півпростору;  $p$  — величина стискальних зусиль;  $\Delta$  і  $a$  — товщина і радіус дископодібного включення; значення  $b - a$  відповідає розміру зони розшарування між півпросторами, що викликане наявністю включення. Із наведених граничних умов у площині поділу умови (1) відповідають умовам відсутності дотичних напружень на всій поверхні поділу, умови (2), (3) — умовам ідеального механічного контакту поза зоною розшарування матеріалу, вирази (4) — умовам відсутності електродного покриття на поверхнях півпросторів. Для того щоб дослідити задачу на основі використовуваної математичної моделі, необхідно знайти розв'язки рівнянь електропружності в кожному з п'єзоелектричних півпросторів, що задовольняють наведені вище граничні умови на поверхні поділу електропружних матеріалів. Суперпозиція основного і збуреного станів приводить до виконання умови вільної від навантажень (силових та

електричних) поверхні зони розшарування, а саме:  $\sigma_{zz}^{(0)}(r,0) + \sigma_{zz}^{(1)}(r,0) = -p + p = 0$  і  $D_z^{(0)}(r,0) + D_z^{(1)}(r,0) = 0$ , якщо  $a < r \leq b$ . Цілком аналогічні вирази отримуємо і для другого півпростору. Для завершення побудови математичної моделі наведемо рівняння статички для електропружних трансверсально-ізотропних тіл, що враховують зв'язаність силових і електричних полів у п'єзоелектричному матеріалі.

### ОСНОВНІ РІВНЯННЯ І СПІВВІДНОШЕННЯ

Статичні рівняння електропружності для п'єзоелектричного тіла щодо компонентів вектора переміщень і електричного потенціалу можна подати у вигляді [12]

$$\begin{aligned} c_{11}^E u_{x,xx} + \frac{1}{2}(c_{11}^E - c_{12}^E)u_{x,yy} + c_{44}^E u_{x,zz} + \frac{1}{2}(c_{11}^E + c_{12}^E)u_{y,xy} + (c_{13}^E + c_{44}^E)u_{z,xz} + \\ + (e_{31} + e_{15})\Psi_{,xz} = 0; \\ c_{11}^E u_{y,yy} + \frac{1}{2}(c_{11}^E - c_{12}^E)u_{y,xx} + c_{44}^E u_{y,zz} + \frac{1}{2}(c_{11}^E + c_{12}^E)u_{x,xy} + (c_{13}^E + c_{44}^E)u_{z,yz} + \\ + (e_{31} + e_{15})\Psi_{,yz} = 0; \\ (c_{13}^E + c_{44}^E)(u_{x,xz} + u_{y,yz}) + c_{44}^E(u_{z,xx} + u_{z,yy}) + c_{33}^E u_{z,zz} + \\ + e_{15}(\Psi_{,xx} + \Psi_{,yy}) + e_{33}\Psi_{,zz} = 0. \\ (e_{13} + e_{15})(u_{x,xz} + u_{y,yz}) + e_{15}(u_{z,xx} + u_{z,yy}) + \\ + e_{33}u_{z,zz} - \varepsilon_{11}^S(\Psi_{,xx} + \Psi_{,yy}) - \varepsilon_{33}^S\Psi_{,zz} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

У рівняннях (5) використано такі позначення:  $c_{11}^E, c_{12}^E, c_{13}^E, c_{33}^E, c_{44}^E$  — незалежні модулі пружності;  $e_{31}, e_{15}, e_{33}$  — п'єзомодулі;  $\varepsilon_{11}^S, \varepsilon_{33}^S$  — діелектричні проникності. Отже, електропружні властивості п'єзоелектричного трансверсально-ізотропного матеріалу характеризуються десятьма незалежними сталими.

Розв'язок системи рівнянь (5) відповідно до праці [12] можна подати чотирма потенціальними функціями  $\Phi_j$  ( $j = \overline{1,4}$ ):

$$u_x = \sum_{j=1}^3 \Phi_{j,x} + \Phi_{4,y}; \quad u_y = \sum_{j=1}^3 \Phi_{j,y} - \Phi_{4,x}; \quad u_z = \sum_{j=1}^3 k_j \Phi_{j,z}; \quad \Psi = \sum_{j=1}^3 l_j \Phi_{j,z}, \quad (6)$$

де  $k_j, l_j$  — деякі сталі, а функції  $\Phi_j$  задовольняють рівняння

$$\Phi_{j,xx} + \Phi_{j,yy} + v_j \Phi_{j,zz} = 0 \quad (j = \overline{1, 2, 3}), \quad (7)$$

$v_4 = 2c_{44}^E / (c_{11}^E - c_{12}^E)$ , а значення  $v_i$  ( $i = \overline{1, 2, 3}$ ) згідно з працею [12] є коренями алгебричного рівняння третього порядку:

$$\begin{aligned} &v^3(A_1B_2 - C_1D_2) + v^2(A_1B_3 + A_2B_2 - C_1D_3 - C_2D_2) + \\ &+ v(A_2B_3 + A_3B_2 - C_2D_3 - C_3D_2) + A_3B_3 - C_3D_3 = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Значення  $k_j, l_j$  ( $j=1,2,3$ ) у виразах (6) пов'язані з величинами  $v_j$  такими співвідношеннями:

$$\frac{a_j + c_{13}^E k_j + e_{31} l_j}{c_{11}^E} = \frac{c_{33}^E k_j + e_{33} l_j}{c_{13}^E + a_j} = \frac{c_{33}^E k_j - \varepsilon_{33}^S l_j}{e_{31} + d_j} = v_j, \quad (j=1,2,3); \quad (9)$$

$$a_j = c_{44}^E(1 + k_j) + e_{15} l_j; d_j = e_{15}(1 + k_j) - \varepsilon_{11}^S l_j, \quad (j=1,2,3,4). \quad (10)$$

У разі використання позначень  $z_j = zn_j^{-1/2}$  ( $j=1,4$ ) функції  $\Phi_1(x, y, z_1)$ ,  $\Phi_2(x, y, z_2)$ ,  $\Phi_3(x, y, z_3)$ ,  $\Phi_4(x, y, z_4)$  згідно з рівняннями (7) стають гармонічними функціями у відповідних системах координат. Надалі формули (8)–(10) будуть використані для обчислень.

## МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ

Для побудови розв'язку граничної задачі електропружності скористаємося поданням (6), згідно з яким потенціальні функції  $\Phi_i(x, y, z_i)$  (для кожного півпростору з урахуванням електропружних сталих електропружного матеріалу) візьмемо у вигляді

$$\Phi_i(x, y, z_i) = \alpha_i^* F_i^*(x, y, z_i), \quad (i=1, 2, 3); \quad \Phi_4 \equiv 0. \quad (11)$$

Сталі  $\alpha_i^*$  у виразах потенціальних функцій згідно з формулами (11) визначимо з такої системи лінійних алгебричних рівнянь:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^3 \alpha_j^* (c_{44}^E(1 + k_j) + e_{15} l_j) &= 1; \quad \sum_{j=1}^3 \alpha_j^* (c_{44}^E(1 + k_j) + e_{15} l_j) / \sqrt{v_j} = 0; \\ \sum_{j=1}^3 \alpha_j^* (e_{15}(1 + k_j) - \varepsilon_{11}^S l_j) &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Під час вибору сталих  $\alpha_i^*$  згідно з формулами (12) задовольняються граничні умови за дотичними напруженнями та умови відсутності електродного покриття на поверхнях півпросторів уздовж усієї поверхні поділу, а також умови рівності нормальних компонентів напружень поза зоною розшарування матеріалів. Для граничних умов, що залишилися, використовуючи потенціальні функції на основі функцій  $F_1^*(x, y, z_i)$  і  $F_2^*(x, y, z_i)$  (функції для першого та другого електропружних півпросторів) з урахуванням системи рівнянь (12), отримуємо умови в площині  $z=0$  стосовно невідомих гармонічних функцій  $F_1^*(x, y, z)$  і  $F_2^*(x, y, z)$ :

$$\sum_{j=1}^3 \alpha_j^{(1)*} \frac{k_j^{(1)}}{\sqrt{v_j^{(1)}}} \frac{\partial F_1^*}{\partial z}(r, 0) = \Delta_1, \quad 0 \leq r \leq a; \quad \frac{\partial^2 \partial F_1^*}{\partial z^2}(r, 0) = p, \quad a < r < b;$$

$$\sum_{j=1}^3 \alpha_i^{(2)*} \frac{k_j^{(2)}}{\sqrt{v_j^{(2)}}} \frac{\partial F_2^*}{\partial z}(r,0) = -\Delta_2, \quad 0 \leq r \leq a; \quad \frac{\partial^2 F_2^*}{\partial z^2}(r,0) = p, \quad a < r < b; \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^3 \alpha_i^{(1)*} \frac{k_j^{(1)}}{\sqrt{v_j^{(1)}}} \frac{\partial F_1^*}{\partial z} = \sum_{j=1}^3 \alpha_i^{(2)*} \frac{k_j^{(2)}}{\sqrt{v_j^{(2)}}} \frac{\partial F_2^*}{\partial z}, \quad b \leq r < \infty;$$

$$\frac{\partial^2 F_1^*}{\partial z^2}(r,0) = \frac{\partial^2 F_2^*}{\partial z^2}(r,0), \quad b \leq r < \infty, \quad \Delta_1 + \Delta_2 = \Delta.$$

Розглянемо для порівняння більш просту задачу теорії пружності про стискання двох пружних ізотропних півпросторів, між якими розташоване дископодіне жорстке включення сталі товщини. За допомогою подання Папковича–Нейбера визначення зони розшарування для збуреного стану зводиться до пошуку двох гармонічних функцій  $f_1^*(x, y, z)$  і  $f_2^*(x, y, z)$ , для знаходження яких отримуємо у площині поділу матеріалів  $z=0$  граничні умови, що цілком аналогічні всім наведеним формулам (13). Відмінність полягає у тому, що в цих виразах замість множників  $\sum_{j=1}^3 \alpha_i^{(1)*} k_j^{(1)} / \sqrt{v_j^{(1)}}$  і

$\sum_{j=1}^3 \alpha_i^{(2)*} k_j^{(2)} / \sqrt{v_j^{(2)}}$  використовуються вирази  $(1-\nu_1)/\mu_1$  і  $(1-\nu_2)/\mu_2$ , де

$\nu_1, \nu_2$  — коефіцієнти Пуассона, а  $\mu_1, \mu_2$  — модулі зсуву для матеріалів першого і другого пружних півпросторів відповідно. Виходячи з відповідності між розв’язками пружної та електропружної задач, що розглядаються, надалі використаємо схему розгляду більш простої пружної задачі.

Згідно з результатами пружної задачі [7] та встановленої відповідності задачу контактної взаємодії двох електропружних півпросторів (за наявності жорсткого плоского дископодібного включення між ними) зводимо до розв’язання інтегрального рівняння для знаходження невідомого значення  $c = b/a$ , тобто невідомої ділянки розшарування матеріалів. Маємо

$$\begin{aligned} & \varphi(\eta) + \frac{2}{\pi^2} \int_0^1 \frac{\varphi(\xi)}{(\xi^2 - \eta^2)} \left( \eta \ln \left[ \frac{c - \eta}{c + \eta} \right] - \xi \ln \left[ \frac{c - \xi}{c + \xi} \right] \right) d\xi = \\ & = \frac{\Delta}{ap(1 + \alpha) \sum_{j=1}^3 \alpha_i^{(1)*} \frac{k_j^{(1)}}{\sqrt{v_j^{(1)}}}} + \frac{2}{\pi} (1 - \eta^2) \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{c^2 - 1}{1 - \eta^2} \right), \quad 0 < \eta < 1 \end{aligned} \quad (14)$$

з додатковою умовою, що характеризує відсутність сингулярної складової у зоні розшарування матеріалів, якщо  $r = b$ :

$$\frac{2c}{\pi} \int_0^1 \frac{\varphi(\xi)}{(c^2 - \xi^2)} d\xi + (c^2 - 1)^{1/2} = 0,$$

$$\text{де } \eta = r/a, \quad c = b/a, \quad \alpha = \left( \sum_{j=1}^3 \alpha_i^{(2)*} \frac{k_j^{(2)}}{\sqrt{v_j^{(2)}}} \right) / \left( \sum_{j=1}^3 \alpha_i^{(1)*} \frac{k_j^{(1)}}{\sqrt{v_j^{(1)}}} \right).$$

Далі, на основі розкладу за малим параметром  $\varepsilon = a/b = 1/c < 1$  шуканої функції, що входить до інтегрального рівняння (14) (цілком аналогічно випадку контакту двох пружних ізотропних півпросторів [7]), наближений розв'язок інтегрального рівняння з додатковою умовою можна отримати аналітично за допомогою розв'язання алгебричного рівняння п'ятого порядку:

$$\frac{\Omega_1(\varepsilon)}{(1+\alpha)} \left( \frac{\Delta}{a} \right) - 2p \left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(1)}}{\Delta^{(1)}} \frac{k_j^{(1)}}{\sqrt{v_j^{(1)}}} \right) \frac{\Omega_2(\varepsilon)}{\varepsilon} = 0; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Omega_1(\varepsilon) = & \frac{4}{\pi} \varepsilon + \frac{16}{\pi^3} \varepsilon^2 + \varepsilon^3 \left( \frac{64}{\pi^5} + \frac{4}{3\pi} \right) + \varepsilon^4 \left( \frac{80}{9\pi^3} + \frac{256}{\pi^7} \right) + \\ & + \varepsilon^5 \left( \frac{448}{9\pi^5} + \frac{1024}{\pi^9} + \frac{4}{5\pi} \right) + O(\varepsilon^6); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Omega_2(\varepsilon) = & 1 - \frac{4}{\pi^2} \varepsilon - \frac{16}{\pi^4} \varepsilon^2 - \varepsilon^3 \left( \frac{64}{\pi^6} + \frac{1}{8} \right) - \varepsilon^4 \left( \frac{16}{3\pi^4} + \frac{4}{\pi^2} \left( \frac{1}{24} - \frac{8}{9\pi^2} + \frac{64}{\pi^6} + \frac{4}{9\pi^3} \right) \right) - \\ & - \varepsilon^5 \left( \frac{16}{\pi^4} \left( \frac{1}{24} + \frac{64}{\pi^6} - \frac{8}{9\pi^3} + \frac{8}{9\pi^2} \right) + \frac{256}{9\pi^6} - \frac{4}{15\pi^2} \right) + O(\varepsilon^6). \quad (16) \end{aligned}$$

Знайдене з алгебричного рівняння значення  $\varepsilon = a/b$ , що отримуємо з формул (15), (16), визначає розміри зони розшарування між двома п'езоелектричними півпросторами (за наявності дископодібного жорсткого включення сталої товщини між ними) під час стискання. Розміри заглиблення включення у відповідний півпростір залежать від електропружних властивостей матеріалів обох півпросторів і визначаються співвідношенням

$$\frac{1}{\left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(1)}}{\Delta^{(1)}} \frac{k_j^{(1)}}{\sqrt{v_j^{(1)}}} \right)} \Delta_1 = \frac{1}{\left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(2)}}{\Delta^{(2)}} \frac{k_j^{(2)}}{\sqrt{v_j^{(2)}}} \right)} \Delta_2.$$

Тобто заглиблення включення у перший півпростір пропорційне значенню

$$\left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(1)}}{\Delta^{(1)}} \frac{k_j^{(1)}}{\sqrt{v_j^{(1)}}} \right), \quad \text{а заглиблення у другий півпростір — значенню}$$

$$\left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(2)}}{\Delta^{(2)}} \frac{k_j^{(2)}}{\sqrt{v_j^{(2)}}} \right).$$

Із формул (15) отримуємо співвідношення, що пов'язує значення стискальних навантажень із зоною розшарування півпросторів у вигляді

$$p = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \Omega_1(\varepsilon) / \Omega_2(\varepsilon)}{\left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(1)} k_j^{(1)}}{\Delta_j^{(1)} \sqrt{v_j^{(1)}}} \right) + \left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(2)} k_j^{(2)}}{\Delta_j^{(2)} \sqrt{v_j^{(2)}}} \right)} \left( \frac{\Delta}{a} \right) = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon \Omega_1(\varepsilon) / \Omega_2(\varepsilon)}{L^*} \left( \frac{\Delta}{a} \right), \quad (17)$$

де

$$L^* = \left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(1)} k_j^{(1)}}{\Delta_j^{(1)} \sqrt{v_j^{(1)}}} \right) + \left( \sum_{j=1}^3 \frac{\Delta_j^{(2)} k_j^{(2)}}{\Delta_j^{(2)} \sqrt{v_j^{(2)}}} \right). \quad (18)$$

За допомогою виразів (17), (18) можна знайти значення навантажень, що для відомих геометричних параметрів дископодібного включення і електропружних властивостей матеріалів півпросторів відповідають заданому розміру зони розшарування матеріалів.

### АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Залежності зони розшарування від стискальних зусиль показано на рис. 2. Вплив властивостей п'єзоелектричних матеріалів півпросторів на зону розшарування матеріалів здійснюється через множник  $L^*$ , значення якого відповідає формулам (18). У розрахунках відносна товщина дископодібного включення  $\Delta/a$  становить 0,1.

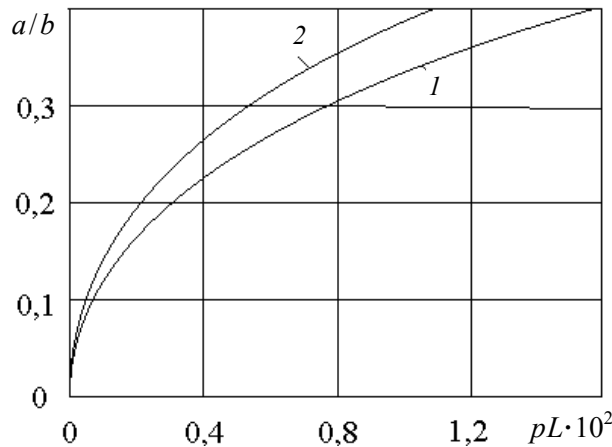


Рис. 2. Залежність зони розшарування від прикладених навантажень

Крива 1 на рис. 2 відповідає контактній взаємодії двох електропружних матеріалів PZT-4, а крива 2 — випадку стискання двох чисто пружних трансверсально-ізотропних півпросторів, пружні властивості яких збігаються з пружними властивостям п'єзокерамічного матеріалу PZT-4. Вплив зв'язаності силових і електричних полів для матеріалу PZT-4 можна оцінити, порівнюючи значення навантажень, за яких досягається однакове відношення  $a/b$  на кривих 1 і 2 (збігаються розміри зон розшарування для пружного і електропружного матеріалів). Видно, що зв'язаність силових і електричних полів збільшує зону розшарування (порівняно з чисто пружним матеріалом, який має такі самі пружні властивості, що й електропружні). Аналогічний якісний ефект характерний і для п'єзокерамічних матеріалів



PXE-5, PZT-5, PZT-7A, BaTiO<sub>3</sub>, PZT-5H, P-7, для яких виконано розрахунки, що підтверджують подібний вплив зв'язаності полів. Це означає, що до двох п'єзоелектричних півпросторів потрібно прикласти більші стискальні зусилля, ніж до двох чисто пружних трансверсально-ізотропних півпросторів, щоб отримати зони розшарування однакового розміру.

На рис. 3 зображено вплив відношення товщини включення до її радіуса  $\Delta/a$  на розмір зони розшарування матеріалів від стискальних навантажень. Для розрахунків значення  $\Delta/a$  покладались рівними 0,05 (лінія 1), 0,1 (лінія 2), 0,2 (лінія 3) і 0,3 (лінія 4).

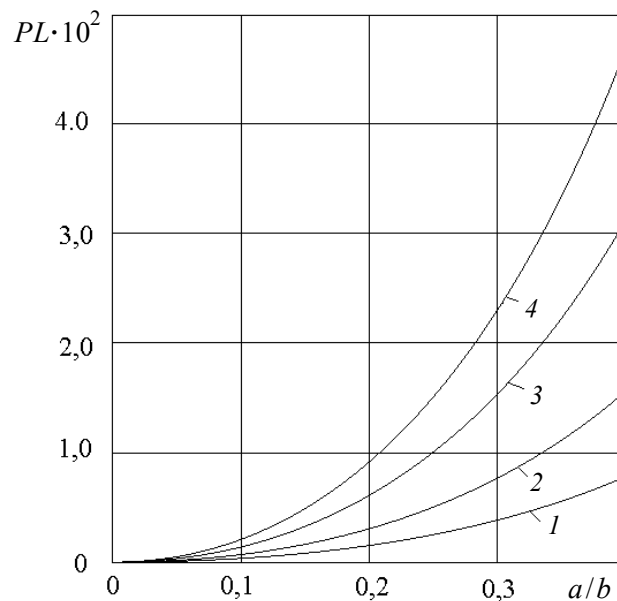


Рис. 3. Вплив товщини включення на розмір зони розшарування

Видно, що за більшої відносної товщини дископодібного жорсткого включення для досягнення такого самого значення зони розшарування, яке отримуємо для більш тонкого включення, необхідно прикласти більші за значеннями стискальні навантаження, ніж для тоншого включення.

## ВИСНОВОК

У роботі на основі математичної моделі, що враховує зв'язаність силових і електричних полів у п'єзоелектричному матеріалі, отримано аналітичний розв'язок задачі про контактну взаємодію двох електропружних півпросторів під час стискання за наявності жорсткого плоского дископодібного включення сталої товщини між ними. Досліджено вплив зв'язаності силових і електричних полів на параметри контактної взаємодії.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Гринченко В.Т. Электроупругость / В.Т. Гринченко, А.Ф. Улитко, Н.А. Шульга // Механика связанных полей в элементах конструкций: в 6 т.; Т. 1. — К.: Наук. думка, 1989. — 279 с.

