



ISSN 2079-0023 (Print)  
ISSN 2410-2857 (Online)

## **ВІСНИК**

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

## **ВЕСТНИК**

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

## **BULLETIN**

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

**№ 1 (5) 2021**

**Харків**

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

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

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

Збірник наукових праць

№ 1 (5) 2021

Видання засноване у 1961 р.

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

Сборник научных работ

№ 1 (5) 2021

Издание основано в 1961 г.

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

Collection of Scientific papers

No. 1 (5) 2021

The edition was founded in 1961

Харків  
НТУ «ХПІ», 2021

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології** = Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Системный анализ, управление и информационные технологии = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2021. — № 1 (5) 2021. — 110 с. — ISSN 2079-0023.

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

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

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

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

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

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

Мова статей – українська, російська, англійська.

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

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

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

Засновник  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

Founder  
National Technical University  
"Kharkiv Polytechnic Institute"

#### **Редакційна колегія**

##### *Головний редактор:*

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

##### *Заступник головного редактора*

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

##### *Члени редколегії:*

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

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

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

Богомолів С., доц., Австралійський національний

університет, Австралія

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

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

Керстен В., проф., Гамбурзький технологічний університет,

Німеччина

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

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

Павлов О. А., проф., НТУУ «КПІ», Україна

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

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

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

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

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

##### *Відповідальний секретар*

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

#### **Editorial**

##### *Editor-in-chief*

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

##### *Deputy editor-in-chief*

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

##### *Editorial staff members:*

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

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

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

Bogomolov S., Assistant Professor, Australian National

University, Australia

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

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

Kersten Wolfgang, Prof., Hamburg University of Technology,

Germany

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

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

Pavlov O. A., prof., NTUU "KPI", Ukraine

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

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

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

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

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

##### *Executive secretary:*

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

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 7 від 2 липня 2021 р.

# СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ТЕОРИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

### SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY

UDC 004.89:510.635

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.01.01

**O. I. BIELIAIEV, I. V. LIUTENKO, N. K. STRATIENKO****ALGORITHMIC SUPPORT FOR MULTICRITERIA ASSESSMENT OF RETAIL INFORMATION SYSTEMS**

This article is devoted to the issues of assessing the effectiveness of information systems for enterprises engaged in retail trade in consumer goods. This article describes the tasks that the retail FMCG trade, as well as the functions of the retail trade, solve. The features of the subject area were considered, which will form the basis for the formation of scales for assessing the effectiveness of information systems. The priorities, tasks, and features of the business model of enterprises engaged in retail trade in consumer goods, depending on the market segment they occupy. Various types of corporate information systems that can be used in retail trade are considered. The analysis of the subject area made it possible not only to determine important metrics for assessing the effectiveness of information systems but also to determine the priority of the requirements for the availability of certain functionality in the information system from each business segment, large, medium and small. Also, the existing standards in the subject areas of software development and enterprise organization were considered. This article proposes a methodology for evaluating information systems for enterprises engaged in consumer goods retail trade that belong to different market segments. The proposed methodology is based on the approach of multi-criteria expert assessment. An example of linguistic variables for one of the questions of the questionnaire for experts is given. The order of operation of the expert system is also presented in the form of an activity diagram. The developed expert information system can be monetized by providing referral links to the products of companies supplying information systems for retail. In the future, it is planned to add the ability for qualified experts to select combination of metrics for assessment, as well as change the assessment scale to increase accuracy.