2. Кирилюк В.С. Математическое моделирование контактного взаимодействия жесткой основы с приповерхностной осесимметричной выемкой и электроупругого полупространства / В.С. Кирилюк, О.И. Левчук // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2016. — № 3. — С.118–125.
3. Кирилюк В.С. Моделирование контактного взаимодействия пьезоэлектрического полупространства и упругой изотропной основы с приповерхностной выемкой кругового сечения / В.С. Кирилюк, О.И. Левчук // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2016. — № 4. — С.120–132.
4. Кирилюк В.С. Математическое моделирование и анализ напряженного состояния в ортотропной пьезоэлектрической среде с круговой трещиной / В.С. Кирилюк, О.И. Левчук, Е.В. Гавриленко // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2017. — № 3. — С.117–126.
5. Chen W.Q. 3D point force solution for a permeable penny-shaped crack embedded in an infinite transversely isotropic piezoelectric medium / W.Q. Chen, C.W. Lim // Int. J. Fract. — 2005. — **131**, N 3. — P. 231–246.
6. Dai L. Stress concentration at an elliptic hole in transversely isotropic piezoelectric solids / L. Dai, W. Guo, X. Wang // Int. J. Solids and Struct. — 2006. — **43**, N 6. — P. 1818–1831.
7. Gladwell G.M.L. On Inclusions at a Bi-Material Elastic Interface / G.M.L. Gladwell // Journal of Elasticity. — 1999. — 54, N 1. — P.27–41.
8. Kaloerov S.A. Problem of Electromagnetoviscoelasticity for Multiply Connected Plates / S.A. Kaloerov, A.A. Samodurov // International Applied Mechanics. — 2015. — **51**, N 6. — P.623–639.
9. Kaloerov S.A. Determining the intensity factors for stresses, electric-flux density, and electric-field strength in multiply connected electroelastic anisotropic media / S.A. Kaloerov // Int. Appl. Mech. — 2007. — **43**, N 6. — P. 631–637.
10. Kirilyuk V.S. Elastic state of a transversely isotropic piezoelectric body with an arbitrarily oriented elliptic crack / V.S. Kirilyuk // Int. Appl. Mech. — 2008. — **44**, N 2. — P. 150–157.
11. Kotousov A. On a rigid inclusion pressed between two elastic half spaces / A. Kotousov, L.B. Neto, A. Khanna // Mechanics of Materials. — 2014. — **68**, N 1. — P. 38–44.
12. Podil'chuk Yu.N. Representation of the general solution of statics equations of the electroelasticity of a transversally isotropic piezoceramic body in terms of harmonic functions / Yu.N. Podil'chuk // International Applied Mechanics. — 1998. — 34, N 7. — P. 623–628.
13. Selvadurai A.P.S. A unilateral contact problem for a rigid disc inclusion embedded between two dissimilar elastic half-spaces / A.P.S. Selvadurai // Q.J. Mech. Appl. Math. — 1994. — N 3. — P. 493–509.
14. Wang Y.J. The anti-plane solution for the edge cracks originating from an arbitrary hole in a piezoelectric material / Y.J. Wang, C.F. Gao, H.P. Song // Mechanics Research Communications. — 2015. — Vol. 65. — P. 17–23.
15. Wang Z.K. The general solution of three-dimension problems in piezoelectric media / Z.K. Wang, B.L. Zheng // Int. J. Solids Structures. — 1995. — **32**, N 1. — P. 105–115.

Надійшла 15.03.2018

## ФОРМУВАННЯ ЕНТРОПІЙНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ СТАНУ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ І ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНИХ БАЗ ДАНИХ У МЕЖАХ МОНІТОРИНГОВИХ СИСТЕМ

Т.В. КОЗУЛЯ, В.Ф. МОЇСЄЄВ, М.М. КОЗУЛЯ, А.В. САВЧЕНКО

**Анотація.** Обґрунтовано знання-орієнтований підхід до оцінювання та прогнозування стану складних систем. Розглянуто продукційні системи вигляду «0-стан об'єкта (системи як складові) – процес (система процесів, оператор змін стану або його підтримання) – *i*-стан об'єкта (системи)», а також питання формування інформаційного забезпечення реалізації методичної бази аналізу складних моніторингових систем. Визначено основи інформаційно-ентропійного підходу до формування моделей об'єктів дослідження з метою об'єктивного аналізу стану системних утворень природно-техногенного походження з використанням знання-орієнтованих даних і здобування нових знань. Надано інформаційну систему для збирання та зберігання інформації про моніторинговий стан об'єкта дослідження, передавання даних для формування моделі, аналізу отриманих результатів і прийняття зваженого рішення.

**Ключові слова:** складні системи, інформаційно-методичне забезпечення, ентропійно-інформаційна модель, моніторингова інформація, ентропійна функція стану, знання-орієнтована система.

### ВСТУП

Сучасні підходи до оцінювання стану складних систем різного походження ґрунтуються на експертних системах, що не дозволяє знизити втручання людського фактора. Для діагностики стану регіональних об'єктів в умовах наявності елементів невизначеності і багатокритеріальності в завданнях забезпечення сталого розвитку використовуються методи Ларсена, Цукамото, Мамдані та Суджено, основані на застосуванні теорії нечіткої логіки [1–3]. Основними недоліками такого методичного підходу є значні матеріально-інформаційні витрати на отримання апроксимаційних залежностей і результатів розрахунків; складність інтерпретації вхідних параметрів нечіткої моделі та пояснення логічного висновку; громіздкі бази правил; необхідність розроблення методу налаштування нечіткого регулятора [4, 5].

**Мета роботи** — обґрунтування знання-орієнтованого підходу для оцінювання на об'єктивній інформаційно-ентропійній функції відповідності стану складних систем вимогам якості, формування і реалізації інформаційно-методичного забезпечення на практичних об'єктах. Досягнення мети передбачає:

1) подолання проблемних завдань системного аналізу під час дослідження складних об'єктів різномірної природи та організації на основі створення об'єктивної ентропійно-інформаційної моделі;

2) визначення структури і функціональних властивостей знання-орієнтованих систем підтримання рішень з регулювання якості складних об'єктів;

3) надання інформаційно-програмного підтримання реалізації запропонованого методичного забезпечення для вирішення практичних завдань.

## ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ПРАКТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ

Початкова інформація за моніторинговими системами (дані спостережень) регулює розмірність бази знань з обов'язковим відображенням трьох основних аспектів безпеки і якості їх стану та функціональності — соціального, екологічного і економічного.

Вихідна інформація на базі моніторинг-вимірювальних даних містить продукційні системи «0-стан об'єкта (системи як складові) — процес (система процесів, оператор змін стану або його підтримання) — *i*-стан об'єкта (системи)» з позицій досягнення мети сталого розвитку складного об'єкта дослідження, зокрема соціально-еколого-економічного змісту за екологічними пріоритетами.

Продукційні правила різного ступеня невизначеності (нечіткості) початкової інформації з регулюванням розмірності бази знань для цільового управління якістю щодо стану об'єкта /системи і оптимізації дій досягнення мети враховуються у результативному розв'язку, поданому у вигляді кортежу

$$\langle i, Q, P, A \rightarrow B, N \rangle, \quad (1)$$

де *i* — мета – об'єкт стаціонарного сталого екологічного (природного) розвитку як продукція ефективного використання природних механізмів або оптимальних керувальних дій; *Q* — параметр відповідності; *P* — умови досягнення мети як можливість прийняття рішення вигляду  $A \rightarrow B$  – відповідність мети систем (*B*) меті «якщо *A*, то *B*»; *N* — дії і процеси, які виконуються після досягнення *B* [6].

Для аналізу процесів метою  $B_i$  є організація такого стану об'єкта/ систем за *N*-перетворень, які дозволяють досягти стаціонарного упорядкованого стану, визначеного отриманням максимального значення ентропії у разі дестабілізації початкового 0-стану об'єкта з  $\Delta S \rightarrow \max$  з переходом в *i*-й стан об'єкта, що відповідає мінімуму ентропійного значення для відновленої функціональності систем згідно з вимогами їх екологічності (природності за змістом) ( $x_1 = A_{i1}$ ), безпечності ( $x_2 = A_{i2}$ ).

За моніторинговою інформацією формуються вибірки початкових даних з урахуванням наявності відомого і достатнього обсягу значень  $\eta = y_j$  для встановлення точного значення  $\xi$ , що покладені в основу навчальної вибірки вигляду

$$(x_1^{(\eta, \xi)}, x_2^{(\eta, \xi)}, y^{(\eta, \xi)}) (\eta, \xi = \overline{1, K}), \quad (2)$$

де  $x_1^{(\eta, \xi)}, x_2^{(\eta, \xi)}, y^{(\eta, \xi)}$  — відповідно значення вхідних і вихідних змінних із характеристик об'єктів досліджу  $\eta = y_i$  і  $\xi$ ;  $K$  — загальна кількість експериментальних даних у навчальній вибірці [6, 7].

База правил формується за прийнятою процедурою з урахуванням складності об'єкта і отриманих за розрахунками двох показників (змінних  $x_1, x_2$ ). Установлюються мінімальні та максимальні значення моніторингових характеристик об'єктів, які за даних умов відображають можливості досягнення бажаних цілей. Подібним чином аналізуються вихідні дані — стан систем у незадовільному ( $y^{\min}$ ) і відповідному до вимог за прийнятним природним/допустимим рівнем ( $y^{\max}$ ) [6]:

$$x_1 \in [x_1^{\min}, x_1^{\max}], x_2 \in [x_2^{\min}, x_2^{\max}], y \in [y^{\min}, y^{\max}]. \quad (3)$$

Відповідним чином умовна ентропія невідповідності під час оцінювання порушень у системах за умови недостиження потрібного стану або функціональності визначається за таким виразом:

$$\begin{aligned} S(\xi(x)/\eta(x)) &= - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln f(x) dx = \ln \sqrt{2\pi\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx + \frac{1}{2\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) x^2 dx = \\ &= \ln \sigma \sqrt{2\pi} + \ln \sqrt{e} = \ln \sigma \sqrt{2\pi e}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{де } \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1, \int_{-\infty}^{\infty} f(x) x^2 dx = D = \sigma^2.$$

Для інформаційно-ентропійної оцінки системи використовується функціонал

$$I(x) = \log_2 n + \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i).$$

Динаміка змін визначається такими поступовими переходами. У початковий момент часу (стан  $A$ ) усі системи об'єкта мають однаковий стабільний характер функціональності, невизначеність відсутня, ентропія дорівнює нулю. Після дії внутрішніх дестабілізуювальних факторів або порушення гомеостазу з навколишнім середовищем (вплив зовнішніх факторів – випадковість, стохастичність невідповідності взаємодії «об'єкт – навколишнє середовище») (перехід  $A-B$ ) поступово включаються механізми самоорганізації і повільно системи та об'єкт загалом входять у стохастичний стаціонарний стан ( $C$ , перехід  $B-C$ , ентропія  $S$  досягає максимуму).

Однозначна змістовна характеристика логічного ланцюга уникнення невизначеності, можливість аналізу експериментальних даних та моніторингової інформації, яка надається у вигляді ймовірнісного оцінювання даних про об'єкт дослідження, дозволяють стверджувати про правомірність і доцільність визначення стану елементів аналітичної системи через ентропійну функцію, яка прийнятна для встановлення стану ( $\ln p$ ), та інформації про зміни ( $p \ln p$ ). З урахуванням викладеного та наявності елементів невизначеності в аналітичній системі «стан<sup>0</sup> – процес – стан<sup>0</sup> (стан<sup>1</sup>)» пропонується

ентропійне її усунення завдяки застосуванню характеристичної функції для аналізу стану залежності  $S(\xi | \eta)$  (4), зміни  $\Delta S$  та інформаційної ентропії  $S(K)$ , коли її аргумент інваріант  $K$  і є змінною [6, 7]:

$$S(K) = \chi \ln K. \quad (5)$$

Тоді стійкі процеси відповідають умові  $dS(K)|_j = 0$ , де  $j$  визначає умови екстремуму. Згідно з критеріями стійкості Ляпунова [8–10] стан системи стає стійким динамічно, якщо виробництво ентропії має максимум, що властиво для реалізованих у природі процесів і об'єктів:

$$d^2S(K)|_j > 0; \quad d^2S'(K)|_j < 0. \quad (6)$$

Статистично стан мінімуму ентропії нестійкий, оскільки є ймовірність флуктаційної появи самодовільних процесів, що зумовлює подальше зростання ентропії. Зростання ентропії у динамічних процесах як функції від  $K$  на підставі критеріїв Ляпунова відповідає мінімуму ентропії і вважається динамічно стійким. Дійсно, організація стійкого термодинамічного потоку (передавання речовини, енергії, інформації) між системами у природі та на рівні технічних, природно-технічних об'єктів [11, 12] визначає послідовність стаціонарних станів, що локально відповідає принципу мінімуму виробництва ентропії Пригожина [8, 10] за умови прояву самоорганізації і гарантує стійкість систем за Ляпуновим.

Якщо розглядати об'єкт дослідження як матеріальну фізико-хімічну систему, то зміни в ній за положеннями статистичної фізики мають імовірнісну природу. Імовірність визначається як перехід від випадковості до необоротності [8–10]. Порушення рівноваги через прояв внутрішньої диференціації між частинами самої системи і навколишнього її середовища призводить до прояву детерміністичних і випадкових процесів. Однорідність часу і простору порушується формуванням дисипативних структур, які є джерелом диверсифікації та інновації. Наближення до рівноваги виявляється через кореляції, динамічні кореляції, що приводять до рівноважного розподілу. Неперервність часу і детерміністичний рух за передбаченими змінами  $x_n$  та  $x_{n+1}$  і зсувом Бернуллі  $x_{n+1} = 2x_n^{(\text{mod}1)}$  визначаються збільшенням відстані між траєкторіями за експоненціальною розбіжністю  $\exp(n \ln 2)$ , де  $\ln 2 = \lambda$  — показник Ляпунова [10]. Таким чином, установлюється детерміністичний хаос, коли динамічні процеси породжуються випадковістю [6, 7].

З урахуванням системності об'єкта дослідження дещо змінюється відображення змін у системі за ентропійною ознакою. Аналіз включає розгляд довільних процесів, які приводять систему до позитивних або небажаних ефектів. Породжена внутрішніми і зовнішніми факторами негентропія дозволяє перебіг процесів саморегулювання, що приводить систему до найближчого рівноважного стану [11]. У цій точці сталого функціонування система набуває відповідного атрактора зі зниженням вільної енергії в системі з наступним виробленням ентропії:  $\Delta S \rightarrow 0$ ,  $S_1 \rightarrow \min$ , довільним процесом досягнення нового рівня стабільності системою за зміненням організаційно-структурним станом:  $\Delta S > 0$ ,  $S_2 \rightarrow \max$  (умовно мінімальне значення, еволюційний розвиток). Недосягнення системою бажаної сталості визнача-

ється динамічними змінами, які супроводжуються проявом імовірнісних, стохастичних, випадкових процесів, що відрізняються рівнем невизначеності:  $\Delta S \rightarrow \infty$ ,  $S_3 \rightarrow \infty$  (рис. 1).

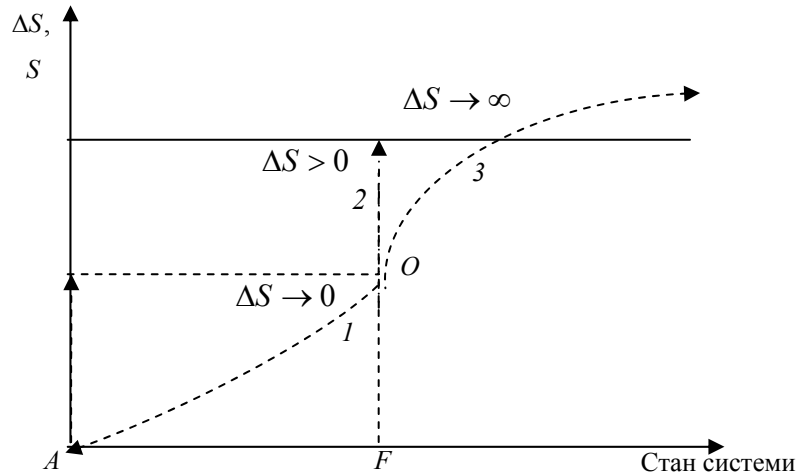


Рис. 1. Динаміка змін у стані об'єктів системних досліджень:  $A$  — початковий стан системи;  $F$  — кінцевий стан системи; 1, 2, 3 — напрямки змін;  $\Delta S, S$  — зміна і значення ентропії в системі;  $O$  — точка біфуркації

Кінцевий стан устанавлюється за структурною ентропією, відповідно до якої формується прагнення системи до рівноваги за об'єктивними вимогами другого закону термодинаміки [12]. Зовнішнє навколишнє середовище за своїм станом і дією на об'єкт і системи спричиняє суперечність у розвитку складових об'єкта або елементів системи. Усунення нестабільності пов'язано з процесами адаптації, виникнення локальних складових інформаційної ентропії (ІЕ). Сукупність локальних ІЕ визначає інтегральну складову ІЕ, яка відповідає за ступінь досягнення рівня незавершеності адаптації [6]. Моніторингові дані визначають стан об'єкта за наданою інформаційною системою відповідно до наявних знань про об'єкт дослідження у вигляді відповідності і, таким чином, відбувається ідентифікація стану системи (див. рис. 1).

Для практичної реалізації наданого підходу до оцінювання прогнозування стану складного об'єкта пропонується розроблення інформаційної системи для збирання та зберігання моніторингової інформації, передавання даних для надання прогнозу реалізованого стану та аналізу отриманих результатів [6, 7]. За необхідності регулювання/управління обґрунтовуються заходи підтримання стабілізуювальних процесів, підсилення факторів позитивних змін/впливу на систему відповідно до алгоритмічного використання ентропійного підходу встановлення на об'єктивній основі оцінювання якості дослідженого об'єкта завдяки застосуванню інформаційних знання-орієнтованих систем (рис. 2).

Відповідно до загальних положень методичного забезпечення встановлення оцінки відповідності стану і функціональності досліджених об'єктів за наявними відхиленнями від допустимої динаміки змін (1) – (6) визначається можливість управління якістю природно-техногенними утвореннями. Отримані результати досліджень динаміки процесів і змін станів систем дають змогу встановити нові знання про системні об'єкти. Для реалізації

завдань на практиці пропонується автоматизоване оброблення інформації з відповідним інформаційно-програмним підтриманням (рис. 2) [13].

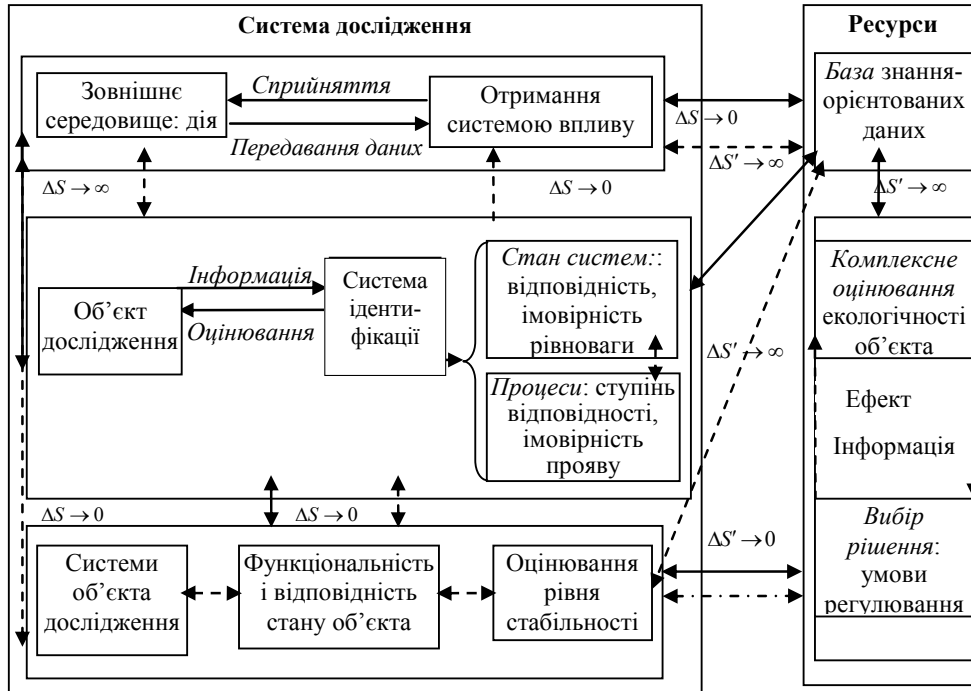


Рис. 2. Інформаційно-ентропійний підхід і знання-орієнтовані системи для оцінювання відповідності системних об'єктів:  $\Delta S$  і  $\Delta S' \rightarrow 0$  — стан рівноваги за відповідності цільовій взаємодії «система – навколишнє середовище» за умови різниці між результатами впливу і стабілізаційного стану об'єкта ( $\Delta S$ ) і вимогами відповідності ( $\Delta S'$ );  $\Delta S$  і  $\Delta S' \rightarrow \infty$  — стан стаціонарності нескінченного розвитку системи за умови відповідності цільовій рівновазі.

У практичних дослідженнях природно-техногенних комплексів використовуються моніторингова інформація і база знань (феноменологічний підхід) для системного аналізу та формування в його межах моделей і рішень з управління якістю «об'єкт – навколишнє соціально-природне середовище». Кількість інформації для встановлення точного опису  $\xi$  за наявності відомого і достатнього обсягу значень  $\eta = y_j$  визначається за функцією

$$S(\xi|\eta = y_j) = -\sum_i p_{i|j} \cdot \log_2 p_{i|j}, \quad MS(\xi|\eta) = -\sum_j P(\eta = y_j) \sum_i p_{i|j} \log_2 p_{i|j},$$

де  $S(\xi|\eta)$  — умовна ентропія  $\eta$ , якщо  $\xi = x$ ;  $MS(\xi|\eta)$  — математичне сподівання умовної ентропії за змінної  $\xi$  [14].