**Keywords:** information system, retail trade, consumer goods, performance assessment, expert assessments.

**O. I. БЕЛЯЕВ, І. В. ЛЮТЕНКО, Н. К. СТРАТІЄНКО****АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОЇ ОЦІНКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗДРІБНОЇ ТОРГІВЛІ**

Дана стаття присвячена питанням оцінки ефективності інформаційних систем для підприємств, що займаються роздрібною торгівлею товарами масового попиту. В даній статті наведені завдання, які вирішує роздрібна торгівля товарами масового попиту, а також функції роздрібною торгівлі. Були розглянуті особливості предметної області, які ляжуть в основу формування шкал оцінювання ефективності інформаційних систем. Також виділені пріоритети, завдання та особливості бізнес-моделі підприємств, що займаються роздрібною торгівлею товарами масового попиту в залежності від займаного ними сегмента ринку. Розглянуто різні типи корпоративних інформаційних систем, які можуть використовуватися в роздрібній торгівлі. Аналіз предметної області дозволив не тільки визначити важливі метрики для оцінки ефективності інформаційних систем, а й визначити пріоритет вимог щодо наявності певного функціоналу у інформаційної системи від кожного сегмента бізнесу - великого, середнього і малого. Також були розглянуті існуючі стандарти в предметних областях розробки програмного забезпечення та організації підприємства. У даній статті запропонована методика оцінки інформаційних систем для підприємств, що займаються роздрібною торгівлею товарами масового попиту, які належать до різних сегментів ринку. В основу запропонованої методики покладено підхід багатокритеріального експертного оцінювання. Наведено приклад лінгвістичних змінних по одному з питань анкети для експертів. Порядок роботи експертної системи також представлений у вигляді діаграми діяльності. Розроблена експертна інформаційна система може бути монетизована шляхом надання реферальних посилань на продукти компаній-постачальників інформаційних систем для роздрібною торгівлі. Надалі планується додавання можливості для кваліфікованих експертів здійснювати підбір комбінації метрик для оцінювання, а також змінювати шкалу оцінки для збільшення точності.

**Ключові слова:** інформаційна система, роздрібна торгівля, товари масового попиту, оцінка ефективності, експертні оцінки.

**A. И. БЕЛЯЕВ, И. В. ЛЮТЕНКО, Н. К. СТРАТИЕНКО****АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ**

Данная статья посвящена вопросам оценки эффективности информационных систем для предприятий, занимающихся розничной торговлей товарами массового спроса. В данной статье приведены задачи, которые решает розничная торговля товарами массового спроса, а также функции розничной торговли. Были рассмотрены особенности предметной области, которые лягут в основу формирования шкал оценивания эффективности информационных систем. Также выделены приоритеты, задачи и особенности бизнес-модели предприятий, занимающихся розничной торговлей товарами массового спроса в зависимости от занимаемого ими сегмента рынка. Рассмотрены различные типы корпоративных информационных систем, которые могут использоваться в розничной торговле. Анализ предметной области позволил не только определить важные метрики для оценки эффективности информационных систем, но и определить приоритет требований по наличию определенного функционала у информационной системы от каждого сегмента бизнеса – крупного, среднего и малого. Также были

рассмотрены существующие стандарты в предметных областях разработки программного обеспечения и организации предприятия. В данной статье были предложены методика оценки информационных систем для предприятий, занимающихся розничной торговлей товарами массового спроса, которые принадлежат к различным сегментам рынка. В основу предлагаемой методики положен подход многокритериального экспертного оценивания. Алгоритм опроса пользователей, которые могут выступать в роли экспертов, представлен в форме диаграммы деятельности. Приведен пример лингвистических переменных по одному из вопросов анкеты для экспертов. Разработанная экспертная система может быть монетизирована путем предоставления реферальных ссылок на продукты компаний-поставщиков информационных систем для розничной торговли. В дальнейшем планируется добавление возможности для квалифицированных экспертов осуществлять подбор комбинации метрик оценивания, а также изменять шкалу оценки для увеличения точности.

**Ключевые слова:** информационная система, розничная торговля, товары массового спроса, оценка эффективности, экспертные оценки.