Відповідно до постановки задачі для аналізу якості складних систем кількість інформації в  $\xi$ , що міститься в отриманих результатах попереднього етапу розв'язання задачі або визначається відносно характеристик системи  $\eta$ , дорівнює різниці між такими залежностями [15, 16]:

$$I(\xi|\eta) = S(\xi) - MS(\xi|\eta); \quad I(\xi|\eta) = -\sum_i p_{ij} \log_2 \frac{p_{ij}}{P\{\xi = x_i\}P\{\eta = y_j\}},$$



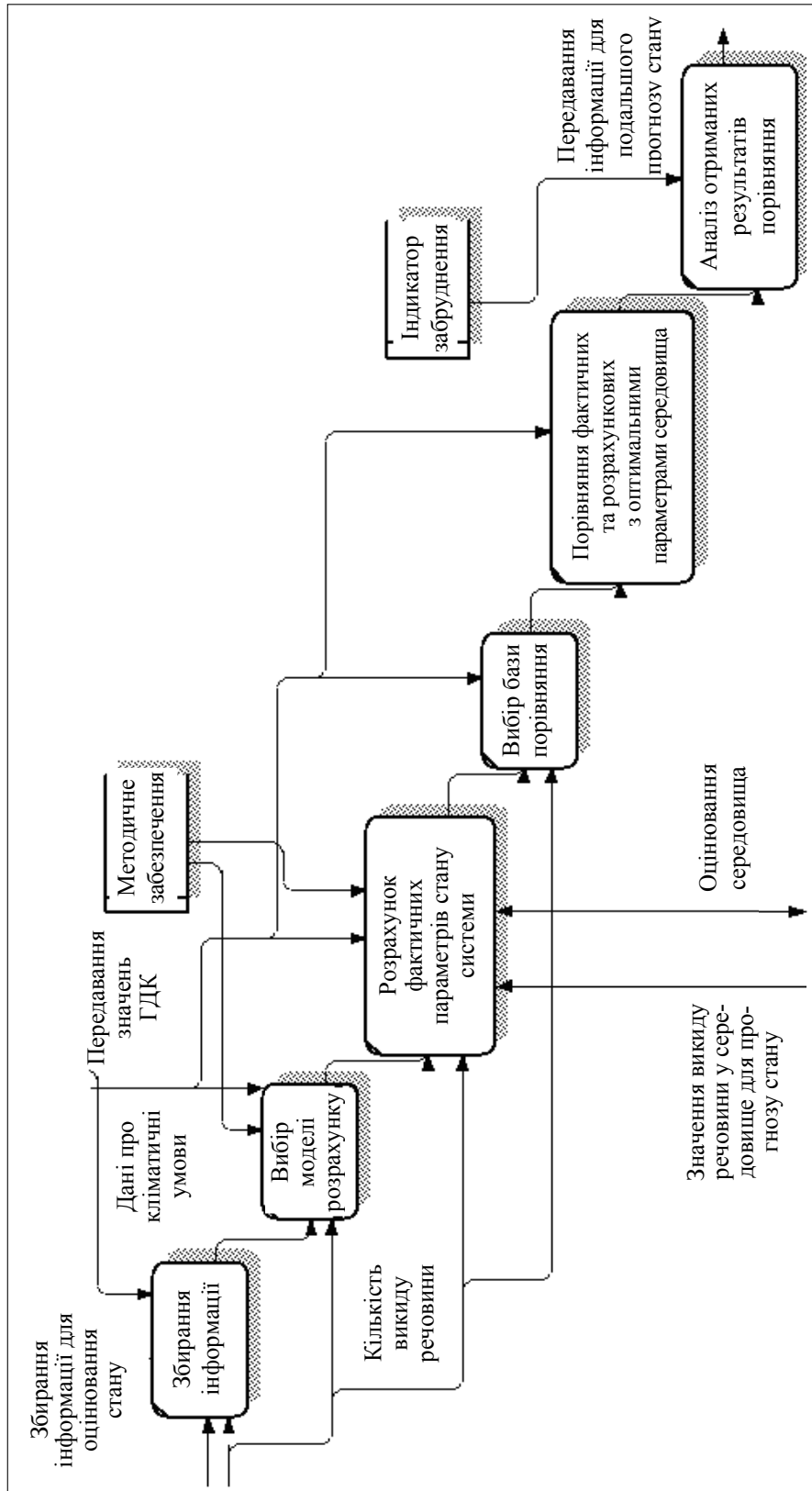


Рис. 3. Діаграма потоків даних: ГДК — граничнодопускаєма концентрація

де  $I(\xi|\eta)$  — кількість інформації в  $\xi$  відносно  $\eta$ ;  $I(\xi|\eta)$  — кількість інформації в  $\eta$  відносно  $\xi$ ;  $S(\xi)$  —  $\varepsilon$ -ентропія;  $p_{ij}$  — сумісний розподіл імовірностей.

Оскільки  $\xi$  і  $\eta$  визначають однакові співвідношення: кількість інформації в  $\eta$  відносно  $\xi$  і кількість інформації в  $\xi$  відносно  $\eta$ , то  $I(\xi|\eta) = S(\xi)$ . Ця послідовність аналізу стану елементів аналітичної системи  $N$ , що складає множину  $X$  змінних  $x_i$ , дозволяє отримати ентропійну оцінку відповідності за інформацією для певної ситуації, тобто  $S = I = \log_2 N$ .

На практиці даний підхід об'єктивного системного дослідження складних об'єктів апробовано під час розв'язання задач екологічної безпеки функціонального модуля очищення шламових вод збагачувальної фабрики ЦОФ «Кураховська» та установки з перезбагачення шламів зі шламозбірника. Необхідно контролювати оптимальні умови кінетики осаду завислих речовин зі шламових вод за станом кінцевих зразків очищення в разі використання мішалки та за умов природного осадження. Для визначення параметрів оптимального осадження для отриманих зразків застосовано міру невідповідності цільовим вимогам за ентропійною функцією  $n$  вимірних характеристик розрахунку  $L$ :

$$S = \frac{L}{\sum_{i=1}^n L_i}.$$

Отримані результати для кожної ентропійної характеристики аналізують відповідно до пошуку відрізків, де система досягає свого максимуму та мінімуму:

$$[\min; \min + \Delta S \cdot 0,38]; [\max - \Delta S \cdot 0,38; \max], \quad (7)$$

де  $\Delta S = S_{\max} - S_{\min}$  — довжина відрізка аналізованого розподілу значень.

Якщо розглянута характеристика потрапляє до зазначеного інтервалу  $[a, b]$  — інтервалу для  $\max/\min$  (7), то отримують оптимальне значення, ідентифіковане за правилом:

$$K = \begin{cases} 1, & x \in [a, b]; \\ 0, & x \notin [a, b]. \end{cases}$$

Оскільки у системі необхідно провести градування одночасно за декількома параметрами, то доцільно використати кон'юнкцію для виконання одночасно всіх обмежень:

$$t^{\min} \wedge H_0^{\max} \wedge H_3^{\min} = 1,$$

де  $t$  — час кінетики осаду, хв;  $H_0$  — висота освітленого розчину;  $H_3$  — висота згущеного осаду розчину.

Для забезпечення неперервності виробничих процесів, оперативного реагування на небезпечні ситуації на промислових об'єктах за взаємодії «система – навколишнє середовище» запропоновано програмна підтримка контролю безпеки у вигляді мобільного додатка. Програмний продукт орієнтовано на користувачів гаджетів з операційною системою Android, яка по-

ширена на багатьох електронних пристроях, що дає змогу оперативно оцінювати стан складних природно-техногенних утворень. Під час формування програмного продукту враховано різницю між версіями операційної системи з можливістю встановити додаток на різні електронні пристрої, а також можливі ситуації залучення до роботи телефонних пристроїв і планшетних комп'ютерів. Розроблення програмного продукту за операційною системою Android дозволяє отримувати кількісні розрахунки відповідності виробничих процесів цільовій функціональності, для територіальних об'єктів — оцінювати рівень безпеки (рис. 4).

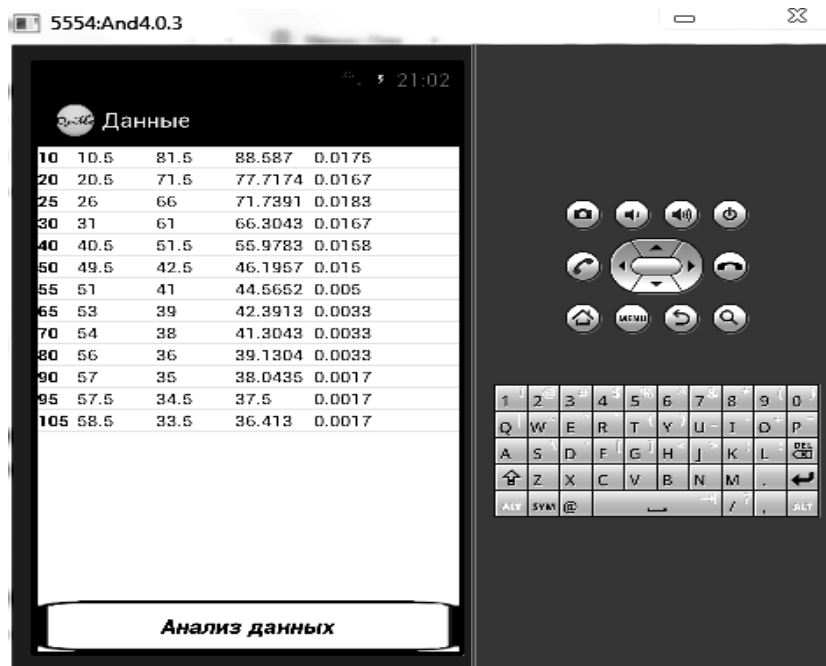


Рис. 4. Результати оперативного контролю еко-ефективності процесу осадження

Під час розроблення робочих процесів перспективних дизелів намагаються зменшити максимальну температуру з метою зниження вмісту оксидів азоту, що відповідає сучасним вимогам еко-ефективності енергетичних установок. У результаті згоряння палива можливі довільні процеси у повітряно-паливній суміші, що за рахунок вивільнення газів формують умови кінцевої стабільності з бажаним «екологічним результатом» за варіації тиску  $P$  і температури  $T$ , зумовленої попередніми їх змінами певним чином (рис. 5) [17, 18]. Ці зміни відображають перехід від хаотичності — ентропія максимальна, до стабільності — ентропія змінюється до нуля, а інформаційна ентропія зростає.

Як і у випадку контролю якості технологічного процесу згоряння палива необхідно регулювати за параметрами і величиною змін для отримання цільового результату – зменшення вмісту оксидів азоту на викиді. Для цього також використано інформаційно-ентропійну функцію відповідності вимогам еко-ефективності (рис. 6).

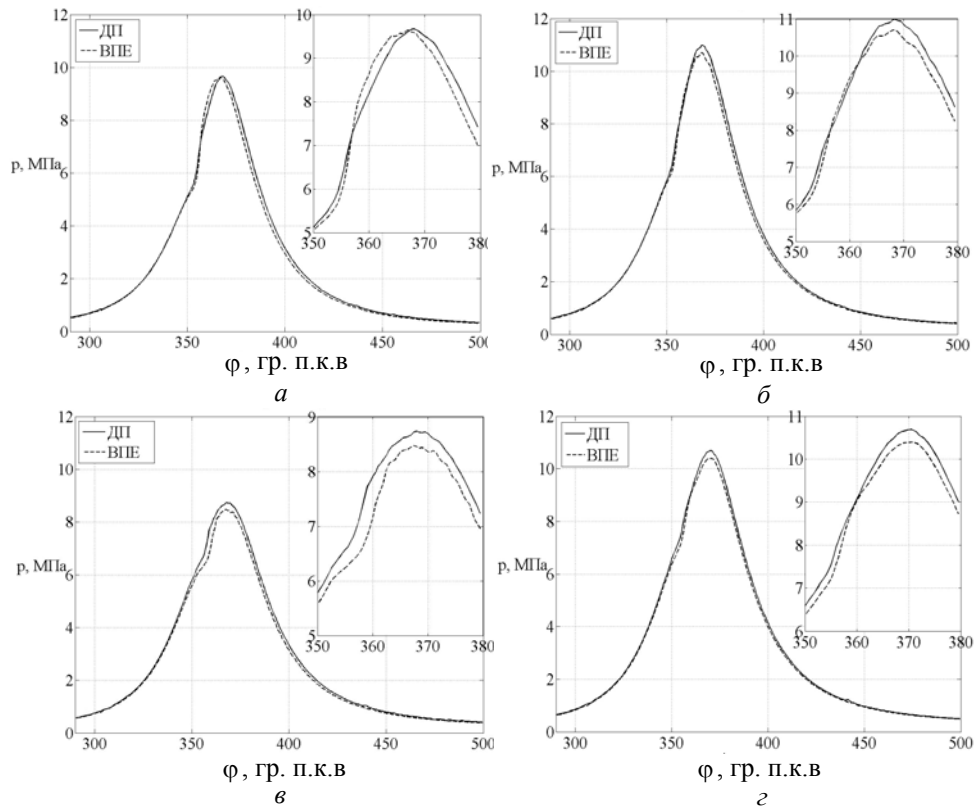


Рис. 5. Індикаторні діаграми у разі роботи на ДП та ВПЕ: а —  $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e = 64 \text{ кВт}$ ; б —  $n = 1500 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e = 85 \text{ кВт}$ ; в —  $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e = 73,6 \text{ кВт}$ ; г —  $n = 2000 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e = 100 \text{ кВт}$ ;  $\varphi$ , гр. п.к.в — градуси повороту колінчастого вала;  $p$  — тиск, МПа; ДП — дизельне паливо; ВПЕ — водопаливна емульсія;  $n$ ,  $\text{хв}^{-1}$  — частота обертів колінчастого вала, об/хв;  $N_e$  — ефективна потужність, кВт

```

Values of input data:
min = -0,0492757478344676;
max = 9,67559316354393
Entropy interval for max P is: [0,0238442422135027; 0,0384544600251837]
    
```

Рис. 6. Результати програмного розрахунку параметрів згоряння повітряно-паливної суміші в дизелях

Запропонований інформаційно-експериментальний підхід до розв'язання задач дослідження особливостей екоефективного спалювання палива в дизелях дозволив підтвердити твердження, що зниження максимальної температури в циліндрі та зменшення тривалості процесу згоряння сприяють досягненню максимуму в стабілізації газової суміші на додатній точці зниження вмісту оксидів азоту в складі відпрацьованих газів дизеля, що відповідає стану екорівноваги «дизель – навколишнє середовище», тобто відповідно до вимог (6) мають остаточно  $\Delta S$  і  $\Delta S' \rightarrow 0$ .

## ВИСНОВКИ

За результатами теоретичного аналізу моніторингових систем із застосуванням інформаційно-ентропійного підходу для оцінювання їх якості на основі використання знання-орієнтованих баз отримано такі висновки:

1. Необхідно оцінювати та прогнозувати стан системних об'єктів в умовах моніторингу з урахуванням динаміки продукційних систем вигляду «0-стан об'єкта (системи як складові) – процес (система процесів, оператор змін стану або його підтримання) – *i*-стан об'єкта (системи)» на основі інформаційної ентропії, яка відповідає за ступінь досягнення рівня адаптації у взаємодійних системах у межах складного об'єкта дослідження: це дозволяє отримати інформацію про можливості керування позитивними впливами на досліджувані системи (алгоритмічне забезпечення (1) – (6)).

2. Пропонується комплексне поєднання інформаційно-ентропійного та феноменологічного підходів до розв'язання проблемних завдань, що сприяє визначенню основи з прийняття рішень на об'єктивній основі та обґрунтованості отриманих даних з виявленням нових знань про реальні функціонуючі системи ( див. рис. 2, 3).

3. Запроваджено практичну реалізацію автоматизації оброблення інформації за моніторинговими даними відповідно до рекомендацій використання знання-орієнтованих систем і ентропійного оцінювання відповідності стану об'єктів вимогам якості (див. рис. 2) і наданої послідовності оброблення потоку даних (див. рис. 3) на прикладі контролю безпеки технологічних операцій (див. рис. 4) та стабілізації окремих процесів відповідно до встановлених вимог ефективності.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. — М.: Мир, 1976. — 225 с.
2. Задачи нечеткого математического программирования [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://iasa.org.ua/iso?lang=eng&ch=9&sub=3>.
3. Сорокіна Л.В. Моделі і технології управління ринковою вартістю будівельних підприємств / Л.В. Сорокіна. — К.: Лазурит - поліграф, 2011. — 541 с.
4. Караєва Н.В. Діагностика стану регіональних систем за рівнем сталого розвитку в умовах невизначеності / Н.В. Караєва, Л.О. Левченко, А.С. Панасюк, Т.О. Дерипаско // Управління розвитком складних систем. — 2013. — 14(31). — С. 158–163.
5. Бухкало С.І. Екологічна безпека як складова концепції утилізації відходів для комплексних підприємств енергетичного міксу / С.І. Бухкало // Вісник НТУ «ХПІ». — Х.: НТУ «ХПІ», 2014. — № 49. — С. 42–56.
6. Козуля Т.В. Формування знань-орієнтованих баз даних для визначення комплексної методики ідентифікації якості складних систем / Т.В. Козуля, Н. В. Шаронова, Я.В. Святкин, М.М. Козуля // Восточноевропейский журнал передовых технологий. — Харьков, 2016. — 1/2 (79). — С. 13–21.
7. Козуля Т.В. Информационно программное обеспечение оценки качества и безопасности объектов исследования мониторинговых систем / Т. В. Козуля, Н.В. Шаронова, Я.В. Святкин, М.М. Козуля // International Periodical Scientific Journal "Intelecti". — Tbilisi, 2015. — 3(53). — Р. 67–72.
8. Пригожин И.Р. Порядок из хаоса / И. Р. Пригожин, И. Стенгерс. — М.: Наука, 1986. — 432 с.
9. Климентович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем / Ю.Л. Климентович. — М.: Янус, 2001. — 305 с.

10. Пригожин И.Р. Конец неопределенности / И.Р.Пригожин. — Ижевск: НИЦ, 2000. — 208 с.
11. Бриллюэн Л. Наука и теория информации / Л. Бриллюэн: пер. с англ. А.А. Харкевича. — М.: Гос. изд-во физико-математ. лит-ры, 1960. — 390 с.
12. Прангишвили И.В. Энтропийные и другие системные закономерности: Вопросы управления сложными системами / И.В. Прангишвили. — М.: Наука, 2003. — 428 с.
13. Шаронова Н.В. Знання-орієнтоване інформаційне забезпечення досліджень складних систем / Н.В. Шаронова, М.М. Козуля // Системний аналіз і інформаційні технології: матеріали 18-й Міжнарод. науково-техн. конф. SAIT 2016, Київ, 2016 / УНК «ІПСА» НТУУ «КПІ». — К.: УНК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2016. — С. 178–179.
14. Моклячук Т.О. Методи оцінки екологічного ризику від забруднення стійкими пестицидами / Т.О. Моклячук // Збалансоване природокористування. — 2014. — № 2. — С.135–142.
15. Козуля М.М. Знання-орієнтована комплексна методика оцінки стану складних систем / М.М. Козуля // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. — Х.: НТУ «ХПІ», 2016. — № 19 (1191). — С. 39–44.
16. Петров В.В. Энтропийные методы проектирования сложных информационных систем / В.В. Петров, В.М. Агеев, Н.В. Павлова // Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. — М., 1985. — Т. 18. — С. 78–123.
17. Савченко А.В. Дослідження фізико-механічних процесів в ДВЗ для розробки моделі екоєфективного згорання палива / А.В. Савченко // Інноваційні дослідження у наукових роботах студентів. — Х.: НТУ «ХПІ», 2017. — № 18 (1240). — С. 53–57.
18. Мешков Д.В. Метод расчёта термодинамической погрешности при индцировании ДВС / Д.В. Мешков, А.В. Савченко // Двигатели внутреннего сгорания. — 2014. — № 1. — С. 22–26.

*Надійшла 30.01.2018*

**ЗАДАЧИ НЕЧЕТКОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ  
С ДВУХСТОРОННИМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ  
И ПАРАМЕТРАМИ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ И ОГРАНИЧЕНИЙ  
В ВИДЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

**Ю.А. ЗАК**

**Аннотация.** Предложены детерминированные эквиваленты задач нечеткого линейного программирования с двухсторонними ограничениями на детерминированные значения переменных, которые могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, а коэффициенты функции цели и линейные функции ограничений, а также левые и правые граничные их значения — нечеткие множества, представленные fuzzy-интервалами с  $LR$ -представлением функций принадлежности общего вида. На основе рассмотренных в работе правил ранжирования и оценки доминирования нечетких множеств установлены условия безусловного (строгого) и условного (нестрогого) выполнения ограничений. Различного вида детерминированные эквиваленты задачи, в которых требуется выполнение fuzzy-ограничений с различной степенью строгости, предусматривают решения не одной, а некоторого множества задач линейного программирования. Выбирается наилучшее из допустимых решений.

**Ключевые слова:** нечеткое линейное программирование, fuzzy-интервалы с  $LR$ -представлением функций принадлежности, условия доминирования нечетких множеств, двухсторонние интервальные ограничения, детерминированный эквивалент.

**ВВЕДЕНИЕ**

Постановкам, математическим моделям и методам решения задач линейного программирования, в которых такие параметры, как граничные значения, а также коэффициенты целевых функций и ограничений могут быть выражены нечеткими множествами, уделялось значительное внимание в монографиях и периодической литературе (см., например, [1–10]). Такие задачи возникают в практических приложениях вследствие как нечеткости математического описания решаемой проблемы, так и некоторой размытости требований к выполнению установленных ограничений.

Поскольку формы нечеткого математического описания решаемой проблемы бывают различными, существуют разные классы задач нечеткого математического программирования:

- оптимизация как некоторой детерминированной функции, так и функции принадлежности некоторого нечеткого множества на заданном нечетком множестве допустимых альтернатив. Для решения этой задачи применялся подход Беллмана–Заде [11, 12] — поиск решения, максимизирующего минимальное из значений превышения функцией цели некоторого заданного уровня и уровня выполнения каждого из ограничений; нечеткая цель описывается функцией принадлежности. Решить данную задачу означает достигнуть заданного уровня цели и обеспечить выполнение каждого уровня из системы ограничений с заданным уровнем надежности;

- задачи линейного ограничения с размытыми ограничениями, в которых отклонениям приписываются различные степени допустимости и допускается нечеткое выполнение некоторых неравенств [2, 13, 17]. Исходная задача оказывается сформулированной в форме задачи достижения нечеткой цели, и к ней также можно применить подход Беллмана–Заде;

- рассматриваемый в данной работе класс задач, в которых коэффициенты функций цели и ограничений, а также левые и правые граничные значения – нечеткие множества, а переменные задачи — действительные числа, на которые (в отличие от рассматриваемых ранее подходов) могут быть наложены двухсторонние ограничения и некоторые из этих действительных чисел могут иметь отрицательные значения. Все рассматриваемые в литературе задачи предусматривали лишь положительные значения всех действительных переменных [11, 12]. Если все переменные задачи не могут быть отрицательными числами, в качестве одного из подходов при выборе в качестве решения одной из возможных альтернатив исходная задача может быть сформулирована в форме задачи достижения нечеткой цели и к ней можно также применить подход Беллмана–Заде (см., например, [1–4, 10, 17]). Общая схема решения задач в рассматриваемой в данной работе постановке заключается в следующем:

- вводим некоторые дискретные уровни на основе  $\lambda_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, K$ , сечений значений функций принадлежности нечетких множеств (подмножества уровня  $\lambda$ ) как функций ограничений, так и их граничных значений. Каждый из этих уровней определяет интервалы возможных значений этих параметров и устанавливает возможности их сравнения;

- в зависимости от требований безусловного или допустимости нестрого выполнения системы ограничений, а также субъективных представлений лица, принимающего решение (ЛПР), устанавливаем ограничения на соотношения границ этих интервалов в каждом из этих сечений. Ограничения принимают интервальный вид и размерность системы ограничений существенно увеличивается;

- вводим подмножества уровня  $\lambda_k$ ,  $k = 0, 1, \dots, K$ , и для целевой функции задачи потребуем оптимизацию для каждой из функций, коэффициентами которых являются все граничные значения образованных интервалов. Получим задачу многокритериальной оптимизации, которая, например, введением аддитивной свертки этих критериев с различными весовыми коэффициентами, сводится к решению однокритериальной задачи;

- в результате выполненных преобразований получаем детерминированный эквивалент исходной задачи нечеткого линейного программирования в виде задачи линейного программирования, которая может быть решена симплексным методом.