**Introduction.** At the present moment, it is impossible to imagine a modern enterprise that would refuse to use information systems for the automation of its business processes. Information systems can reduce the time spent on analytical tasks, simplify customer and supplier relationship management, receive the necessary reporting in the shortest possible time, and much more. Automation and implementation of an information system is an important and necessary step for any enterprise that wants to be competitive in the twenty-first century. However, the management of the enterprise does not always give sufficient attention to the process of formulating requirements for the desired information system, which makes it difficult or even impossible to choose the information system that will help to solve enterprise problems efficiently as possible. The decision can be made by omitting the process of creating a requirements specification (or any other similar document), without involving experts who work with these systems, but simply by studying Internet sources. Understandably, with such an informal approach to making an important decision for the company, the probability of choosing a system that does not fully meet the needs of the customer is quite high. Inconsistency of the software being introduced or available at the enterprise with the requirements emanating from the statute or business model of the company leads to loss of revenue, gradual loss of competitiveness, and as a result leads to bankruptcy.

FMCG retailers are not an exception. (By FMCG we mean food, light industry products, as well as household chemicals.) This subject area has its own specific features, which translate into requirements for the functionality of the information system. These requirements can be used as metrics for assessing the quality of information systems. The presence, absence, or completeness of the implementation of these requirements will form the basis of expert assessments, the announced combination of which will describe the degree of compliance of a certain system with the requirements of an enterprise belonging to a certain market segment (small, medium or large business).

**This work is devoted to** the subject area of FMCG retail. This paper will consider the features of the subject area and the requirements for the functionality of information systems for retail FMCG, which are formed depending on the affiliation of a trading enterprise to a certain market segment.

The purpose of this work is to improve and formalize the process of evaluating the effectiveness of information systems for FMCG retail.

**Retail trade specifics.** Retail trade is an economic activity in the field of commodity circulation, covering the sale and purchase of goods to the end consumer and the

provision of trade services to him.[1] Retail trade matches the seller's interests in earning income and the buyer's needs for high-quality goods and services.

The retail business is always customer-oriented and follows socio-economic trends in order to remain competitive. Retail is based on the theory of individual choice, which is based on the principle of consumer priority. Therefore, retail trade is a social expression of the quality of life of a society.

Manufacturing firms make goods and sell them to wholesalers or retailers. Wholesalers resell these products to retailers, who resell to end consumers.

Retail trade realizes the produced consumer value, that links production with consumption and maintains a balance between offer and demand. At the same time, it does not matter who and where sells goods and through what distribution channels they are brought to end consumers [2].

Retail trade common activities:

- purchasing goods from a wholesaler and offer them for sale to anyone who wishes unchanged or after some processing;
- formation of a wide range of goods and a list of services that satisfy customers' needs;
- receiving and processing orders from customers;
- creation and continuous optimization of a product stand in order to maximize revenue. (For example, products with the highest margins are located at eye or chest level, while products with lower margins are usually located on the lowest or highest shelves.);
- organization of the process of delivery of ordered products to the client;
- studying the demand for goods and their market supply, maintaining a balance between supply and demand;
- working on logistics, optimization of warehouse stocks, in order to reduce the volume of product losses, is especially important for the trade of rapidly perishable products, for example, food.
- advertising and information work of retail trade enterprises;
- providing customers with a range of services that facilitate the process of not only buying but also using the goods (accepting pre-orders, selling individual goods on credit, delivering purchased goods to the buyer, assembling and installing purchased goods on scrap from the buyer, teaching the buyer how to operate technically complex goods, gift wrapping of purchased goods, etc.);
- stimulation of sales by increasing the identification of products and holding promotions;
- any independent systematic commercial activity is considered to be entrepreneurship. This means that it is initially aimed at making a profit from the sale of its goods;

- the size of the enterprise is a universal criterion for its work organization. Small firms are traditionally supported by the state by lowering taxes and other mandatory payments, while large firms have a lot of demands, they bring huge income.

**Small business** is by far the most common case. It is easier to organize, even with little or no work experience. Gradually, the size can increase to medium, due to an increase in annual turnover and attracting more resources. An enterprise can only be called a large business that covers several countries or has entered the international level. It always has a large number of end consumers. [2]

Small businesses include sole proprietorships, as well as microenterprise businesses and cooperatives with up to 50 employees. The main features of this form are:

- Lack of territorial distribution.
- Limited list of activities. Shops, travel agencies, small industries, dental or other small clinics, private educational institutions specializing in courses can work on this principle.
- The minimum set of checks. Supervisory authorities provide small companies with supervisory holidays, and when they end, the period for conducting inspection activities does not exceed 50 hours per year.
- The status does not need to be confirmed by special means. It is determined by the annual turnover, a certain number of employees, and the share ratio to the authorized capital.