В случае, если некоторые переменные задачи могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, правила fuzzy-арифметики не позволяют ограничиваться только одним видом детерминированной математической модели задачи, и в этом случае приходится решать не одну, а несколько детерминированных задач линейного программирования, что существенно усложняет процесс решения. Среди допустимых решений сформулированных детерминированных задач выбирается решение с наилучшим значением целевой функции.

В данной работе предлагаются методы сравнения и определения безусловных и условных предпочтений нечетких множеств, на основе которых формулируются различного вида правила выполнения ограничений для нечетких множеств представления критерия оптимальности в виде одной или нескольких детерминированных функций переменных задачи. Для рассматриваемого класса задач нечеткого линейного программирования предложены детерминированные эквиваленты, обеспечивающие решение задачи при различных требованиях к строгости выполнения системы ограничений для нечетких множеств. Обсуждаются алгоритмы решения сформулированной задачи [14, 15].

### МЕТОДЫ СРАВНЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕДПОЧТЕНИЙ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ И УСЛОВИЯ ВЫПОЛНЕНИЯ FUZZY-ОГРАНИЧЕНИЙ

Нечеткое множество  $\bar{A}$  с функцией принадлежности произвольного вида аппроксимируем некоторой ломанной линией, соединяющей точки минимальных  $a_0^1, a_1^1, \dots, a_k^1, \dots, a_K^1$  и максимальных значений координат абсцисс  $a_0^2, a_1^2, \dots, a_k^2, \dots, a_K^2$  некоторого множества сечений, т.е. подмножеств уровней  $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_k, \dots, \lambda_K$ , и представляем их многоугольником  $(a_0^1, a_1^1, \dots, a_k^1, \dots, a_K^1, a_K^2, a_{K-1}^2, \dots, a_k^2, \dots, a_0^2)$ . Такая аппроксимация поясняется рис. 1, на котором выбрано 5 сечений:  $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$  и исходное множество представлено многоугольником  $(a_0^1, a_1^1, a_2^1, a_3^1, a_4^1, a_5^1 = a_5^2, a_4^2, a_3^2, a_2^2, a_1^2, a_0^2)$ .

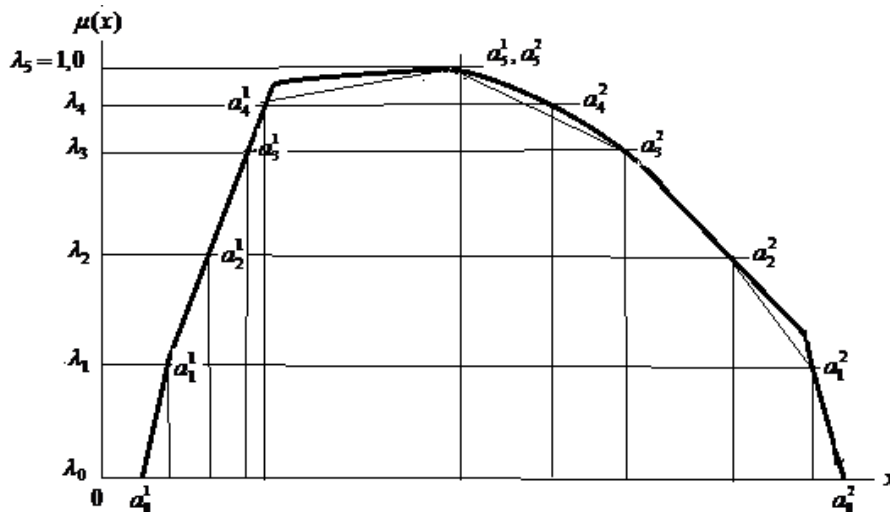


Рис. 1. Аппроксимация функции принадлежности нечеткого множества самого общего вида

Рассматриваются нормализованные нечеткие множества с  $LR$ -представлением функции принадлежности, т.е. функции, значения которых  $\mu_{\bar{A}}(A)$ , начиная с некоторого значения абсцисс  $x = a(A)$ ,  $\mu_{\bar{A}}[a(A)] = 0$  и до значения  $x = m_1(A)$ ,  $\mu_{\bar{A}}[m_1(A)] = 1,0$ , на некотором отрезке  $x \in [m_1(A), m_2(A)]$  (в частном случае только в одной точке —  $x \in [m_1(A) = m_2(A) = m(A)]$ ) имеют постоянное значение  $\mu_{\bar{A}}[m_1(A)] = \mu_{\bar{A}}[m_2(A)] = 1,0$ , а на отрезке  $x \in [m_2(A), b(A)]$  убывают до значения  $\mu_{\bar{A}}[b(A)] = 0$ .

Среди достаточно большого количества функций этого класса наибольший интерес представляют нечеткие множества с функцией принадлежности прямоугольного, треугольного и трапецевидного типов.

Обозначим координаты абсцисс крайних точек каждого из этих сечений соответственно  $a_k^1[A(\beta_k)]$  и  $a_k^2[A(\beta_k)]$ ,  $k = 0, 1, \dots, K$ . Обозначим координаты абсцисс крайних точек функций принадлежности соответствующих нечетких множеств при  $\beta_0 = \beta_K = 0$  через  $R^1(\bar{A})$  и  $R^2(\bar{A})$ , а крайних точек функций принадлежности соответствующих нечетких множеств при  $\beta_s = 1,0$ , где  $s = \frac{K+1}{2}$ , соответственно  $T^1(\bar{A})$  и  $T^2(\bar{A})$ . Здесь, если  $T^1(\bar{A}) = T^2(\bar{A})$ , т.е.  $\mu_{\bar{A}}(A)$ , имеет только одну координату абсцисс, для которой  $\mu_{\bar{A}}(A) = 1,0$ , то  $K$  — четное число.

Координаты абсцисс соответствующих сечений функций принадлежности определяются по формулам:

$$a_k^1[\bar{A}(\beta_k)] = R^1(\bar{A}) + \beta_k [T^1(\bar{A}) - R^1(\bar{A})];$$

$$a_k^2[\bar{A}(\beta_k)] = R^2(\bar{A}) - \beta_k [R^2(\bar{A}) - T^2(\bar{A})], \quad k = 0, 1, \dots, K.$$

В результате умножения нечеткого множества на некоторое действительное число  $b$  координаты абсцисс соответствующих сечений функций принадлежности нечетких множества  $\bar{D}$  вычисляются по формулам:

$$a_k^1[\bar{D}(\lambda_k)] = b a_k^1[\bar{A}(\beta_k)] = \begin{cases} b \{R^1(\bar{A}) + \lambda_k [T^1(\bar{A}) - R^1(\bar{A})]\}, & \text{if } b \geq 0, \\ b \{R^2(\bar{A}) - \lambda_k [R^2(\bar{A}) - T^2(\bar{A})]\}, & \text{if } b < 0; \end{cases}$$

$$a_k^2[\bar{D}(\lambda_k)] = b a_k^2[\bar{A}(\beta_k)] = \begin{cases} b \{R^2(\bar{A}) - \lambda_k [R^2(\bar{A}) - T^2(\bar{A})]\}, & \text{if } b \geq 0, \\ b \{R^1(\bar{A}) + \lambda_k [T^1(\bar{A}) - R^1(\bar{A})]\}, & \text{if } b < 0. \end{cases}$$

В результате сложения нечетких множеств координаты соответствующих сечений вычисляются по формулам:

$$a_k^1[\bar{P}(\lambda_k)] = \sum_{i=1}^n a_k^1[\bar{A}_i(\lambda_k)] = \left\{ \sum_{i=1}^n R^1(\bar{A}_i) + \sum_{i=1}^n \lambda_k [T^1(\bar{A}_i) - R^1(\bar{A}_i)] \right\};$$

$$a_k^2[\bar{P}(\lambda_k)] = \sum_{i=1}^n a_k^2[\bar{A}_i(\lambda_k)] = \left\{ \sum_{i=1}^n R^2(\bar{A}_i) - \sum_{i=1}^n \lambda_k [R^2(\bar{A}_i) - T^2(\bar{A}_i)] \right\}.$$

Рассматривается задача нечеткого линейного программирования с двухсторонними ограничениями вида

$$\bar{F} = \min_{X \in [H^1, H^2]} \sum_{j=1}^m \bar{C}_j x_j$$

в условиях ограничений

$$b_i^1 \leq y_i = \sum_{j=1}^m \bar{A}_{ij} x_j \leq b_i^2, \quad i = 1, \dots, n,$$

или

$$\bar{B}_i^1 \leq y_i = \sum_{j=1}^m \bar{A}_{ij} x_j \leq \bar{B}_i^2, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$h_j^1 \leq x_j \leq h_j^2, \quad j = 1, \dots, m. \quad (1)$$

Здесь  $\bar{C}_j$ ,  $\bar{A}_{ij}$  и граничные значения  $\bar{B}_i^1$ ,  $\bar{B}_i^2$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;  $j = 1, \dots, m$ , а следовательно и значения  $\bar{F}$  и  $\bar{Y}_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , — нечеткие множества с функций принадлежности *LR*-представления произвольного вида, а переменные задачи  $x_j$  и граничные значения  $h_j^1$ ,  $h_j^2$  и  $b_i^1$ ,  $b_i^2$  — действительные числа, которые могут принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Так как нечеткое множество определяет некоторый диапазон возможных значений критерия оптимальности и выходных переменных, определим сформулированные в данной задаче условия выполнения ограничений задачи и понятие оптимальности функции цели задачи.

Здесь и в дальнейшем для простоты изложения наряду с обозначениями  $\bar{F}(\lambda)$ ,  $\bar{Y}_i(\lambda)$ ,  $\bar{B}_i^1(\lambda)$ ,  $\bar{B}_i^2(\lambda)$  могут также использоваться обозначения соответствующих нечетких множеств  $F(\lambda)$ ,  $Y_i(\lambda)$ ,  $B_i^1(\lambda)$ ,  $B_i^2(\lambda)$ .

Обозначим  $d^1[F(\lambda)]$ ,  $d^2[F(\lambda)]$  и  $d^1[\bar{Y}_i(\lambda)]$ , а также  $d^2[\bar{Y}_i(\lambda)]$ ,  $d^1 B_i^1(\lambda)$ ,  $d^2 B_i^1(\lambda)$ ;  $d^1[B_i^2(\lambda)]$ ,  $d^2[B_i^2(\lambda)]$ ,  $i = 1, \dots, n$  — соответственно левые и правые крайние координаты абсцисс различных сечений функций принадлежности соответствующих сечений рассматриваемых нечетких множеств. Пусть  $\lambda_0 = 0$ ,  $\lambda_K = 1, 0$ ,  $\lambda_k < \lambda_{k+1}$ ,  $k = 0, 1, \dots, (K - 1)$ .

**Определение 1.** Из условий

$$d^1[\bar{Y}_i(\lambda)] \geq d^1[B_i^1(\lambda)] \text{ и } d^2[\bar{Y}_i(\lambda)] \geq d^2[B_i^1(\lambda)], \quad \lambda = 0, 1, \dots, k, \dots, K,$$

и  $d^1[\bar{Y}_i(\lambda)] \leq d^1[B_i^2(\lambda)] \text{ и } d^2[\bar{Y}_i(\lambda)] \leq d^2[B_i^2(\lambda)], \quad \lambda = 0, 1, \dots, k, \dots, K,$

или  $d^1[\bar{Y}_i(\lambda)] \geq d^2[B_i^1(\lambda)] \text{ и } d^2[\bar{Y}_i(\lambda)] \geq d^1[B_i^2(\lambda)], \quad \lambda = 0, 1, \dots, k, \dots, K,$

следует безусловное выполнение ограничений  $\bar{Y}_i \geq \bar{B}_i^1$  и  $\bar{Y}_i \leq \bar{B}_i^2$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

**Определение 2.** Выполнение неравенств

$$d^1[\bar{Y}_i(\lambda)] \geq d^1[B_i^1(\lambda)] \text{ и } d^2[\bar{Y}_i(\lambda)] \geq d^2[B_i^2(\lambda)], \quad \lambda = 0, 1, \dots, k, \dots, K,$$

свидетельствует о нестрогом выполнении  $i$ -го ограничения (выполнение в слабом смысле).

**Определение 3.** Если для некоторого подмножества сечений  $\bar{K}_1^1 = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{g_1}\}$  одно из неравенств  $d^1[\bar{Y}_i(\lambda)] \geq d^2[B_i^1(\lambda)]$  или  $d^2[\bar{Y}_i(\lambda)] \geq$

$\geq d^1[B_i^1(\lambda)]$  может не выполняться, или для некоторого подмножества сечений  $\bar{K}_1^2 = \{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{g^2}\}$  может не выполняться одно из неравенств  $d^1[\bar{Y}_i(\lambda)] \leq d^2[B_i^2(\lambda)]$  или  $d^2[\bar{Y}_i(\lambda)] \leq d^1[B_i^2(\lambda)]$ , а для каждого из подмножества уровня  $\lambda$   $\bar{K}_2^1 = \{\lambda_{g^1+1}, \lambda_{g^1+2}, \dots, \lambda_K\}$  или  $\bar{K}_2^2 = \{\lambda_{g^2+1}, \lambda_{g^2+2}, \dots, \lambda_K\}$  с большими значениями  $\lambda$  выполняются одновременно два из этих неравенств, то это означает, что соответствующие ограничения выполняются в слабом смысле.

Если  $\bar{B}_i^1$  и  $\bar{B}_i^2$  не являются нечеткими множествами, а некоторые действительные числа —  $B_i^1$  и  $B_i^2$ , то безусловное выполнение ограничений  $\bar{Y}_i \geq B_i^1$  и  $\bar{Y}_i \leq \bar{B}_i^2$  равносильно выполнению пары неравенств  $d^1[\bar{Y}_i(\lambda_0 = 0)] \geq B_i^1$  и  $d^2[\bar{Y}_i(\lambda_K = 0)] \leq B_i^2$ , а выполнение этой пары ограничений в слабом смысле — выполнение одной из пары условий

$$d^1[\bar{Y}_i(\lambda_k > 0)] \geq B_i^1, k = g^1, g^1 + 1, \dots, K; \quad d^2[\bar{Y}_i(\lambda_K = 0)] \leq B_i^2;$$

$$d^1[\bar{Y}_i(\lambda_0 = 0)] \geq B_i^1; \quad d^2[\bar{Y}_i(\lambda_k)] \leq B_i^2, k = p, p + 1, \dots, g^2,$$

где  $\lambda_p$  — сечение с координатами абсцисс  $\bar{Y}_i = m_1(\bar{Y}_i) = m_2(\bar{Y}_i)$ .

Обозначим:

$$\bar{d}[\bar{Y}_i(\lambda)] = 0,5\{d^1[\bar{Y}_i(\lambda)] + d^2[\bar{Y}_i(\lambda)]\}, \quad \bar{d}[\bar{B}_i^1(\lambda)] = 0,5\{d^1[\bar{B}_i^1(\lambda)] + d^2[\bar{B}_i^1(\lambda)]\};$$

$$\bar{d}[\bar{B}_i^2(\lambda)] = 0,5\{d^1[\bar{B}_i^2(\lambda)] + d^2[\bar{B}_i^2(\lambda)]\}, \quad \lambda = 0, 1, \dots, k, \dots, K.$$

**Определение 4.** В случае, если все условия определения 1 не выполняются, а справедлива система неравенств

$$\bar{d}[B_i^1(\lambda)] \leq \bar{d}[\bar{Y}_i(\lambda)] \leq \bar{d}[B_i^2(\lambda)], \quad \lambda = 0, 1, \dots, k, \dots, K,$$

следует заключить, что  $i$ -е ограничение выполняется в слабом смысле.

**Определение 5.** Выполнение условий  $\min_{X \in [H^1, H^2]} \bar{F}$  эквивалентно выполнению ряда условий минимизации множества критериев

$$\min_{X \in [H^1, H^2]} d^1[\bar{F}(\lambda)], \quad \min_{X \in [H^1, H^2]} d^2[\bar{F}(\lambda)], \quad \lambda = 0, 1, \dots, k, \dots, K. \quad (2)$$

Другим детерминированным эквивалентом критерия оптимальности является минимизация координаты абсцисс центра тяжести этого нечеткого множества

$$G(\bar{F}) = \frac{\int_{a(\bar{F})}^{b(\bar{F})} \bar{F} \mu_{\bar{F}}(\bar{F}) d\bar{F}}{\int_{a(\bar{F})}^{b(\bar{F})} \mu_{\bar{F}}(\bar{F}) d\bar{F}}, \quad (3)$$

где  $a(\bar{F})$  и  $b(\bar{F})$  — граничные значения (абсциссы крайних левой и правой точек) нечеткого множества критерия оптимальности.

Обозначим соответственно через  $C(\bar{Y}_i)$  и  $C(\bar{B}_i^1), C(\bar{B}_i^2)$  координаты абсцисс центров тяжести соответствующих подмножеств.

**Определение 6.** В случае, если все условия определения 1 не выполняются, а справедлива система неравенств  $C(\bar{B}_i^1) \leq C(\bar{Y}_i) \leq C(\bar{B}_i^2)$ , следует, что  $i$ -е ограничение выполняется в слабом смысле.

Различные условия выполнения интервальных ограничений представлены на рис. 2.

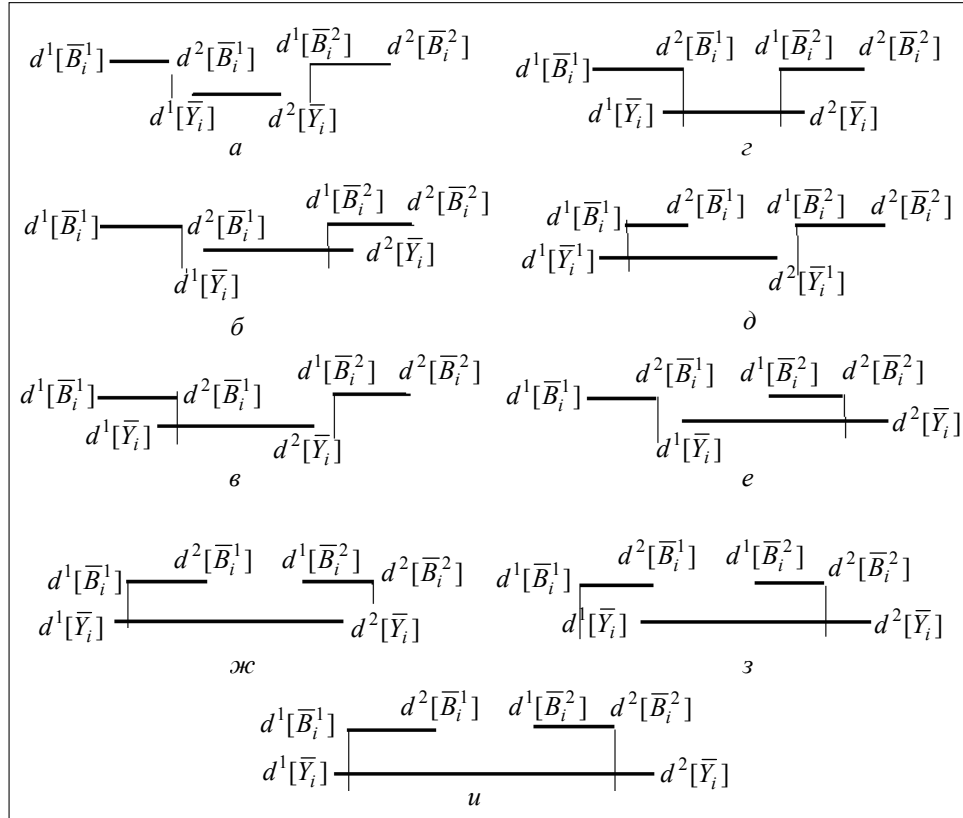


Рис. 2. Различные случаи выполнения и нарушения интервальных ограничений

Строгое (безусловное) выполнение интервальных ограничений иллюстрирует рис. 2, а, их нестрогое выполнение — рис. 2, з, а на рис. 2, д – е — ситуации, в которых одно из двухсторонних ограничений нарушено. Ситуация, когда оба из интервальных ограничений нарушены, показана на рис. 2, и.

### ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ ЭКВИВАЛЕНТЫ ЗАДАЧИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ С НЕЧЕТКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

В качестве детерминированного эквивалента задачи линейного программирования с двухсторонними ограничениями, в которой переменные задачи — действительные числа, а коэффициенты целевой функции, функций ограни-

чений, а также их граничных значений представлены нечеткими множествами, могут рассматриваться следующие модели. В результате решения задачи значения функций ограничений и критерия оптимальности будут представлены нечеткими множествами. В данных условиях ограничения задачи могут быть сформулированы в форме принадлежности интервала расчетных значений абсцисс нечетких множеств выходных переменных заданным интервалам допустимых значений, а критерий оптимальности — в виде многокритериальной задачи оптимизации значений сумм координат абсцисс функций принадлежности правых и левых частей установленных сечений нечеткого множества критерия оптимальности.

Граничные значения на переменные задачи, т.е. значения  $h_j^1$  и  $h_j^2$ , могут быть как отрицательными, так и положительными значениями. Обозначим  $\tilde{J}^1$  — подмножество переменных задачи, для которых  $h_j^1 \geq 0$  и следовательно  $h_j^2 > 0$ , т.е.  $\tilde{J}^1 = \{j \in \tilde{J} | h_j^1 \geq 0, h_j^2 > 0\}$ , а также  $\tilde{J}^2 = \{j \in \tilde{J} | h_j^1 < 0, h_j^2 \geq 0\}$  и  $\tilde{J}^3 = \{j \in \tilde{J} | h_j^1 < 0, h_j^2 < 0\}$ .

Поскольку значения коэффициентов функции цели и функций ограничений задачи в зависимости от знака переменной вычисляются по различным формулам,

$$D^1[\bar{C}_j] = \begin{cases} d^1[\bar{C}_j], & \text{if } x_j \geq 0, \\ d^2[\bar{C}_j], & \text{if } x_j < 0; \end{cases} \quad D^2[\bar{C}_j] = \begin{cases} d^2[\bar{C}_j], & \text{if } x_j \geq 0, \\ d^1[\bar{C}_j], & \text{if } x_j < 0; \end{cases}$$

$$D^1[\bar{A}_{ij}] = \begin{cases} d^1[\bar{A}_{ij}], & \text{if } x_j \geq 0, \\ d^2[\bar{A}_{ij}], & \text{if } x_j < 0; \end{cases} \quad D^2[\bar{A}_{ij}] = \begin{cases} d^2[\bar{A}_{ij}], & \text{if } x_j \geq 0, \\ d^1[\bar{A}_{ij}], & \text{if } x_j < 0, \end{cases} \quad (4)$$

то детерминированный эквивалент задачи нечеткого линейного программирования должен быть представлен не одной задачей, а последовательностью решения некоторого множества задач линейного программирования с различными математическими моделями, учитывающими все возможные комбинации знаков переменных задачи. Если количество переменных подмножества  $\tilde{J}^1$  равно  $m_1$ , подмножества  $\tilde{J}^2$  —  $m_2$  и подмножества  $\tilde{J}^3$  —  $m_3$  (где  $m_1 + m_2 + m_3 = m$ ), то необходимо решить  $2^{m_2}$  различных задач этого типа. Так, например, в случае  $m_1 = 3$ ,  $m_2 = 2$  и  $m_3 = 1$  необходимо решить  $2^2 = 4$  таких задач. Комбинации знаков переменных и коэффициентов этих задач:

$$1) (+++---), 2) (+++--+), 3) (+++--), 4) (+++--).$$

Как видно из формул (3) и (4), в каждой из математических моделей этих задач все коэффициенты  $D^1[\bar{C}_j(\lambda)]$ ,  $D^2[\bar{C}_j(\lambda)]$ , а также  $D^1[\bar{A}_{ij}(\lambda)]$ ,  $D^2[\bar{A}_{ij}(\lambda)]$  при переменных подмножества  $\tilde{J}^1$  рассчитываются по различным формулам как для положительных значений переменных, так и для подмножества  $\tilde{J}^3$  — для отрицательных значений, а для переменных под-

множества  $\tilde{J}^2$  — в зависимости от знака этой переменной, выбранной в данной конкретной комбинации. Среди всех допустимых решений этих задач выбирается решение с лучшим значением критерия оптимальности:

$$F_k^1 = \min_{X \in [h^1, h^2]} \sum_{j=1}^n x_j [D^1(\bar{C}_j(\lambda_k))];$$

$$F_k^2 = \min_{X \in [h^1, h^2]} \sum_{j=1}^n x_j [D^2(\bar{C}_j(\lambda_k))], \quad k = 0, 1, \dots, K,$$

либо

$$F^3 = \min_{X \in [h^1, h^2]} \sum_{j=1}^n x_j G(\bar{C}_j) \quad (5)$$

в условиях ограничений на переменные (1), а также различных требований выполнения системы ограничений

$$\hat{d}(\bar{B}_i^1(\lambda_k)) \leq \sum_{j=1}^n x_j [\hat{d}(\bar{A}_{ij}(\lambda_k))] \leq \hat{d}(\bar{B}_i^2(\lambda_k)), \quad k = 0, 1, \dots, K; \quad i = 1, \dots, n.$$

Здесь  $\hat{d}(\cdot)$  — значения  $d^1(\cdot)$  или  $d^2(\cdot)$  в зависимости от различных требований выполнения ограничений предусматривают их безусловное или условное (менее строгое) их выполнение.

Множество критериев (4) представим аддитивной сверткой критериев

$$\Phi = \min_{X \in [h^1, h^2]} \sum_{k=0}^K \left\{ \eta_k^1 \sum_{j=1}^n x_j [D^1(\bar{C}_j(\lambda_k))] + \eta_k^2 \sum_{j=1}^n x_j [D^2(\bar{C}_j(\lambda_k))] \right\}, \quad (6)$$

где  $\eta_k^1 \geq 0$ ,  $\eta_k^2 \geq 0$  — весовые коэффициенты, удовлетворяющие условиям  $\sum_{k=0}^K (\eta_k^1 + \eta_k^2) = 1$ .

Рассмотрим различные виды детерминированных эквивалентов рассматриваемых в работе задач нечеткого линейного программирования.

**Задачи 1, 2, 3 (безусловное выполнение системы ограничений).** Необходимо решить  $2^{m_2}$  задач линейного программирования, в каждой из которых требуется минимизировать критерий оптимальности (5) или (6), либо критерий

$$\Phi = \min_{X \in [h^1, h^2]} \sum_{k=0}^K \beta_k \sum_{j=1}^n x_j \bar{D}[\bar{C}_j(\lambda_k)], \quad (7)$$

где  $\bar{D}[\bar{C}_j(\lambda_k)] = 0,5 \{D^1[\bar{C}_j(\lambda_k)] + D^2[\bar{C}_j(\lambda_k)]\}$ ,  $k = 0, 1, \dots, K$ , в условиях системы ограничений для  $k = 0, 1, \dots, K$ ;

$$d^2[\bar{B}_i^1(\lambda_k)] \leq \sum_{j=1}^m D^p[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)] x_j \leq d^1[\bar{B}_i^2(\lambda_k)], \quad p = 1, 2, \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Если в задаче используются коэффициенты  $D^1[\bar{C}_j(\lambda_k)]$  и  $D^1[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]$ ,  $j = 1, \dots, m_2$ ,  $i = 1, \dots, n$ , то ограничения на детерминированные значения пе-

ременных должны быть в виде  $0 \leq x_j \leq h_j^2$ . Коэффициенты  $D^2[\bar{C}_j(\lambda_k)]$  и  $D^2[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]$ ,  $i = 1, \dots, n$ , используются для подмножества переменных  $\tilde{J}^3$ , т.е.  $j = m_2 + 1, \dots, m$ , а также подмножества переменных  $\tilde{J}^2$  при условии, что на все эти переменные будут наложены ограничения  $h_j^1 \leq x_j < 0$ ,  $j = 1, \dots, m_2$ .

Среди всех допустимых решений этих задач находим решение с наименьшим значением целевой функции. Данное решение и принимается в качестве решения сформулированной задачи нечеткого линейного программирования. В большинстве практических приложений все переменные задачи — положительные действительные числа, т.е.  $m_2 = 0$  и  $2^{m_2} = 1$ , модель детерминированного эквивалента задачи нечеткого линейного программирования однозначна, и необходимо решать только одну из рассматриваемых задач.

Если ни одна из сформулированных  $2^{m_2}$  детерминированных задач не имеет допустимых решений, то решений исходной задачи в условиях безусловного выполнения всей системы ограничений не существует. В этом случае могут быть рассмотрены различные постановки задач, предусматривающие выполнение системы ограничений в слабом смысле.

**Задачи 4, 5, 6 (условное выполнение системы ограничений).** Необходимо решить  $2^{m_2}$  задач линейного программирования, в каждой из которых требуется минимизировать критерий оптимальности (5) или (6), либо (7) в условиях системы ограничений

$$d^1[\bar{B}_i^1(\lambda_k)] \leq \sum_{j=1}^m \bar{D}[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]x_j \leq d^2[\bar{B}_i^2(\lambda_k)], \quad k = 0, 1, \dots, K, \quad p = 1, 2, \quad i = 1, \dots, n, \quad (9)$$

$\bar{D}[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)] = 0,5\{D^1[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)] + D^2[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]\}$ , а значения  $D^1[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]$  и  $D^2[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]$  вычисляются по формулам

$$D^1[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)] = \begin{cases} d^1[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)], & \text{if } x_j \geq 0, \\ d^2[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)], & \text{if } x_j < 0; \end{cases} \quad D^2[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)] = \begin{cases} d^2[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)], & \text{if } x_j \geq 0, \\ d^1[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)], & \text{if } x_j < 0. \end{cases}$$

При этом ограничения на переменные  $x_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , устанавливаются аналогично описанным в задачах 1–3.

Кроме того, могут рассматриваться более слабые, чем в задачах 1–3, условия, которые определяют менее строгое выполнение системы ограничений:

$$d^1[\bar{B}_i^1(\lambda_k)] \leq \sum_{j=1}^m D^p[[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]_{ij}(\lambda_k)]x_j \leq d^2[\bar{B}_i^2(\lambda_k)], \quad p = 1, 2, \quad i = 1, \dots, n.$$

**Задачи 7, 8, 9 (выполнение системы ограничений в слабом смысле).** Необходимо решить  $2^{m_2}$  задач линейного программирования, в каждой из которых требуется минимизировать критерий оптимальности (5) или (6), либо (7) в условиях системы ограничений

$$G(\bar{B}_i^1) \leq \sum_{j=1}^m \bar{G}(\bar{A}_{ij})x_j \leq G(\bar{B}_i^2), \quad i = 1, \dots, n.$$



**Задачи 10, 11, 12 (выполнение системы ограничений в слабом смысле).** Необходимо решить  $2^{m_2}$  задач линейного программирования, в каждой из которых требуется минимизировать критерий оптимальности (5) или (6), либо (7) в условиях системы ограничений (9) для значений  $k = k_1 > 0, k_1 + 1, \dots, K$ , а для значений  $k = 0, 1, 2, \dots, (k_1 - 1)$  — выполнение только одной из пары ограничений

$$d^1[\bar{B}_i^1(\lambda_k)] \leq \sum_{j=1}^m D^p[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]x_j,$$

либо

$$\sum_{j=1}^m D^p[\bar{A}_{ij}(\lambda_k)]x_j \leq d^2[\bar{B}_i^2(\lambda_k)], \quad k = 0, 1, 2, \dots, (k_1 - 1), \quad i = 1, \dots, n.$$

То есть для сечений с малым значением функций принадлежности не требуется строгого выполнения двухсторонних ограничений, а ставится требование выполнения только одного из них, а в некоторых случаях допускается, что не будет выполнено ни одно из них. Выбор значений  $k = k_1$ , а также степени важности одного из пары ограничений является субъективным, зависит от специфики прикладной задачи и решения ЛПР.

Как и в задачах 1–3, во всех задачах 4–12, предусматривающих выполнение всей системы ограничений в слабом смысле, в случае получения допустимого решения некоторых из сформулированных задач в качестве решения задачи нечеткого линейного программирования в условиях условного выполнения системы ограничений принимается допустимое решение детерминированной задачи с наилучшим значением критерия оптимальности. Если ни одна из сформулированных задач не имеет допустимого решения, то в сформулированной постановке решения исходной задачи нечеткого линейного программирования не существует.

Следует отметить, что для большинства практических приложений значения переменных задачи могут быть только положительными действительными числами, т.е.  $h_j^2 \geq h_j^1 \geq 0, \quad j = 1, \dots, m$ . В этом случае  $m_2 = 0$  и необходимо решать только одну из каждого вида детерминированных задач 1–12.

Обозначим соответственно  $\tilde{\Omega}_0$  и  $\tilde{\Omega}_l, \quad l = 1, \dots, L$ , множества значений переменных задачи, удовлетворяющих системе неравенств, обеспечивающих безусловное и различного вида нестрогое (условное) выполнение ограничений для нечетких множеств сформулированной задачи;  $\bar{F}_0^3, \bar{\Phi}_0$  и  $\bar{F}_l^3, \bar{\Phi}_l, \quad l = 1, \dots, L$ , — соответственно минимальные значения критериев оптимальности в решении этих задач.

**Утверждение.** 1. Так как  $\tilde{\Omega}_0 \subseteq \tilde{\Omega}_l$ , то  $\bar{\Phi}_l \leq \bar{\Phi}_0, \quad \bar{F}_l^3 \leq \bar{F}_0^3, \quad l = 1, \dots, L$ .

2. Если  $\tilde{\Omega}_\xi \subseteq \tilde{\Omega}_l$ , то  $\bar{\Phi}_l \leq \bar{\Phi}_\xi, \quad \bar{F}_l^3 \leq \bar{F}_\xi^3, \quad l, \xi = 1, \dots, L$ .

Предлагается следующий процесс решения сформулированной проблемы. Формулируется детерминированный эквивалент, предусматривающий безусловное выполнение всех ограничений задачи в виде задач 1–3 при условии выполнения системы неравенств в виде (8). Если какая-то из сфор-

мулированных  $2^{m_2}$  задач имеет допустимое решение, то на этом процесс поиска решений завершается. В противном случае формулируем различные виды детерминированных эквивалентов, предусматривающих нестрогое (условное) выполнение всех ограничений в виде задач 1–3 при условии выполнения системы неравенств в виде (9), либо в форме задач 4–12. При этом в соответствии с решением экспертного совета и ЛПР на каждом из последующих этапов определяется и увеличивается то подмножество неравенств и (или) сечений, для которых могут быть ослаблены требования выполнения ограничений. Этот процесс продолжается до тех пор, пока на некотором этапе не будет получено допустимое решение одной из сформулированных задач.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулирована задача нечеткого линейного программирования с двухсторонними ограничениями детерминированных значений переменных и линейными функциями, в которой левые и правые граничные значения линейных функций, коэффициенты ограничений и критерия оптимальности суть нечеткие множества, представленные fuzzy-интервалами с  $LR$ -функциями принадлежности общего вида.

Предложены правила ранжирования и оценки доминирования для нечетких множеств, установлены условия безусловного (строгого) и условного (нестрогого) выполнения ограничений для нечетких множеств с функциями принадлежности, представленных  $LR$  fuzzy-интервалами.

Предложены различные детерминированные эквиваленты сформулированных задач нечеткого линейного программирования в условиях, когда переменные задачи могут принимать как положительные, так и отрицательные значения в виде решения  $2^{m_2}$  детерминированных задач линейного программирования, предусматривающие различные требования к строгости выполнения всей системы ограничений. Каждая из этих  $2^{m_2}$  задач содержит существенно большее количество ограничений, но может быть решена симплексным методом линейного программирования. Если переменные задачи могут принимать только неотрицательные значения, то каждый детерминированный эквивалент представлен только одной задачей.

В случае отсутствия решения задачи, обеспечивающего безусловное выполнение всей системы fuzzy-ограничений, последовательное ослабление требований к выполнению отдельных неравенств и формулирование различного вида детерминированных эквивалентов, обеспечивающих нестрогое выполнение ограничений для нечетких множеств (fuzzy-множеств), происходит на основе субъективных соображений ЛПР в соответствии со спецификой решаемой задачи.

В подавляющем большинстве практических задач принятия решений все действительные значения переменных задачи могут принимать только положительные значения. Следовательно,  $m_2 = 0$  и  $2^{m_2} = 1$ , и в зависимости от требования к строгости выполнения ограничений необходимо решать не несколько, а только одну задачу каждого класса. Однако для некоторых задач управления промышленными объектами возможны и отрицательные

значения управляющих переменных (например, если они заданы в отклонениях от стандартной величины), для которых предлагаемые математические модели и алгоритмы найдут прикладные приложения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шаталова А.Ю. Нечеткое линейное программирование в задачах оптимального финансирования инвестиционных проектов, максимизирующей получаемый предприятием доход / А.Ю. Шаталова, К.А. Лебедев // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. — 2015. — № 9–1. — С. 35–38;
2. Шведов А.С. Нечеткое математическое программирование: краткий обзор / А.С. Шведов // *Проблемы управления*. — М., № 3, 2017. — С. 2–10.
3. Zimmermann H.-J. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions / H.-J. Zimmermann // *Fuzzy Sets and Systems*. — 1978. — Vol. 1. — P. 45–57.
4. Rommelfanger H.J. Fuzzy-Optimierungsmodelle in praktischen Anwendungen // *Multi-Criteria und Fuzzy-Systeme in Theorie und Praxis*. — Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden 2003. — P. 95–113.
5. Rommelfanger H.J. Entscheiden bei Unschärfe. Fuzzy Decision Support System / H.J. Rommelfanger. — Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, Second edition 1994.
6. Зайченко Ю.П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Ю.П. Зайченко. — К.: Слово, 2008. — 344 с.
7. Sakawa M. Fuzzy Sets and multiobjektive optimization / M. Sakawa. — N-Y: Plenum Press, 1993. — 380 p.
8. Maleki H.R. Linear programming with fuzzy variables / H.R. Maleki, M. Tata, M. Mashinchi // *Fuzzy Sets and Systems*. — 2000. — Vol. 109. — P. 21–33.
9. Mahdavi-Amiri N. Duality in fuzzy number linear programming by use of a certain linear ranking function / N. Mahdavi-Amiri, S.H. Nasserri // *Applied Mathematics and Computation*. — 2006. — Vol. 180. — P. 206–216.
10. Delgado M. A general model for fuzzy linear programming / M. Delgado, J.L. Verdegay, M.A. Vila // *Fuzzy sets and System*. — Vol. 29. — 1989. — P. 21–29.
11. Bellman R.E. Decision-Making in Fuzzy Environment / R.E. Bellman, L.A. Zadeh // *Management Science*. — 1970. — Vol. 17. — N 4. — P. 141–160.
12. Беллман Р. Принятие решений в расплывчатых условиях / Р. Беллман, Л. Заде // *Вопросы анализа и процедуры принятия решений*. — М.: Мир, 1976. — С. 172–215.
13. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский // М.: Радио и связь, 1981. — 286 с.
14. Згуровский М.З. Модели принятия решений в нечетких условиях / М.З. Згуровский, Ю.П. Зайченко. — К.: Наук. думка. — 211 с.
15. Зак Ю.А. Принятие решений в условиях размытых и нечетких данных / Ю.А. Зак. — М.: URSS, 2013. — 352 с.
16. Зак Ю.А. Четкий эквивалент задачи Fuzzy-линейного программирования / Ю.А. Зак // *Проблемы управления и информатики*. — К., 2011. — № 1. — С. 87–101.
17. Зак Ю.А. Многокритериальные задачи математического программирования с размытыми ограничениями. Математические модели схем компромисса. Выбор решений из конечного множества альтернатив // *Кибернетика и системный анализ*. — К., 2010. — № 5. — С. 80–89.

*Поступила 01.09.2017*

## СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО МЕНЕДЖМЕНТУ ФІНАНСОВИХ РИЗИКІВ

Н.В. КУЗНЕЦОВА, П.І. БІДЮК

**Анотація.** Досліджено принципи, методи, процедури та засоби системного підходу до аналізу та менеджменту ризиків. Наведено міжнародні загальновідомі стандарти менеджменту ризиків різних типів та показано міжнародну класифікацію рейтингів фінансових ризиків. На прикладі банківських ризиків порівняно існуючі стандарти та показано можливості зведення існуючих підходів рейтингування в єдину структурну таблицю та оцінено довірчий інтервал імовірності настання фінансового ризику. Наведено основні особливості та характеристики категорії «ризик», а також якісні та кількісні характеристики для його оцінювання, формалізацію понять толерантності до ризику та прийнятного ризику і показано їх взаємозв'язок. На основі виконаного аналізу існуючих міжнародних підходів до менеджменту ризику запропоновано системну методологію аналізу та менеджменту ризиків, яка ґрунтується на основних принципах та методах системного аналізу; у ній враховано основні закономірності й особливості розвитку фінансових процесів, передбачено опрацювання невизначеностей різної природи, зумовлених особливостями фінансових даних, а також враховано міжнародну практику та включено нові комбіновані методи мінімізації фінансових ризиків.

**Ключові слова:** системний підхід, менеджмент ризиків, фінансові ризики, системна методологія, невизначеність.

### ВСТУП

Системний підхід до аналізу та менеджменту фінансових ризиків у певному сенсі є методологічним засобом [1, 2] дослідження інтегральних залежностей і взаємодії факторів появи чи прояву ризиків, прогнозування та оцінювання наслідків реалізації ризиків, напрацювання рекомендацій щодо опрацювання ризиків у межах систем управління ризиками з метою їх мінімізації.

Фінансові ризики не є самостійними — вони тісно пов'язані з інформаційними ризиками, предметними ризиками різних сфер діяльності [3], під час оцінювання зазнають впливу відповідних методів та засобів аналізу, тому саме системний підхід до дослідження фінансових ризиків має дати змогу, з одного боку, розглянути їх у комплексі з іншими ризиками і впливами, а з другого — виокремити їх як самостійний об'єкт дослідження.

Застосування системного підходу до мінімізації фінансових ризиків передбачає певну етапність дій у дослідженні й опрацюванні ризиків, а в реальній діяльності потребує виконання постійного моніторингу ризиків, удосконалення процесів збирання, оброблення та оцінювання інформації, що використовуються у процедурах моделювання і напрацювання рішень щодо менеджменту ризиків.

### ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1. Виконати дослідження із застосуванням наявних принципів, методів та процедур, існуючих підходів та міжнародних практик до аналізу та менеджменту ризиків.

2. На основі виконаного аналізу розробити структурні елементи системної методології менеджменту фінансових ризиків, у яких би враховувались основні закономірності й особливості розвитку фінансових процесів, невизначеності різної природи, пов'язані з особливістю фінансових даних, міжнародна практика та включались нові комбіновані методи мінімізації фінансових ризиків.

На прикладі фінансових ризиків банківської системи буде показано можливість формалізації та категоризації фінансових ризиків з урахуванням вітчизняної класифікації Національним банком України (НБУ) та міжнародної методології рейтингових агенцій Standard & Poor's, Moody's та Fitch.

### КАТЕГОРІЯ «РИЗИК»: СУТНІСТЬ ТА ОСНОВНІ ВЛАСТИВОСТІ

Оскільки ризик визначається як кількісно вимірювана можливість утрат, то ймовірність виникнення втрат, збитків, ненадходження доходу, прибутку, а також невизначеність фінансових результатів у майбутньому, існує імовірність певного результату, бажаного чи небажаного, то відповідно його кількісною характеристикою найчастіше є або ймовірнісний, або певний грошовий показник. Як правило, фінансовий ризик  $R(t)$  пов'язується з певним фінансовим активом, характеристиками якого є дохідність і ризик.

Ризик як філософська категорія характеризується такими властивостями, які є спільними для всіх типів ризику (рис. 1).



Рис. 1. Категорія «ризик» та її основні характеристики

Розглянемо детальніше основні властивості ризику. Ризик за означенням є слабо структурованим, оскільки виникає в результаті невизначеності подій та ситуацій, зовнішнього середовища, незнання дій контрагентів, неповноти і неточності формалізації завдання, нечіткості як самих вхідних даних, процесів, так і моделей, що їх описують [4]. У результаті діяльності підприємства як суб'єкта впливу ризику може змінюватись як рівень самого

ризик за рахунок зміни наслідків та можливих очікуваних втрат (як несприятлива реалізація ризику), так і ймовірність реалізації ризику (від мало-ймовірних до найімовірніших).

Загалом вважають, що ризик є причиною несприятливих наслідків (тобто розглядають лише його негативні прояви), а тому важливим для суб'єкта є таке: який це тип ризику і який він справляє безпосередній вплив. Насправді ризик може трактуватись не лише як несприятливі наслідки, а і як неочікуваний дохід. Тут проявляється деяка неоднозначність і суперечливість ризику, пов'язана із суб'єктивністю його оцінювання. Під альтернативністю ризику розуміють необхідність вибору з двох або більше альтернатив можливих дій, варіантів, тобто виникає ризик обрати не найкращу можливість. Якщо можливості вибору немає, то не виникає такого типу ризикової ситуації і ризику відповідно.

Суб'єктивність ризику зумовлена тим, що люди по-різному сприймають одну і ту саму величину економічного ризику, оскільки мають різний світогляд, матеріальний стан та психологічне сприйняття ситуації. Об'єктивна природа ризику породжена здебільшого тим, що ризик не з'являється нізвідки, а проявляється як наслідок різноманітності природних, соціальних і технологічних взаємозв'язків, у які вступають об'єкти, відображає реальну ситуацію в суспільстві та віддзеркалює природний стан речей. Можна зробити висновок, що для всебічного оцінювання ризику і врахування всіх його характеристик та особливостей маємо використовувати раціональний підхід, який базується на оцінюванні ризиків через імовірність його настання та можливі втрати.