Thus, we can distinguish the following requirements for information systems from small retail businesses:

- Low price.
- Moderate increase in the price of licenses and services by an increase in the number of workplaces or customers.
- Minimum requirements for accounting and reporting functions.
- No need for high-level analytical and customer relationship management tools.

**Medium enterprises** differ from small ones in terms of coverage. They usually include an entire network that is capable of serving a large customer audience. They can conduct their work in different areas within a state or country. The retail network can affect an entire region, but at the same time not enter the market of a neighboring region.

There are some characteristics of medium enterprises:

- Slow adaptation to changing market conditions.
- Orientation to improve the quality of goods or services to consumers.

Medium-sized businesses have net income - from 8 to 40 million euros, assets – 4–20 million euros, employees - from 50 to 250 [2].

As for the spheres of activity, this form of entrepreneurship is characteristic of network trading companies, construction firms, and large medical centers. In the global economy, it is medium-sized organizations that play the largest role, bringing about a third of all revenues to the state. At the same time, no tax breaks or other supportive measures are taken in relation to them.

Thus, we can distinguish the following requirements for information systems on the part of medium-sized businesses:

- Availability of functionality for notifying customers about new products and ongoing promotions.
- Availability of tools for supplier relationship management.
- Availability of tools for customer relationship management.
- Availability of analytical tools for sales analytics and demand forecasting.

**Large companies** are businesses that produce a substantial portion of all goods or services in their industry. Their volumes are noticeable in everything: the number of employees, the number of sales, the annual turnover. But most importantly, they do not work within the framework of one specific territorial market, but in several regions of the country or at the international level. The signs of such enterprises can be considered:

According to Ukrainian legislation, large enterprises are considered to be enterprises with an annual income from the sale of goods, works, and services over 40 million euros (in equivalent), a book value of assets of more than 20 million euros, and an average number of employees of more than 250 people [2].

- Strict observance of the order about inventory.
- Large retail space.

The most popular representatives of a large entity can be considered such venerable giants as Apple, Bosch, Samsung, Coca Cola, BMW. Since they have to work in many countries at once, they must adhere to global legislation and take into account the norms of each specific market. In addition, the number of shareholders in a firm may include not only businessmen but also the state. This gives some indulgence in work, but at the same time imposes additional obligations.

Thus, we can distinguish the following requirements for information systems on the part of the large business:

- All the requirements of medium-sized businesses.
- The widest range of analytical devices, including devices for analyzing global demand trends on the Internet.

**Types of information systems for retail.** Now that the requirements for information systems for retail businesses have been clarified, it is time to consider the types of business information systems that are presented on the modern market.

Having considered the types of systems existing on the market, we can make a conclusion that CRM systems are most suitable for retail enterprises. The use of ERP systems can also be justified, but these systems are more suitable for resource (or production) enterprises, rather than trade ones.

Also, in addition to ERM / CRM, a large business can use other information systems that are listed in the list to achieve their high-level goals. BPM systems serve to formalize business processes in an enterprise HRM systems can also be used to monitor the performance of personnel and collect important statistical information, which in the future can be used to restructure the staff of employees, recruit a team to implement a project or estimate the time it

will take to implementation of a project by a specific team of employees.

However, our task is to select the system that best suits the requirements of a particular enterprise, therefore, only CRM systems will act as instances for evaluation.

Types of corporate information systems that are present at the market and their description provided in table 1.