#### ЯКІСНІ ТА КІЛЬКІСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФІНАНСОВИХ РИЗИКІВ

Якісні методи оцінювання ризиків застосовуються для визначення виду ризику і виділення тих ризиків, які потребують швидкого реагування і є найбільш важливими. Найчастіше для якісного оцінювання використовуються метод дерев рішень (дозволяє визначити кінцеву кількість варіантів розвитку подій, установити ймовірність їх реалізації і визначити якісні та кількісні характеристики ризику для кожного варіанта) та метод аналізу сценаріїв, що розглядає чутливість критерію чистої вартості (NPV) до змін ключових змінних і діапазон їх імовірнісних значень.

Кількісні методи оцінювання ризиків дозволяють визначити ймовірність виникнення ризику і наслідків впливу ризику на діяльність компанії. Серед основних методів кількісної оцінки ризиків — ймовірнісні методи на основі теорії ймовірностей, теоретико-ігрові (матриці), аналіз точки беззбитковості, імітаційна модель Д. Хертца, метод еквіваленту, метод оцінювання доходності тощо [3].

#### РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТ НА ОСНОВІ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ

Сьогодні основні підходи до менеджменту ризиків у світі формуються такими організаціями та стандартами:

**FERMA** (Federation of European Risk Management Association) — Європейська федерація асоціації ризик-менеджменту — в її документах запропоновано модель ідентифікації подій.

**ERM COSO** (Enterprise Risk Management – Integrated Framework Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission) — принципи ризик-менеджменту, розроблені Комітетом спонсорських організацій Комісії Тредвєя разом з компанією Price Waterhouse Coopers.

**ISO/IEC Guide 73** — стандарт, розроблений Міжнародною організацією зі стандартизації (International Organization of Standardization), у якому описано системний підхід до оцінювання й управління ризиками.

**PMBoK** (Project Management Body of Knowledge) — стандарт управління проектами, сформований Американським інститутом управління проектами (Project Management Institute, PMI). Описує всі стадії життєвого циклу проекту, включаючи елементи проектного ризик-менеджменту.

**Basel II** — Угода комітету з банківського нагляду; містить збірник нормативів з поліпшення техніки оцінювання кредитних ризиків і управління ними.

Найчастіше аналізом фінансових ризиків займаються відділи ризик-менеджменту банків та фінансових установ, які спираються на основні положення Базелівської угоди (Base II та Base III) [5–7]. Основною метою їх роботи є виявлення і прогнозування ризиків, які можуть виникнути в організації, класифікація ризику, визначення його рівня та рейтингу. Значення критичного рівня ризику може визначатися банком згідно зі встановленою політикою банку або Базельською угодою [6].

Існують спеціальні організації, що виконують класифікацію фінансових установ щодо рівня обслуговування їх зобов'язань та фінансового стану, зокрема міжнародні рейтингові організації Standard & Poor's, Moody's, Fitch тощо. Класифікацію ризиків для корпоративних клієнтів — фінансових установ, банків, корпорацій — подано в табл. 1.

**Таблиця 1.** Класифікація ризиків юридичних осіб

КОРПОРАЦІЇ	INGS & P	Moody's	PD Range	Average PD (інтерполяція)	Average PD (основний клас)	Рекомендований для оцінювання ринкової вартості		
PERFORMING	1	AAA	Aaa	<0,01	0,00	0,00	NO (GLOBAL) INVESTMENT GRADES applicable	
	2	AA+	Aa1	0,01 – 0,02	0,01	0,01		
	3	AA	Aa2	0,02 – 0,04	0,02			
	4	AA-	Aa3	0,04 – 0,05	0,04			
	5	A+	A1	0,05 – 0,06	0,05	0,05		
	6	A	A2	0,06 – 0,08	0,07			
	7	A-	A3	0,08 – 0,11	0,09			
	8	BBB+	Baa1	0,11 – 0,17	0,15	0,37	A	0,318%
	9	BBB	Baa2	0,17 – 0,29	0,25			
	10	BBB-	Baa3	0,29 – 0,51	0,42			
	11	BB+	Ba1	0,51 – 0,89	0,71	1,45	BBB	0,504%
	12	BB	Ba2	0,89 – 1,54	1,19		BBB	1,005%
	13	BB-	Ba3	1,54 – 2,67	2,00		BBB	2,004%
	14	B+	B1	2,67 – 4,62	3,35	6,59	CCC+	3,175%
	15	B	B2	4,62 – 8,01	5,63		CCC	3,997%
							CC+	6,332%
CC							7,969%	
16	B-	B3	8,01 – 13,88	9,45	C+	12,625%		
Special Mention (спеціальна оцінка)	17	CCC	Caa1	13,88–26,63	15,89	15,89	C	15,890%
NON – Sub-Standard	18	CC	Caa2	26,63 – 44,7	34,14	34,14	D	34,14
PERF Doubtful	19	C	Caa3	44,70 – 100		44,70		44,70
ORM Liquidation – no Loss	20	D	D	100		100,00		100,00
ING Liquidation – with Loss	21	D	D	100		100,00		100,00

**ФОРМАЛІЗАЦІЯ РЕЙТИНГУ ТА РІВНЯ РИЗИКУ**

Залежно від завдань, що можуть вирішуватися у компанії, будуть визначатися різні рівні критичного ризику. Наприклад, якщо компанія перебуває на рівні AAA, то критичним рівнем для такого підприємства буде можливість переходу/ів в іншу/і категорію/і (на клас нижче), тобто зниження рейтингу компанії до рівня BBB+, тоді

$$R_{кр(AAA)} = P(D_{BBB+}),$$

де ймовірність дефолту компанії для категорії BBB+ визначається в межах  $P(D_{BBB+}) \in [0,11; 0,17]\%$ . За такої постановки завдання можна визначити формалізацію для визначення категорії та рейтингу ризику протягом певного періоду часу (кількість місяців)  $0 < t < 12$ , тобто протягом року. Для первинної категорії (класифікації) компанії або підприємства чи банку ризик вважається прийнятним, якщо

$$R_{пр} < R_{кр},$$

де  $R_{пр}$  — прийнятний ризик для цієї категорії;  $R_{кр}$  — критичний ризик, тобто ліва межа ймовірності дефолту, що характеризує наступний (нижчий) рівень категорії або класифікації в таблиці за стандартними оцінками рейтингів (рівнів) компанії.

Матрицю переходів компанії з одного класу (категорії або рівня) в інший за один рік можна подати у вигляді матриці міграції, що ілюструє (рис. 2), який відсоток компаній з кожної категорії протягом одного року змінюють свій рейтинг, підвищуючи його (що здебільшого характерно для категорій BBB, BB, B та CCC) і зовсім не є характерним для компаній з найвищим рейтингом (AAA, AA, A). Це зумовлено передусім надзвичайно жорсткими вимогами та критеріями, яким має відповідати компанія, що отримує найвищі рівні рейтингу і неможливістю виконання нею протягом року необхідних зобов'язань для переходу на ще вищий рівень класифікації.

Категорія	AAA	AA	A	BBB	BB	B	CCC	D	NR
AAA	93,37	4,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,81
AA	0,74	90,59	3,51	0,92	0,00	0,37	0,00	0,00	3,88
A	0,00	1,88	89,56	3,95	0,19	0,56	0,00	0,00	3,86
BBB	0,00	0,27	3,88	86,50	2,67	0,94	0,13	0,13	5,48
BB	0,00	0,00	0,19	8,97	75,95	4,77	0,00	0,38	9,73
B	0,00	0,00	0,67	0,45	7,62	73,32	2,69	3,36	11,88
CCC	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	14,82	51,85	11,11	22,22

Рис. 2. Матриця переходів компанії (міграції)

Стандартна міжнародна класифікація передбачає існування 22 категорій (одна категорія завжди визначається як NR – no rating, тобто неможли-



вість застосування рейтингу з об'єктивних чи суб'єктивних причин). За методологією RAROC (Risk-Adjusted Return on Capital) необхідно визначити та зіставити класифікацію і рейтинги, запропоновані міжнародними компаніями (S&P, Moody's) і традиційною вітчизняною класифікацією, що складається з 11 категорій (табл. 2).

**Таблиця 2.** Українська класифікація компаній

Рейтинг	Опис
1	Високоякісні корпорації, імовірність виплати якими відсотків та основної суми є вищою, ніж урядом країни. Імовірність впливу кризи у країні на ці компанії є незначною
2	Найкращі корпорації та компанії з державними гарантіями. Імовірність виплати відсотків та основної суми є високою. Вони іноді є вразливими перед несприятливими змінами в діловому, економічному та зовнішньому середовищах
3	Успішні компанії та кращі із середніх компаній. На них, імовірно, вплинуть несприятливі зміни в економіці
4	Імовірність виплати відсотків та основної суми є середньою. Несприятливі зміни в ділових, економічних та інших зовнішніх умовах неминуче призведуть до нездатності або неготовності компанії сплачувати відсотки та погашати основну суму
5	Існує певна ймовірність виплати відсотків та основної суми
6	Імовірність виплати відсотків та основної суми є пониженою
7	Особливі позичальники. Виплата відсотків та основної суми залежатиме від того, наскільки сприятливими будуть економічні умови. Цих позичальників необхідно контролювати один раз на півроку
8	Особливі позичальники. Виплата відсотків та основної суми залежатиме від того, наскільки сприятливими будуть економічні умови. Цих позичальників необхідно контролювати раз на квартал
9	Неякісні позичальники. Імовірно не сплачуватимуть ні відсотки, ні основну суму. Кредити їм, як правило, не надаються. Позичальників, що належать до цієї категорії, доводиться заставляти погашати кредити
10	Неякісні позичальники. Імовірно не внесуть навіть першого платежу на погашення відсотків основної суми. Нові кредити таким позичальникам надаються лише за виняткових обставин
11	У компанії дефолт. Вона не сплачує відсотки та основну суму протягом більш ніж три місяці

Існуючі міжнародні та вітчизняні методології здебільшого розроблені для стрес-тестування під час оцінювання ризиків і не ставлять перед собою завдання виявлення першопричин ризику для запобігання навіть їх появі. Ці методології досить суб'єктивні; невідомі вхідні параметри та критерії, за якими виконується оцінювання; неможливо перевірити коректність виставлених оцінок; ґрунтуються лише на особистому авторитеті організації, які їх формують. Крім вітчизняної методології, всі інші методології пропонуються організаціями зі Сполучених Штатів Америки, а тому навіть з урахуванням специфіки країни та адаптації розрахункових показників не можуть зі стовідсотковою достовірністю давати об'єктивний результат. З урахуванням цих недоліків дедалі актуальнішим стає не лише адаптація існуючої методології оцінювання фінансових ризиків до українських реалій, а і розроблення власної вітчизняної методології. Для банківських ризиків органом, що

відповідає за напрацювання рекомендацій та формулювання стандартів для оцінювання банківських фінансових ризиків, є НБУ.

За стандартами НБУ надається таке означення допустимого ризику: визначення такого рівня ризику, на який банк погоджується для досягнення мети його діяльності (толерантність до ризику) та виконання його стратегічних завдань у межах стандартного плану розвитку ситуації і можливих стресових ситуацій. Рівень допустимого ризику зазвичай визначається у внутрішніх положеннях та планах банку, які затверджуються відповідно до принципів корпоративного управління [8].

Кількісна оцінка толерантності до ризику банку визначається так:

$$\tau = \frac{2(\bar{X} - X_{rf})\sigma_X^2}{(\bar{X} - X_{rf})^2},$$

де  $\tau$  — кількісна оцінка толерантності ризику суб'єкта господарювання;  $\bar{X}$  — очікувана величина цільового показника (математичне сподівання);  $X_{rf}$  — безризикове абсолютне значення цільового показника  $X$ ;  $\sigma_X^2$  — дисперсія цільового показника  $X$ .

Установлені такі ранжування толерантності до ризику:

- мінімальний обсяг прийнятного ризику — фактична толерантність в інтервалі 0–50% регулятивного капіталу;
- нормальний обсяг прийнятного ризику — фактична толерантність в інтервалі 51–90%;
- збільшений обсяг прийнятного ризику — фактична толерантність в інтервалі 91–94%;
- великий обсяг прийнятного ризику — фактична толерантність в інтервалі 95–97%;
- **кризовий** — фактична толерантність понад 98%.

Математична формалізація величини ризику виконується за формулою

$$R = P \otimes U, \quad (1)$$

де  $P$  — імовірність настання несприятливої події;  $U$  — її наслідки (втрати або прибуток);  $\otimes$  — певним чином визначена композиція, яка найчастіше інтерпретується як множення.

Існуючі методики оцінювання рівня ризику пропонують різні трактування формули (1): в одних пріоритет надається імовірнісній складовій ризику, а в інших — значення збитку [9]. Причому з природи самого поняття «прийнятний ризик» випливає, що для

$$\forall U \exists! P \ P^*(U) = P.$$

Як  $P^*$  може бути використана, наприклад, функція вигляду

$$P = ae - b(U - U_{н.зб}), \quad (2)$$

де  $a$  і  $b$  — деякі константи:  $a$  — відповідає ймовірності прийняття незначного збитку  $U_{н.зб}$ ;  $b$  — характеризує швидкість падіння допустимої ймовірності нанесення збитку.

Крива толерантного ризику (тобто того, який приймається) проходить вище від кривої прийнятного ризику, а тому рівняння цієї кривої має вигляд

$$P^T = \beta P^*(U),$$

де  $\beta$  — деяка константа, а прийнятний ризик

$$R_{\text{пр}} = \frac{1}{1 - \bar{U}_{\text{н.зб}}} \int_{\bar{U}_{\text{н.зб}}}^1 P^*(U) dU. \quad (3)$$

Підставивши вираз (2) у рівняння (3) і взявши інтеграл для певного рівня прийнятного ризику, отримаємо:

$$R_{\text{пр}} = \frac{a}{b(1 - \bar{U}_{\text{н.зб}})} [1 - e^{-b(1 - \bar{U}_{\text{н.зб}})}].$$

Відповідно рівень толерантного ризику можна знайти за виразом

$$R^T = \beta R_{\text{пр}}.$$

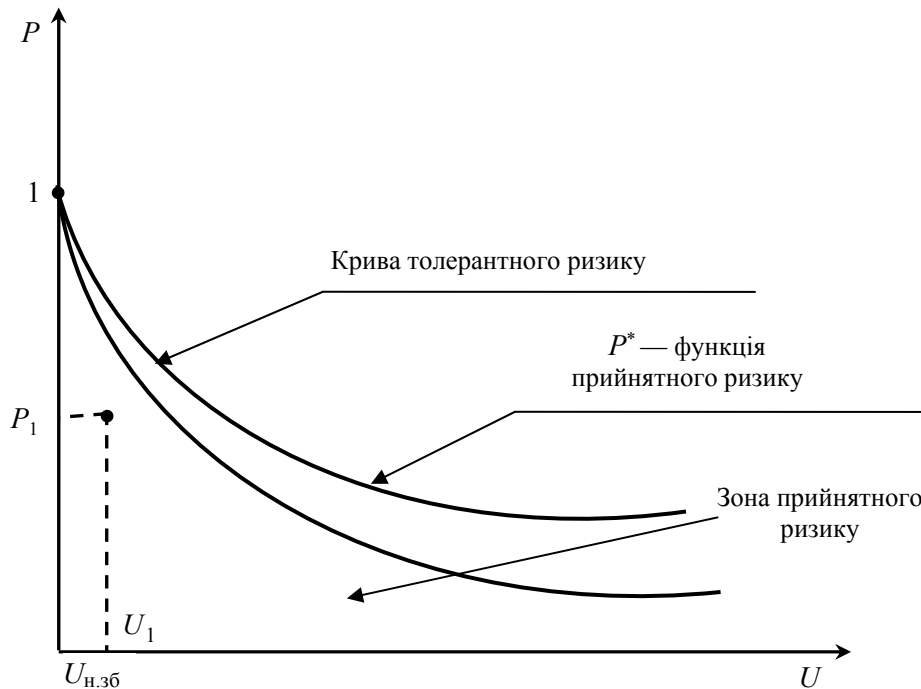


Рис. 3. Функції прийнятного і толерантного ризиків

Визначивши і формалізувавши поняття толерантного ризику, тобто такого, що може на себе взяти організація з урахуванням можливих втрат, систему ризик-менеджменту буде розробляти організація для визначення також критичного фактора ризику, тобто ризику, збитки за яким є граничнодопустимими для компанії. Тепер можна сформувати єдину системну методологію, яка об'єднуватиме всі описані властивості, категорії та методи оцінювання ризику в єдину систему підтримання прийняття рішень із застосуванням відповідних критеріїв для перевірки як якості вхідних даних, так і вихідних рівнів та рейтингів фінансового ризику.

## ЕЛЕМЕНТИ СИСТЕМНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ МЕНЕДЖМЕНТУ ФІНАНСОВИХ РИЗИКІВ

Відповідно до системного підходу потрібно виконати ретельний аналіз фінансових ризиків, причин їх появи та опрацювання невизначеностей різної природи, попередньо їх оцінити за відомими статистичними, математичними та економічними методами для виявлення найважливіших і найкритичніших рівнів ризику та можливих втрат, як проілюстровано на рис. 4. У системній методології мають бути задіяні функціональні, економічно-фінансові, імовірісно-статистичні та інші критерії, які дозволять обрати коректний метод для опрацювання конкретного виду фінансового ризику, оцінити повноту його дослідження та вибрати кращу модель, що описує ймовірність його появи та можливі втрати.

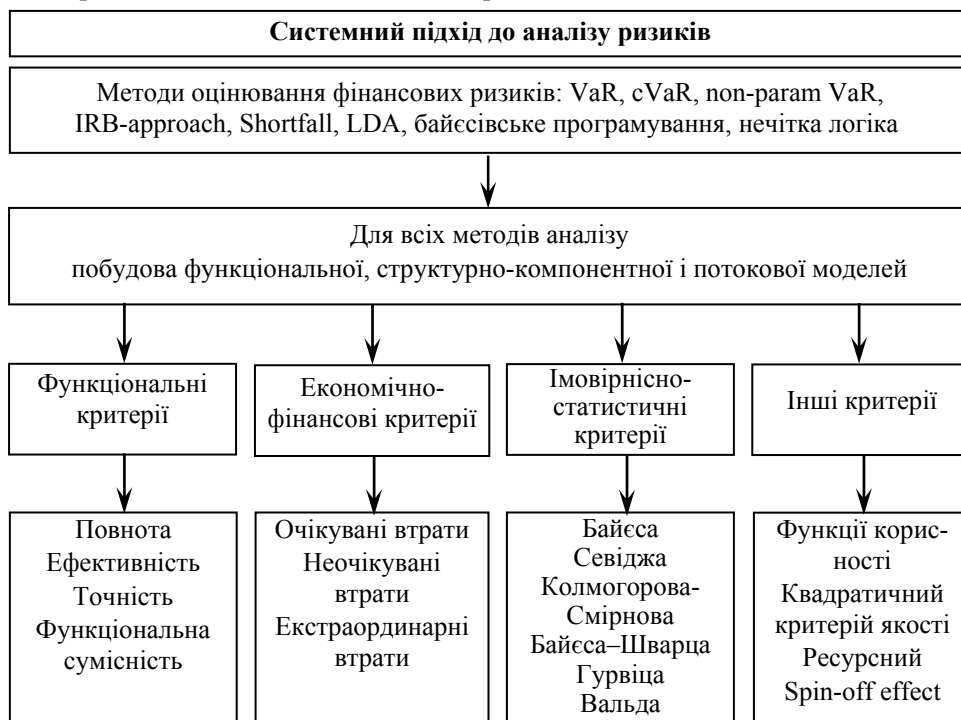


Рис. 4. Ілюстрація системного підходу до менеджменту фінансових ризиків з відповідними методами та критеріями

Функціональні критерії передбачають перевірку повноти опису ризику, ефективність застосування методу до категорії ризику, точність оцінювання ризику та функціональну сумісність, наприклад із застосуванням комбінованих методів оцінювання ризику чи одночасним урахуванням різних видів ризиків. За економічними або фінансовими критеріями оцінюють можливі збитки внаслідок реалізації ризику (очікувані, неочікувані та екстраординарні) і перевіряють, чи задовольняє існуюча в організації методологія ризик-менеджменту нормативи щодо необхідного економічного капіталу як джерела покриття збитків.

До категорії «інші критерії» можна віднести найрізноманітніші критерії, що дають змогу перевірити коректність використання ресурсів в існую-

чий методології, корисність застосування методології, супровідні ефекти, які дозволяє отримати розроблена методологія, критерії якості оцінок та гіпотез. Ці критерії не завжди формалізовані, можуть ґрунтуватися на досвіді та знаннях експертів, бути отриманими не одразу, а після запровадження цієї методології на практиці.

Для прийняття рішення в умовах невизначеності використовуються імовірнісно-статистичні критерії, найпоширеніші серед яких Лапласа, Вальда, Севіджа та Гурвіца [2].

**Критерій Севіджа.** Можна в кожному стовпці матриці виграшів  $A = |a_{ij}|$  обрати  $\max a_{ij}$  і скласти нову матрицю:

$$1 \leq i \leq n ;$$

$$r_{ij} = \max a_{ij} - a_{ij} .$$

Матриця ризиків  $R = |r_{ij}|$  дає змогу обрати стратегію, за якою величина ризику набуває найменшого значення в найбільш несприятливій ситуації:

$$F_{\text{opt}} = F(X_{\text{opt}}, S) = \min \max_{1 \leq i \leq n} r_{ij} = \min \max_{1 \leq j \leq m} (\max a_{ij} - a_{ij}) .$$

Сутність критерію — за будь-яких умов уникнути великого ризику під час прийняття рішень. Це критерій крайнього песимізму, але критичнішим тут є не мінімальний виграш, а максимальний ризик — максимальна втрата виграшу порівняно з тим, що можна було досягнути за даних умов.

**Критерій Байсса.** У цьому випадку на множині всіх ситуацій вважається відомим апріорний розподіл імовірностей  $P(s_j)$ . Цей критерій мінімізує середні втрати, тобто ризик тут — математичне сподівання:

$$r(x_i) = \sum_{j=1}^m \bar{a}_{ij} P(s_j) .$$

Найкраща стратегія мінімізує ризик:

$$r(x^*) = \min \sum_{j=1}^m \bar{a}_{ij} P(s_j), 1 \leq i \leq n .$$

**Критерій Лапласа.** Припускається, що ймовірності результатів  $s_j$  однакові. Тоді для кожного рядка матриці виграшів  $A = |a_{ij}|$  підраховується середнє значення оцінок, а оптимальна стратегія — максимальне значення цього середнього:

$$F_{\text{opt}} = F(X_{\text{opt}}, S) = \max_{1 \leq i \leq n} \left[ \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m a_{ij} \right] ,$$

**Критерій Гурвіца.** Між крайнім песимізмом (очікування гіршого) та легковажним оптимізмом (очікування кращого) при виборі стратегії в умовах невизначеності критерій Гурвіца рекомендує розраховувати на деякий середній результат:

$$F_{\text{opt}} = F(X_{\text{opt}}, S) = \max [\alpha \max a_{ij} + (1 - \alpha) \min a_{ij}], 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m ,$$

де  $\alpha$  — коефіцієнт оптимізму,  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Якщо  $\alpha = 1$  критерій Гурвіца перетворюється в критерій крайнього песимізму Вальда; якщо  $\alpha = 0$ , — критерій крайнього оптимізму, коли рекомендується обирати стратегію, за якої в найкращих умовах виграш максимальний; якщо  $0 < \alpha < 1$ , — середня оцінка між крайнім песимізмом та крайнім оптимізмом. Чим більше небезпечна ситуація, тим більше особа, що приймає рішення, намагається «підстрахуватись» і  $\alpha \rightarrow 1$ .

**Критерій Вальда.** Оптимальною вважається стратегія, коли мінімальний виграш є максимальним, тобто гарантується виграш, не менший, ніж максимін:

$$F_{\text{opt}} = F(X_{\text{opt}}, S) = \max \min_{1 \leq i \leq n} a_{ij}.$$

Цей критерій орієнтує особу, що приймає рішення, на найгірші умови і рекомендує обирати стратегію, для якої в гірших умовах виграш максимальний. Це критерій крайнього песимізму. Для обрання кращої моделі з моделей-кандидатів [11] використовуються інформаційний критерій Акайке

$$AIC = N \ln \left( \sum_{k=1}^N e^2(k) \right) + 2n$$

та критерій Байєса–Шварца:

$$BSC = N \ln \left( \sum_{k=1}^N e^2(k) \right) + n \ln(N),$$

де  $n = p + q + 1$  — кількість параметрів моделі, які оцінюються за допомогою статистичних даних ( $p$  — кількість параметрів авторегресійної частини моделі;  $q$  — кількість параметрів ковзного середнього; 1 з'являється тоді, коли оцінюється зміщення (або перетин, тобто  $a_0$ );  $N$  — довжина вибірки. Обидва критерії пов'язані з квадратом похибок, а тому мають бути мінімальними для кращої моделі. Причому введення нового регресора приводить до збільшення критерію (при цьому збільшується  $n$ ), але одночасно зменшується сума квадратів похибок і критерій в цілому зменшується. Якщо регресор не покращує модель, то критерій збільшується. Варто зазначити, що асимптотичні властивості для довгих вибірок кращі у критерії Байєса–Шварца, тобто його рекомендують застосовувати за відносно великих значень  $N$  ( $N > 100$ ).

Розроблення методології оцінювання невизначеностей фінансових даних на основі системного підходу передбачає:

- визначення невизначеностей в окремих елементах, що використовують фінансові дані;
- агрегування невизначеностей окремих елементів у загальну невизначеність сукупності фінансових даних;
- визначення значущості поточних відмінностей і довгострокових тенденцій з урахуванням інформації про невизначеності;
- визначення видів використання фінансових даних, кількісне визначення невизначеностей різних видів у задачах аналізу фінансових даних;
- визначення невизначеностей якісного характеру, які неможливо опрацювати статистичними засобами.

Натепер немає універсальних систем, які можна було б рекомендувати для використання у будь-якій «ризиковій» ситуації для будь-якого процесу опрацювання ризиків. Це зумовлено не тільки з різноманітністю і множиною факторів ризиків або їх проявів, а і фізичною можливістю їх опрацювання (вартість засобів, обсяги аналізованих даних, швидкість процедур опрацювання тощо).

Фундаментальними властивостями системної методології є результативність, ефективність і масштабність. Фундаментальні принципи, яких необхідно дотримуватися під час формування системної методології та її практичної реалізації у вигляді сукупності конкретних підходів, методів, методик, алгоритмів, пакетів прикладних програм, є принципи системної узгодженості, процедурної повноти, функціональної ортогональності, інформаційної взаємозалежності, цілеспрямованої відповідності, функціональної раціональності, багатоцільової загальності, багатофакторної адаптивності, процедурної відкритості і раціональної доповнюваності [1]. Описані вище принципи, методи, критерії та властивості повинні сформувати єдину методологію, яка пропонується авторами для використання як основи для розроблення системи підтримання прийняття рішень (СППР) (рис. 5).



Рис. 5. Системна методологія менеджменту фінансових ризиків

Урахування впливу багатофакторності ризику пов'язане з виявленням можливих причин і зовнішніх факторів, які спричиняють його появу і можуть викликати появу ризиків іншої природи (наприклад інформаційних). У системній методології встановлені такі показники ризику: ступінь ризику як імовірність його появи та рівень ризику як відносні (можливі) втрати, які виникають унаслідок реалізації ризику. Однією з основних причин появи ризику будь-якої природи є невизначеність природи, дій учасників, зовнішніх факторів, інформації тощо.

Неповнота, нечіткість, спотвореність, неоднозначність інформації може проявлятися як ризик у певному розумінні. Так, невизначеність інформації, яка зберігається в базах даних, може впливати на неможливість отримання коректної статистичної вибірки і застосування кількісного методу оцінювання ризику. Неточність інформації призведе до отримання хибних моделей та некоректних оцінок фінансового ризику. Нечіткість нормативів, постановок завдань, неможливість однозначного трактування вхідної інформації зумовлює прийняття суб'єктивного або навіть хибного рішення під час оцінювання ризику експертами. Несвоєчасність отримання інформації може спричинити некоректне оцінювання або навіть неусвідомлення катастрофічності ситуації і, відповідно, призвести до запізного реагування та застосування механізмів і засобів зниження ризиків.

Недостовірні інформація про котирування акцій, фінансову звітність призводить до некоректного оцінювання рівня ризику і може розглядатися як класичний приклад маніпуляції даними з метою шахрайства. Суперечливість вхідної інформації або оцінок експертів може завадити розробленню адекватного і своєчасного механізму реагування на появу ризику.

Принцип системної узгодженості — використання різноманітних методів у сформованій системній методології, які є взаємопов'язаними і функціонально залежними, що дозволяє отримати чіткий алгоритм реалізації та послідовність викликів один за одним відповідних методів у СППР. Принцип процедурної повноти методології передбачає, що розроблена методологія охоплює всі етапи аналізу ризиків, починаючи від класифікації, категоризації ризику, причин його появи і закінчуючи оцінкою його рівня і рейтингу та перевіркою побудованих моделей і оцінок, забезпечуючи повний цикл підготовки даних, моделювання та аналізу ризиків. Принцип функціональної ортогональності — незалежна реалізація окремих процедур, модулів, що реалізують методи розрахункових оцінок і можуть використовуватися незалежно один від одного. Принцип цілеспрямованої відповідності передбачає наявність різних критеріїв, оцінок, які взаємопов'язані і дають змогу отримати інформацію про точність прогнозу, якість моделі та відповідно якість прийнятого рішення.

Принцип інформаційної взаємозалежності — результати, отримані на кожному етапі, реалізованому у вигляді процедур/функцій, мають бути взаємоузгодженими з тими методами, процедурами, які є взаємозалежними (наприклад, у вигляді реалізації комбінованих методів імовірнісно-статистичного або динамічного оцінювання).



З точки зору принципу багаточільової залежності розроблені авторами методи та запропоновані раніше методи можуть використовуватись для аналізу різних видів фінансових ризиків, різних типів системних задач. Багатофакторна адаптивність означає, що використані методи моделювання не мають істотних обмежень і мають високий ступінь гнучкості, характеризуються високим ступенем повноти вихідної інформації і реалізуються, наприклад, у вигляді контуру адаптації у ймовірно-статистичному методі.

Під час проектування системної методології накладалось обмеження на недопустимість дублювання функцій, що узгоджується з принципом функціональної раціональності. Відповідно до принципу процедурної відкритості реалізована у вигляді СППР методологія дозволяє вдосконалювати, видаляти, агрегувати існуючі та додавати нові методи, алгоритми і елементи. Принцип раціональної доповнюваності передбачає, що методологія повинна забезпечувати можливість розширення сфери її застосування за рахунок нових додаткових методів, прийомів, принципів за умови їх несуперечності між собою та з вихідною методологією.

У системній методології обов'язково реалізовується сукупність методів для опрацювання невизначеностей та формалізації експертного знання. На рис. 3 подано множину методів для встановлення експертних оцінок для ризиків, таких як метод Делфі, метод рейтингів (зокрема шкали для оцінювання ризиків за методологіями S&P, Moody's, Fitch, НБУ), метод перехресного впливу, метод Сааті, метод пошуку аналогій серед історичних даних, методи сценарного підходу [1]. Ці методи обов'язково використовуються на попередньому етапі, зокрема, якщо бракує історичних даних або немає статистики, або неможливо зібрати статистичні дані через виключність або малоймовірність ризиків і доводиться застосовувати експертне знання та досвід фахівців. Експертний підхід є першочерговим для формування методології, його використовують у явному вигляді в методах інтелектуального аналізу даних (наприклад, мережі Байєса) або в неявному вигляді, визначаючи сукупність характеристик для статистичних вхідних вибірок, критерії оптимальності, або навіть в організації процесу моделювання і формуванні навчальних та перевірних вибірок.

Статистичні методи оцінювання ризиків — перші запропоновані методи для моделювання фінансових ризиків; вони ґрунтувалися на використанні статистичних даних та використовували функції, визначені емпіричним шляхом (різноманітні варіації моделей Альтмана, варіації VAR-методів тощо).

Аналітичні методи можна умовно поділити на дві категорії. До першої категорії належать: дюрація, стрес-тестування, GAP-аналіз, тобто вони базуються на принципі відслідковування змін показників ризику (рівня та рейтингу) за змін вхідних параметрів і змінних. Такі методи використовуються здебільшого для аналізу юридичних осіб, банків з метою визначення їх платоспроможності в разі одночасного виникнення декількох несприятливих ситуацій і перевірки достатності забезпечення та мінімальних резервів. Друга категорія, що ґрунтується на використанні методів інтелектуального аналізу даних та нечіткої логіки, передбачає розрахунок показників фінансових ризиків, тобто прогнозування ймовірності ризику та можливих втрат на основі попередньої статистичної інформації, включенні експертного знання. Методи другої категорії (групи) передбачають розроблення скорингових

моделей на навчальній вибірці, їх тестування та удосконалення, повторну перевірку (цей процес має бути автоматизованим і може повторюватись ітераційно) та надання інструменту для поточного оцінювання фінансового ризику на робочі місця, наприклад, у вигляді скорингових карт.

Комбіновані методи, запропоновані і розроблені авторами, передбачають використання кількох методів (статистичних, імовірнісних, експертних, аналітичних) з метою поглибленого аналізу фінансових ризиків, урахування невизначеностей різної природи [12] та отримання вищих оцінок якості для моделей та більш якісних прогнозних оцінок. Для перевірки якості застосованих методів у системній методології пропонується використати множину критеріїв якості оцінювання та оптимальності рішень. Умовно всю критеріальну базу можна поділити на такі групи:

- критерії перевірки якості моделей ( $R^2$ , інформаційний критерій Акайке, критерій Байєса–Шварца, сума квадратів похибок, Дарбіна–Уотсона, статистика Стьюдента);
- критерії роздільної здатності моделі для класифікації ризиків (загальна точність, помилки першого та другого роду, індекс GINI, статистика Колмогорова–Смірнова тощо) [13];
- критерії якості даних (статистичні характеристики ряду – середнє, дисперсія, ексцес, асиметрія, потужність вибірки, відсоток пропущених значень, статистика Жак-Бера, наявність екстремальних значень, інформативність);
- критерії якості характеристик-змінних (інформаційна значущість (IV),  $R^2$ ,  $\chi^2$ , значущість кожної окремої групи значень WOE) [13,14];
- критерії якості оцінок прогнозів (середньоквадратична похибка, середня відсоткова похибка (MSE), середня абсолютна відсоткова похибка (MAPE), коефіцієнт нерівності Тейла) [11];
- критерії якості прийняття рішень (Лапласа, Вальда, Севіджа та Гурвіца, квадратичний критерій).

На основі запропонованої системної методології розробляється система підтримання прийняття рішень, яка поєднує всі описані методи, алгоритми, модулі разом з напрацьованими методами менеджменту ризиків, які можуть бути об'єднані в систему опрацювання ризиків [10]. Умовно методи менеджменту ризиків можна поділити на такі категорії методів: ухилення, локалізації, диверсифікації та компенсації ризиків. Методами ухилення від ризиків є уникнення ризикових ситуацій, страхування або перекладання певних дій на інших осіб. Методи локалізації спрямовані на виявлення критичних місць, де ризик буде найбільш імовірним. Вони базуються на використанні кількісних методів оцінювання ризиків та виявленні їх першоджерел. Методи диверсифікації є найбільш поширеними в портфельній теорії, передбачають розподіл основних ресурсів, цінностей між множиною процесів, що дозволяє знизити ризик «втрати» загальної цінності. Застосування методу диверсифікації є несистемним засобом протидії ризику і буде лише тимчасовим рішенням щодо ризикової ситуації, яка виникла. Метод компенсації ризиків полягає у превентивному попередженні небезпеки за рахунок стратегічного планування дій організації в цілому.

## ВИСНОВКИ

Проведені дослідження засвідчили системний характер виникнення і реалізації фінансових ризиків у різних галузях фінансово-господарської діяльності. Аналіз розмаїття фінансових ризиків становить складну проблему, яка сьогодні вирішується на основі використання різноманітних галузевих стандартів, методів опрацювання специфічних ризиків, напрацьованих стратегій диверсифікації, уникнення, передавання ризиків тощо. Але дослідження також показали, що глибинний аналіз причин і варіантів реалізації ризиків майже не виконується, засобів швидкого аналізу й оцінювання ризиків у більшості галузей не вистачає. Винятком може бути банківська діяльність, але й тут не всі види ризиків однаково успішно опрацьовуються, про що свідчать, зокрема, і світові кризи. Отже, актуальною проблемою є розроблення такої методології та інструментарію, які дозволяли б швидко опрацьовувати ризики фінансової діяльності й отримувати прогнозні оцінки щодо прийнятих рішень. Фінансові ризики зазвичай оцінюються на основі великих обсягів статистичних даних з певною невизначеністю як самих даних, так і засобів їх збирання та оброблення. Побудова будь-яких прогнозів також ставить досить жорсткі вимоги до якості й обсягів даних. Вимоги до швидкості, якості і правильності аналізу та опрацювання ризиків у сучасному конкурентному середовищі весь час зростають. Тому перспективним напрямом та актуальним завданням є розвиток системного підходу, створення на його основі нових інструментальних засобів та способів підтримання прийняття управлінських рішень щодо аналізу характеристик та опрацювання фінансових ризиків у вигляді інформаційної системи підтримання прийняття рішень для менеджменту фінансових ризиків.

## ЛІТЕРАТУРА

1. *Згуровський М.З.* Основи системного аналізу: підруч. для студ. вищ. навч. закл. / М.З. Згуровський, Н.Д.Панкратова. — К.: Вид. група ВНУ, 2007. — 544 с.
2. *Ладанюк А.П.* Основи системного аналізу: навч. посіб. / А.П. Ладанюк. — Вінниця: Нова книга, 2004. — 176 с.
3. *Вороб'єв С.Н.* Системный анализ и управление рисками в предпринимательстве: учеб. пособие / С.Н. Вороб'єв, К.В. Бадин. — М.: Из-во Московского психолого-социального ин-та; Воронеж: Из-во НПО «МОДЭК», 2009. — 760 с.
4. *Кузнєцова Н.В.* Виявлення та оброблення невизначеностей у формі неповних даних методами інтелектуального аналізу / Н.В. Кузнєцова // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2016. — № 2. — С. 104–115.
5. *International Convergence of Capital Standards. A revised Framework // Basel Committee of Banking Supervision.* — Basel. — Updated November 2005. — Available at: <https://www.bis.org/publ/bcbsca.htm>.
6. *Хаб'юк О.* Банківське регулювання та нагляд через призму рекомендацій Базельського комітету: моногр. / О.Хаб'юк. — Івано-Франківськ: ОІППО; Снятин: ПрутПринт, 2008. — 260 с.
7. *Basel Committee-Basel III.* — Available at: [https://www.bis.org/list/bcbs/tid\\_132/index.htm](https://www.bis.org/list/bcbs/tid_132/index.htm).

8. *Методичні рекомендації щодо організації та функціонування систем ризик-менеджменту в банках України // Постанова Правління Національного банку України від 02.08.2004 р. № 361.*
9. *Ажмухамедов И.М. Формализация понятий приемлемого и толерантного риска / И.М. Ажмухамедов, О.Н. Выборнова // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 3. — URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3240](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3240).*
10. *Никитин И. Системный подход к процессу управления рисками [Электронный ресурс] / И. Никитин, М. Цулая. — Режим доступа: <http://www.bainr.ru/article25.html>.*
11. *Бідюк П.І. Аналіз часових рядів: навч. посіб. / П.І. Бідюк, В.Д. Романенко, О.Л. Тимошук. — К.: НТУУ «КПІ», 2013. — 600 с.*
12. *Кузнецова Н.В. Практичні підходи до визначення та урахування невизначеностей, що формують фінансові ризики / Н.В. Кузнецова // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2014. — Вып. 2(44). — С. 160–170.*
13. *Siddiqi N. Credit Risk Scorecards: Developing and Implementing Intelligent Credit Scoring / N. Siddiqi. — 2005. — 196 p.*
14. *Кузнецова Н.В. Розробка скорингових карт для аналізу ризиків банківської діяльності / Н.В. Кузнецова // Реєстрація, зберігання і обробка даних. — 2017. — Т.17, № 4. — С. 61–71.*

*Надійшла 22.03.2018*

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ,  
ВИСОКОПРОДУКТИВНІ КОМП'ЮТЕРНІ  
СИСТЕМИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES,  
HIGH-EFFICIENCY COMPUTER SYSTEMS

УДК 681.3.093:044.3

**Розроблення алгоритму прогнозування продуктивності хмарних сервісів / Зуєв Д.О., Кропачев А.В., Усов О.С., Горшунів Р.О. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 7–14.**

Виконано аналіз основних етапів прогнозування ефективності обслуговування центрів оброблення даних, зокрема моніторингу і збирання даних, розрахунку і прогнозу ключових аспектів та прогнозування коефіцієнтів продуктивності. Запропоновано побудову алгоритму прогнозування ефективності обслуговування центру оброблення даних на основі аналізу коефіцієнта транзакції, коефіцієнта використання машинних ресурсів і коефіцієнта продуктивності сервісу. Прогнозування коефіцієнтів ґрунтується на аналізі часових рядів, що використовувалися для оцінювання часових рядів коефіцієнта транзакцій, методу радар-діаграми для розрахунку значення коефіцієнта застосування машинних ресурсів і середньозваженого методу оцінювання для розрахунку коефіцієнта продуктивності сервісу. Для прогнозування продуктивності запропоновано використати матрицю нечітких суджень з коефіцієнтом транзакцій і коефіцієнтом зайнятості ресурсу служби як вхідних значень. Указано, що коефіцієнт службових операцій подається нелінійними часовими рядами, і, отже, параметри часового ряду коефіцієнта мають бути передбачені теорією хаосу, а тому для розрахунку цього коефіцієнта можна застосувати процедуру розрахунку експоненти Ляпунова. Радарна діаграма демонструє оцінку коефіцієнта використання машинних ресурсів для загального сховища даних, мобільних сховищ, пам'яті обчислювальних можливостей і пропускну здатності мережі. Метод прогнозування ґрунтується на категорії нечітких наближень з використанням вхідних значень коефіцієнта транзакцій і динамічних змін коефіцієнта застосування машинних ресурсів. Рис.: 3. Бібліогр.: 9 назв.

УДК 681.3.093:044.3

**Разработка алгоритма прогнозирования производительности облачных сервисов / Зуев Д.О., Кропачев А.В., Усов А.Е., Горшунів Р.А. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 7–14.**

Проведен аналіз основних етапів прогнозування ефективності обслуговування центрів оброблення даних, в частині моніторингу і збирання даних, розрахунку і прогнозування ключових аспектів та прогнозування коефіцієнтів продуктивності. Предложено построение алгоритма прогнозирования эффективности обслуживания центра обработки данных на основе анализа коэффициента транзакции, коэффициента использования машинных ресурсов и коэффициента производительности сервиса. Прогнозирование коэффициентов основано на анализе временных рядов, который использовался для оценки временных рядов коэффициента транзакций, метода радар-диаграммы для расчета значения коэффициента использования машинных ресурсов и средневзвешенного метода оценки для расчета коэффициента производительности сервиса. Для прогнозирования производительности предлагается использовать матрицу нечетких суждений с коэффициентом транзакций и коэффициентом занятости ресурса службы в качестве входных значений. Указано, что коэффициент служебных операций обычно представлен нелинейными временными рядами, и, следовательно, параметры временного ряда коэффициента должны быть предсказаны теорией хаоса, а значит для расчета этого коэффициента может быть использована процедура расчета экспоненты Ляпунова. Радарная диаграмма демонстрирует оценку коэффициента использования машинных ресурсов для общего хранилища данных, мобильных хранилищ, памяти, вычислительных возможностей и пропускной способности сети. Метод прогнозирования основывался на категории нечетких приближений, которые используют

входные значения коэффициента транзакций и динамические изменения коэффициента использования машинных ресурсов. Рис.: 3. Библиогр.: 9 назв.

---

УДК 004.9

**Автоматизоване виявлення змін міської забудови за мультиспектральними супутниковими знімками субметрового розрізнення / Мозговий Д.К.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 15–21.

Запропоновано метод підвищення ефективності автоматизованого виявлення змін міської забудови за мультиспектральними супутниковими знімками субметрового просторового розрізнення видимого та інфрачервоного діапазонів із застосуванням перетворення головних компонент (РСА) для даних усіх спектральних каналів. У результаті оброблення різночасових знімків із супутника Pleiades-1A отримано векторні шари виявлених змін міської забудови та підтверджено високу ефективність такого методу. Завдяки високому ступеню автоматизації процесів оброблення супутникових знімків розроблена методика дозволяє істотно знизити трудомісткість і тим самим підвищити оперативність оновлення карт. Рис.: 6. Табл.: 1. Бібліогр.: 12 назв.

UDC 004.9

**Automated detection of changes in urban development on multispectral satellite imagery of submeter resolution / Mozgovoy D.K.** // System Research and Information Technologies. — 2018. — № 2. — P. 15–21.

The method for increasing the efficiency of automated detection of changes in urban development using multispectral satellite images of submeter spatial resolution of the visible and IR bands has been developed that employs the principal component analysis (PCA) for data of all spectral channels. By processing the multi-time images from the Pleiades-1A satellite, vector layers of detected changes in urban development were obtained thus confirming the high efficiency of the suggested method. Due to the high degree of automation of the satellite imagery processing, the developed technique allows to significantly reduce the labor intensity and, as a result, increase the efficiency of updating maps. Figs.: 6. Tables: 1. Refs: 12 titles.