Table 1 – Types of corporate information systems

| Name                                   | Characteristic                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ERP (Enterprise Resource Planning)     | System for planning (managing) of enterprise resources.                                                                                                                                                                                 |
| CRM (Customer relationship management) | information system for an interaction model that believes that the center of the entire business philosophy is the customer, and the main areas of activity are measures to support effective marketing, sales and customer service.[3] |
| ECM (Enterprise Content Management)    | An information system for the implementation of control over the strategic infrastructure and technical architecture to support a single life cycle of unstructured information (content) of various types and formats.[4]              |
| CPM (Corporate Performance Management) | An information system for monitoring and managing business performance, covering the entire range of tasks in the field of strategic and financial management of a company.[5]                                                          |
| HRM (Human Resource Management)        | An information system for the automation of activities, aimed at timely provision of the organization and management of personnel and its optimal use.[6]                                                                               |
| EAM (Enterprise Asset Management)      | This is an information system designed mainly for the automation of processes related to the maintenance of equipment, its repair, as well as aftersales service of this equipment.[7]                                                  |
| EDMS (Electronic Document Management)  | Information system for enterprise document management.[8]                                                                                                                                                                               |
| Workflow                               | A system that is responsible for the document flow of the enterprise in a complex, ranging from a simple order to the final routes and versions of the documents used.                                                                  |
| Collaboration                          | A system responsible for the electronic interaction of people, but not as formalized as workflow.                                                                                                                                       |

**Standards within the subject area.** ISO 9000 is a series of international standards containing terms and definitions, basic principles of quality management, requirements for the quality management system of organizations and enterprises, as well as guidelines for achieving sustainable results. The standards of this group have subsections aimed at quality management, resources,

workflow, planning, personnel management and other activities at the enterprise. [9]

These standards are based on the process approach to the organization of labor in the enterprise and the implementation of the PDCA cycle.

ISO/IEC 25000:2014 clarifies the use of the new series of International Standards named Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). The main aim of ISO/IEC 25000:2014 is to provide a comprehensive overview of SQuaRE contents, common reference models and definitions, as well as the link between the documents, allowing users to understand series of standards, based on their intended application. It also explains the transition from the old ISO/IEC 9126 to the new ISO/IEC 14598 standard [10].

TCO is a concept of calculating the costs associated with the purchase of a product. During calculation of the TCO, not only direct costs are calculated such as product price, support and depreciation prices, but also indirect costs. Examples of indirect costs are user training costs, loss of efficiency during staff training, and the similar.

In order to assess the system as objectively as possible, it is necessary that the assessment algorithm covers the following attributes of the system quality:

- The degree of compliance with the user's requirements.
- The quality of the software, especially the quality of UI / UX execution.
- The cost of the license, support, expansion of the service package.

**Algorithm for assessing the effectiveness of information systems.** Genetic algorithm for multi-criteria assessment of the efficiency of information systems can be given in the following form:

- Form a set of indicators of employees to assess the degree of compliance of the information system functionality with the requirements presented by experts and the general business model of the enterprise  $Y_1, \dots, Y_n$ .
- Form assessment scales  $X_q = \{x_q^1, \dots, x_q^{S^q}\}$ ,  $q = 1, \dots, n$  of indicators, where  $S^q$  is a sign of the scale.
- Form a set of criteria  $K_1, \dots, K_m$ ,  $m < n$  for the aggregation of indicators  $Y_1, \dots, Y_n$ .
- Generate scales  $L_i = \{l_i^1, \dots, l_i^{D^i}\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ,  $q = 1, \dots, n$  for aggregated indicators, where  $D^i$  is a scale sign.
- Choose a method for constructing scales of aggregated indicators.
- Build scales of aggregated indicators of all hierarchical levels using a combination of aggregation methods.
- Solve the problem of assessing the economic efficiency of the implementation of the information system at the enterprise [11].

The systems will be rated on a ten-point scale according to the following metrics:

- The cost of the license.
- The rate of change in the cost of licenses and support services with the same growth in the number of jobs and clients.

- Availability of basic analytical tools for trading (sales funnel, demand forecasting, integration with Google analytics).

- Availability of tax reporting.
- Ability to connect a fiscal registrar.
- Availability of Email-mailing.
- Availability and quality of performance of the personnel management monitoring tool.
- Availability of data export to XLS, XLSX, CSV.
- Quality UI / UX.
- Optimization and robustness.