---

УДК 347.736

**Оценивание вероятности банкротства предприятий с помощью дискриминантного анализа и нейронных сетей / Тимошук О.Л., Дорундяк К.Н.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 22–34.

Исследованы модели дискриминантного анализа и искусственных нейронных сетей для прогнозирования и вычисления вероятности банкротства предприятий. Проанализированы определение и сущность термина «банкротство», основные причины кризисного финансового состояния предприятий Украины и статистические данные, отражающие динамику банкротств украинских предприятий за 1999–2017 гг. Разработана модель искусственной нейронной сети типа персептрон и проведен компаративный анализ с моделями отечественных экономистов на примере анализа финансового состояния нескольких известных украинских предприятий. Оценены достоинства и проблемы применения рассмотренных моделей, а также их практическая значимость в современных условиях хозяйствования. Рис.: 4. Табл.: 11. Библиогр.: 7 назв.

UDC 347.736

**Assessment of the probability of bankruptcy of companies using discriminant analysis and neural networks / Tymoshchuk O.L., Dorundiak K.M.** // System Research and Information Technologies. — 2018. — № 2. — P. 22–34.

The models of discriminant analysis and artificial neural networks for forecasting and calculating the probability of bankruptcy of companies are investigated. The definition and essence of the term "bankruptcy", the main causes of the financial crisis of

Ukrainian companies and statistical data reflecting the dynamics of bankruptcies of Ukrainian companies in recent years are analyzed. A model of an artificial neural network of the perceptron type was developed and a comparative analysis with models of Ukrainian economists was made using examples of financial analysis of several well-known Ukrainian companies. The advantages and problems of application of the considered models, as well as their practical importance in the current economic conditions, are analyzed. Figs.: 4. Tables: 11. Refs: 7 titles.

---

УДК 004.8

**Аналіз великих даних за допомогою методів редукції моделей / Забелін С.І.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 35–41.

Стрімке збільшення обсягу даних свідчить на користь великих даних, які потребують нового високопродуктивного оброблення. Розглянуто використання методів попереднього оброблення великих даних, уведено визначення, атрибути і категоризацію підпрограм попереднього оброблення даних у великих даних. Проаналізовано взаємозв'язок між великими даними і попереднім обробленням даних у всіх наявних методах і високих технологіях даних. Розкрито проблеми досліджень, основну увагу в яких приділено удосконаленню в деяких групах методів і додатків попереднього оброблення даних, заснованих на нових парадигмах навчання великих даних. Бібліогр.: 22 назв.

УДК 004.8

**Анализ больших данных с помощью методов редукции моделей / Забелин С.И.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 35–41.

Стремительное увеличение объема данных свидетельствует в пользу больших данных, требующих новой высокопроизводительной обработки. Рассмотрено использование методов предварительной обработки больших данных, введены определения, атрибуты и категоризация подпрограмм предварительной обработки данных в больших данных. Проанализирована взаимосвязь между большими данными и предварительной обработкой данных во всех существующих методах и больших технологиях данных. Раскрыты проблемы исследований, в которых основное внимание уделяется усовершенствованиям в некоторых группах методов и приложений предварительной обработки данных, основанных на новых парадигмах обучения больших данных. Библиогр.: 22 назв.

---

ПРОБЛЕМНО І ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНІ  
КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ

PROBLEM- AND FUNCTION-ORIENTED  
COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS

УДК 519.7

**Сетевые структуры и системы: I. Поточковые характеристики сложных сетей / Полицук А.Д., Яджак М.С.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 42–54.

Рассмотрены структурный и функциональный направления исследования сложных сетевых систем. Сетевая система определяется как сложная сеть, по которой осуществляется движение потоков. Проведена классификация сетевых систем по признакам непрерывности и уровня упорядоченности движения потоков. Наряду со структурными характеристиками сложных сетей введены потоковые характеристики сетевых систем. Исследована проблема критической загруженности составляющих сети, а также проблемы размерности и адекватности моделей сетевых систем. Показано, как с помощью потоковых характеристик системы идентифицируются и удаляются с ее структуры фиктивные узлы и связи и определяются скрытые элементы системы. Исследовано, как на основании анализа потоковых процессов в системе изменяется структура безмасштабных сетей не только на стадии роста, но и в течении всего жизненного цикла соответствующей сетевой системы. Рассмотрена проблема изолированных зон сетевых систем и предложен алгоритм

поиска альтернативных путей движения потоков в обход недоступных составляющих сети. Рис.: 3. Библиогр.: 32 назв.

UDC 519.7

**Network structures and systems: I. Flows characteristics of complex networks / Polishchuk O.D., Yadzhak M.S.** // *System Research and Information Technologies*. — 2018. — № 2. — P. 42–54.

Structural and functional directions of complex network systems research are considered. The network system is defined as a complex network where flows occur. The classification of network systems is carried out on the basis of continuity and the level of orderliness of flows. Flow characteristics of network systems are introduced along with the structural characteristics of complex networks. The problem of critical loading of network components is studied. Problems of dimension and adequacy of models of network systems are considered. It is shown how the system's flow characteristics allow us to identify and exclude fictitious nodes and links from its structure and determine the hidden elements of the system. It was investigated how on the basis of the analysis of flows processes in the system the structure of scale-free networks changed not only during the growth stage, but also during the whole life cycle of the corresponding network system. The problem of isolated zones of network systems is considered and the algorithm is proposed for finding alternative ways for flows in order to bypass inaccessible components of the network. Figs.: 3. Refs: 32 titles.

---

УДК 004.416

**Виявлення причин трудомісткості супроводу корпоративних інформаційних систем / Моженкова О.В., Парамонов А.І.** // *Системні дослідження та інформаційні технології*. — 2018. — № 2. — С. 55–62.

Розглянуто структуру корпоративних обчислювальних мереж (КОМ) і класифікацію проблем, що виникають у процесі роботи з КОМ, за її рівнями. Виділено основну групу елементів КОМ, яка є об'єктом дослідження, — корпоративну інформаційну систему (КІС). Висвітлено етап супроводу КІС у розрізі трудовитрат на цьому етапі життєвого циклу. Для наочності процес супроводу подано у вигляді замкненої ітераційної системи, у якій тривалість і перелік виконуваних робіт залежать від типу проблеми, що виникає. Відповідно до стандарту СТБ ISO / IEC 14764–2003 запропоновано тривірневу класифікацію типів проблем для робіт із супроводу КІС. Виконано статистичний аналіз часових витрат супроводу КІС згідно із запропонованою класифікацією в розрізі робіт і типів помилок. За результатами аналізу виділено основні причини витрат часових ресурсів на супровід, які визначили напрям подальшого дослідження — оброблення банків даних у режимі реального часу з подальшою локалізацією бізнес-процесу для скорочення часових і фінансових витрат на супровід КІС. Рис.: 4. Табл.: 2. Библиогр.: 9 назв.

UDC 004.416

**Identifying the reasons for the complexity of the maintenance of corporate information systems / Mozhenkova E.V., Paramonov A.I.** // *System Research and Information Technologies*. — 2018. — № 2. — P. 55–62.

The structure of corporate computer networks and the classification of problems by its levels were considered. The main group of elements (application software, system services, and data banks), the corporate information system, is selected as the object of this research. The maintenance stage of corporate information systems is highlighted in the context of labor costs at this stage of the life cycle. For clarity, the process of maintenance is represented by a closed iteration system, where the duration and list of tasks depend on the problem type. In accordance with ISO 14764-2003, the three-level classification is proposed for the types of problems and activities in the maintenance stage of the corporate information system. The statistical analysis was performed of the time costs of maintenance using the proposed classification in the context of tasks and types of errors. Based on the results of the analysis, the main reasons for the complexity of the maintenance of



corporate information systems were identified. These reasons determined the main direction of further research - processing of data banks in real time mode for localization of the client's business process. This will reduce the time and financial costs of maintenance. Figs.: 4. Tables: 2. Refs: 9 titles.

---

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ  
УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР

METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM  
CONTROL AND THEORY OF GAMES

УДК 519.7, 519.8

**Математическое моделирование оптимальной обработки данных в распределенных информационных системах/ Цегелик Г.Г., Краснюк Р.П. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 63–76.**

Рассмотрены задачи оптимизации использования вычислительных ресурсов распределенной информационной системы. Выполнены математические постановки оптимизационных задач и предложены эффективные вычислительные алгоритмы построения решения задач, основанные на стратегии «жадного» выбора и использовании генетических алгоритмов. Для генетических алгоритмов построения решений, близких к оптимальным, в задачах бинарного и действительного кодирования предложена и исследована вычислительная эффективность введения параметров самообучения алгоритма, обеспечивающих коррекцию популяций в направлении наилучшей приспособляемости. Табл.: 2. Библиогр.: 20 назв.

UDC 519.7, 519.8

**The mathematical modeling of optimal data processing in distributed information systems / Tsegelyk G.G., Krasniuk R.P. // System Research and Information Technologies. — 2018. — № 2. — P. 63–76.**

The problems of optimization of using the computing resources of a distributed information system are considered. Mathematical statements of optimization problems have been made and efficient computational algorithms for solving problems based on the greedy choice strategy and using genetic algorithms have been proposed. For genetic algorithms for constructing solutions close to optimal, in binary and real coding problems, the computational efficiency of introducing self-training parameters of the algorithm that provided the correction of populations in the direction of better adaptability was proposed and investigated. Tables: 2. Refs: 20 titles.

---

УДК 004.023, 539.18

**Адаптивный квантовый генетический алгоритм для 0–1 задачи упаковки рюкзака / Ткачук В.М. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 77–88.**

Рассмотрен квантовый генетический алгоритм (QGA), который по сравнению с его классической реализацией обладает рядом преимуществ благодаря быстродействию, небольшому размеру популяции, автоматическому балансу между глобальным и локальным поисками решения. В основу QGA положены идеи традиционных эволюционных алгоритмов, положенные на технологию квантовых вычислений, которые оперируют квантовыми битами, суперпозицией состояний и квантовыми измерениями. Предложен новый QGA, для реализации которого использованы новый адаптивный оператор квантового гейта и технология восстановления квантовой хромосомы при решении комбинаторных задач с ограничениями. Для обеспечения эффективной работы алгоритма выполнена метаоптимизация основных параметров, положенных в основу его работы. Возможности предложенного подхода иллюстрируют модельные исследования с использованием широкого спектра тестовых 0–1 задач упаковки рюкзака. Рис.: 5. Табл.: 3. Библиогр.: 14 назв.

UDC 004.023, 539.18

**An adaptive quantum evolution algorithm for 0–1 knapsack problem / Tkachuk V.M. // System Research and Information Technologies. — 2018. — № 2. — P. 77–88.**

Quantum Genetic Algorithm (QGA) has a number of advantages in comparison with its classical version: operating speed, small population size and auto-balance between the global search and the local search. It is based on the ideas of traditional evolutionary algorithms, applied to the quantum computations technology, which operate with quantum bits, superposition of states and quantum measurements. This paper proposes a QGA with a new adaptive quantum gate operator and a restoring technology for the quantum chromosome during the process of solving combinatorial problems with constraints. Meta-optimization of the primary algorithm parameters is used for providing the algorithm efficiency. The productiveness of the suggested approach is proven by the model studies, carried out using a wide range of test 0–1 knapsack problems. Figs.: 5. Tables: 3. Refs: 14 titles.

---

МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І  
ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИС-  
ТЕМ

MATHEMATICAL METHODS, MODELS,  
PROBLEMS AND TECHNOLOGIES FOR  
COMPLEX SYSTEMS RESEARCH

УДК 539.3

**Математическое моделирование контактного взаимодействия двух электроупругих полупространств при сжатии при наличии жесткого дискообразного включения между ними / Кирилюк В.С., Левчук О.И., Гавриленко Е.В. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 89–98.**

Развита математическая модель для анализа контактного взаимодействия двух электроупругих трансверсально-изотропных полупространств при сжатии при наличии жесткого дископодобного включения постоянной толщины между ними. Модель основана на рассмотрении связанной системы уравнений электроупругости для каждого из пьезоэлектрических полупространств. Аналитическое решение задачи получено с помощью общего представления решений уравнений электроупругости на основе гармонических функций, сведения задачи к рассмотрению интегрального уравнения и разложения искомой функции по малому параметру. Как частный случай из полученных выражений следуют параметры контакта для двух упругих трансверсально-изотропных полупространств (при наличии включения между ними). Проведены числовые исследования, изучено влияние связанности силовых и электрических полей на параметры контактного взаимодействия. Рис.: 3. Библиогр.: 15 назв.

UDC 539.3

**Mathematical modeling of contact interaction of two electroelastic half-spaces under compression with rigid disc-shaped inclusion between them / Kirilyuk V.S., Levchuk O.I., Gavrilenko O.V. // System Research and Information Technologies. — 2018. — № 2. — P. 89–98.**

A mathematical model is developed for analyzing the contact interaction of two electroelastic transversely isotropic half-spaces under compression in the presence of a rigid disc-like inclusion of a constant thickness between them. The model is based on a consideration of the coupled system of electroelasticity equations for each of the piezoelectric half-spaces. The analytical solution of the problem is obtained by means of a general representation of solutions of the equations of electroelasticity on the basis of harmonic functions, reducing the problem to the consideration of the integral equation and the expansion of the unknown function with respect to a small parameter. As a particular case, the contact parameters for the two elastic transversely-isotropic half-spaces follow from the expressions obtained (if there is an inclusion between them). Numerical studies have been carried out, the influence of the connectedness of force and electric fields on the parameters of the contact interaction was studied. Figs.: 3. Refs: 15 titles.

---

УДК 519.713:004.043

**Формирование энтропийно-информационной оценки соответствия состояния сложных объектов и знание-ориентированных баз данных в пределах мониторин-**

гових систем / Козуля Т.В., Моисеев В.Ф., Козуля М.М., Савченко А.В. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 99–110.

Обоснован знание-ориентированный подход к оцениванию и прогнозированию состояния сложных систем. Рассмотрены производственные системы вида «0-состояние объекта (системы как составляющие) – процесс (система процессов, оператор изменения состояния или его поддержки) – *i*-состояние объекта (системы)», а также вопросы формирования информационного обеспечения реализации методической базы анализа сложных мониторинговых систем. Определены основы информационно-энтропийного подхода к формированию моделей объектов исследования с целью объектного анализа состояния системных образований природно-техногенного происхождения с использованием знание-ориентированных данных и приобретение новых знаний. Приведена информационная система для сбора и сохранения информации о мониторинговом состоянии объекта исследования, передачи данных для формирования модели, анализа полученных результатов и принятия взвешенного решения. Рис.: 6. Библиогр.: 18 назв.

UDC 519.713:004.043

**Forming entropy-information assessment correspondence of complex objects state and knowledge-oriented databases in monitoring systems / Kozulia T.V., Moiseev V.F., Kozulia M.M., Savchenko A.V. // System Research and Information Technologies. — 2018. — № 2. — P. 99–110.**

The knowledge-based approach for complex systems assessment and forecasting is justified. Production systems of the form "object 0-state (as the system components) – process (system processes, status change operator or support) – object *i*-state (system)" are discussed along with the problems of the information support development for implementing the methodological foundation for the complex monitoring systems analysis. The basis for the information-entropy approach is determined for forming models for objects of study with the purpose of object analysis of the state of natural and technogenic origin systemic formations using knowledge-oriented data and generating new knowledge. The information system is shown for collecting and storing the status data of the object of study under monitoring, transmitting data to generate models, analyzing the results and making an informed decision. Figs.: 6. Refs: 18 titles.

---

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ТА УПРАВЛІННЯ  
СИСТЕМАМИ В УМОВАХ РИЗИКУ І  
НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

METHODS OF SYSTEM ANALYSIS AND  
CONTROL IN CONDITIONS OF RISK AND  
UNCERTAINTY

УДК 519.85

**Задачі нечіткого лінійного програмування з двосторонніми обмеженнями і параметрами цільових функцій та обмежень у вигляді нечітких множин / Зак Ю.О. // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 111–123.**

Запропоновано детерміновані еквіваленти задач нечіткого лінійного програмування з двосторонніми обмеженнями на детерміновані значення змінних, які можуть набувати як додатних, так і від'ємних значень, а коефіцієнти функції мети і лінійні функції обмежень, а також ліві та праві граничні їх значення — нечіткі множини, подані fuzzy-інтервалами із LR-поданням функції належності загального вигляду. На підставі розглянутих в роботі правил ранжирування і оцінки домінування нечітких множин встановлено умови безумовного (строного) і умовного (нестроного) виконання обмежень. Різного виду детерміновані еквіваленти задачі, у яких слід дотримуватися fuzzy-обмежень з різним ступенем строгості, передбачають розв'язання не однієї, а деякої множини задач лінійного програмування. Вибирається найкращий з допустимих розв'язків. Рис.: 2. Бібліогр.: 17 назв.

UDC 519.85

**Problems of fuzzy-linear programming with two-sided constraints and parameters of objective functions and constraints in the form of fuzzy sets / Zack Yu.A. // System Research and Information Technologies. — 2018. — № 2. — P. 111–123.**

The deterministic equivalents of the tasks of fuzzy linear programming with two-sided constraints on the deterministic values of variables that can take both positive and negative values are proposed, and the coefficients of the goal function and the linear constraint functions, as well as the left and right boundary values on their values, are fuzzy sets, represented by fuzzy-intervals with membership functions with LR-representation of the most general kind. Based on the rules of ranking and estimating the dominance of fuzzy sets considered in the work, conditions for unconditional (strict) and conditional (non-strict) fulfillment of restrictions are established. The different kinds of deterministic equivalents of the problem in which the execution of fuzzy constraints with different degrees of severity is required, involve solving not one but several sets of linear programming problems. The best possible solution is chosen. Figs.: 2. Refs: 17 titles.

---

УДК 303.732.4, 519.816

**Системный подход к менеджменту финансовых рисков / Кузнецова Н.В., Бидюк П.И.** // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2018. — № 2. — С. 124–140.

Исследованы принципы, методы, процедуры и средства системного подхода к анализу и менеджменту рисков. Приведены международные общеизвестные стандарты менеджмента рисков различных типов и показана классификация рейтингов финансовых рисков. На примере банковских рисков сравнены существующие стандарты и показаны возможности сведения существующих подходов рейтингования в единую структурную таблицу и оценен доверительный интервал вероятности наступления финансового риска. Приведены основные особенности и характеристики категории «риск», а также качественные и количественные характеристики для его оценки, формализация понятий толерантности к риску и принятия риска и показана их взаимосвязь. На основе выполненного анализа существующих международных подходов к менеджменту риска предложена системная методология анализа и менеджмента рисков, которая базируется на основных принципах и методах системного анализа; в ней учтены основные закономерности и особенности финансовых процессов, предусмотрена обработка неопределенностей различной природы, связанных с особенностью финансовых данных, а также учтена международная практика и включены новые комбинированные методы минимизации финансовых рисков. Рис.: 5. Табл.: 2. Библиогр.: 14 назв.

UDC 303.732.4, 519.816

**System approach to financial risks management / Kuznietsova N.V., Bidyuk P.I.** // System Research and Information Technologies. — 2018. — № 2. — P. 124–140.

The principles, methods, procedures and means of a system approach to risk analysis and management were studied. The article presents internationally well-known standards for risk management of various types and shows the classification of financial risks ratings. Using banking risks as an example, the existing standards are compared and it is shown how it is possible to present existing rating approaches in the unified structural table and how to estimate the probability interval of a financial risk occurrence. The main features and characteristics of the "risk" category as well as qualitative and quantitative characteristics are shown. Also, the formalization of risk tolerance and acceptance of risk and their interrelation is shown. On the basis of the existing international approaches to risk management the system methodology for the risk analysis and management based on the main principles and methods of the system approach is proposed. This methodology takes into account the basic characteristics and special features of financial processes development, processing of different types of uncertainties associated with the peculiarities of financial data, international practice, and includes new combined methods for minimizing financial risks. Figs.: 5. Tables: 2. Refs: 14 titles.

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Бідюк Петро Іванович,**

професор, доктор технічних наук, професор кафедри математичних методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Гавриленко Олена Валеріївна,**

доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління факультету інформатики та обчислювальної техніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Горшунов Роман Олександрович,**

провідний архітектор мереж і хмарних обчислень AT&T, Словаччина, Братислава

**Дорундяк Ксенія Миколаївна,**

студентка ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Забелін Станіслав Ігорович,**

аспірант ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Зак Юрій Олександрович,**

доктор технічних наук, науковий експерт і консультант, Німеччина, Аахен

**Зуєв Денис Олегович,**

незалежний консультант, провідний архітектор мереж і хмарних обчислень, США

**Кирилюк Віталій Семенович,**

старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник відділу механіки стохастично-неоднорідних середовищ Інституту механіки імені С.П. Тимошенка НАН України, Київ

**Козуля Марія Михайлівна,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Харків

**Козуля Тетяна Володимирівна,**

професор, доктор технічних наук, професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Харків

**Краснюк Роман Петрович,**

аспірант факультету прикладної математики та інформатики Львівського національного університету імені Івана Франка, Україна, Львів

**Кропачев Артемій Васильович,**

керівник департаменту рішень автоматизації Bell Integrator, США

**Кузнєцова Наталія Володимирівна,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри математичних методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Левчук Ольга Іванівна,**

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу механіки стохастично-неоднорідних середовищ Інституту механіки імені С.П.Тимошенка НАН України, Київ

**Моженкова Олена Вікторівна,**

аспірантка кафедри програмного забезпечення інформаційних технологій Білоруського державного університету інформатики і радіоелектроніки, Білорусь, Мінськ

**Мозговий Дмитро Костянтинович,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних засобів телекомунікацій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, Україна, Дніпро

**Моїсєєв Віктор Федорович,**

професор, кандидат технічних наук, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Харків

**Парамонов Антон Іванович,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення інформаційних технологій Білоруського державного університету інформатики і радіоелектроніки, Білорусь, Мінськ

**Поліщук Олександр Дмитрович,**

старший науковий співробітник, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник лабораторії моделювання та оптимізації складних систем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів

**Савченко Анатолій Вікторович,**

молодший науковий співробітник кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Україна, Харків

**Тимошук Оксана Леонідівна,**

доцент, кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри математичних методів системного аналізу ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

**Ткачук Валерій Михайлович,**

доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри інформаційних технологій факультету математики та інформатики Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, Україна, Івано-Франківськ

**Усов Олексій Євгенович,**

технічний архітектор ПАО СК «Росгосстрах», Росія

**Цегелик Григорій Григорович,**

професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри математичного моделювання соціально-економічних процесів Львівського національного університету імені Івана Франка, Україна, Львів

**Яджак Михайло Степанович,**

старший науковий співробітник, доктор фізико-математичних наук, завідувач лабораторії моделювання та оптимізації складних систем Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Львів