Further, expert assessments for each of the metrics will be multiplied by the corresponding weight coefficient. The weighting factor will be formed based on the client's enterprise belonging to a certain market segment, as well as the client's requirements for the functionality of the information system (table 2). Algorithm of calculating score in fig. 1.

Table 2 – Calculating score for multicriteria assessment

|          | Wages (user priorities) | Exp. marks for system "A" | Exp. marks for system "B" |
|----------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Metric 1 | 0.3                     | 10.0                      | 6.0                       |
| Metric 2 | 0.1                     | 10.0                      | 10.0                      |
| Metric 3 | 0.1                     | 6.0                       | 10.0                      |
| Metric 4 | 0.3                     | 8.0                       | 8.0                       |
| Metric 5 | 0.2                     | 6.0                       | 10.0                      |
| Score    | 1.0                     | 8.1                       | 8.6                       |

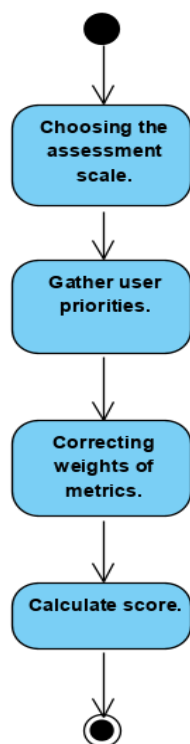


Fig. 1. Algorithm of calculating score

**Algorithm for collecting user requirements.** For the survey of business representatives in the field of retail trade

in consumer goods, it was decided to use a questionnaire, and linguistic variables [12] will be used to set priorities (fig. 2). Example: "Should an information system build a sales funnel based on statistical data?"

- "Yes, I do need it."
- "Yes, most likely I need it."
- "I might need it."
- "I probably won't need it."
- "Most likely I won't need it."
- "I definitely won't need it."

This approach was chosen because it will provide maximum coverage of the target audience, since unqualified users can work with it, and it also reduces the time spent by the user, which will increase the likelihood that the user will complete the survey.

It should also be noted that in the absence of functionality in the system, marked by the user as unambiguously or most likely necessary, this system will not be included in the list of recommended systems for the user, even if its final score will be sufficient to get into the top three systems.

|                                  | A | B             | C            | D                        |
|----------------------------------|---|---------------|--------------|--------------------------|
| 1 User answer                    |   | Weight before | Weight after | Weight corrected         |
| 2 "Yes, I definitely need it"    |   | 0.3           | 0.45         | 0.45/( $\sum$ all marks) |
| 3 "Yes, most likely I need it."  |   | 0.3           | 0.36         | 0.36/( $\sum$ all marks) |
| 4 "I might need it."             |   | 0.3           | 0.30         | 0.30/( $\sum$ all marks) |
| 5 "I probably won't need it."    |   | 0.3           | 0.21         | 0.21/( $\sum$ all marks) |
| 6 "Most likely I won't need it." |   | 0.3           | 0.09         | 0.09/( $\sum$ all marks) |
| 7 "I definitely won't need it."  |   | 0.3           | 0.00         | 0.00                     |

Fig. 2. Linguistic variables and their impact on weights

**Possible software implementation.** The web application will be the most relevant option for implementing an expert system for assessing the effectiveness of information systems for retail enterprises. The expert system can be implemented using C#.NET or Java Spring technologies. This implementation option was chosen because:

- It provides maximum audience reach.
- Convenient to use.
- No download required.
- Allows the owner of the expert system to track page traffic and other important metrics for the product.
- More opportunities to monetize the system in the future.

The fig. 3 below shows the algorithm of the expert system.

**Prospects of the project.** The expert system can be monetized by providing referral links to the products of companies that supply information systems for retail.

In the future, the expert system can be improved by:

- adding a more complex algorithm for qualified experts;
- adding an opportunity for qualified experts to select a combination of metrics for assessment;
- adding the ability for qualified experts to give their expert assessments of information systems;
- changing the scale for expert assessments from 10 points to 100 points to improve accuracy.

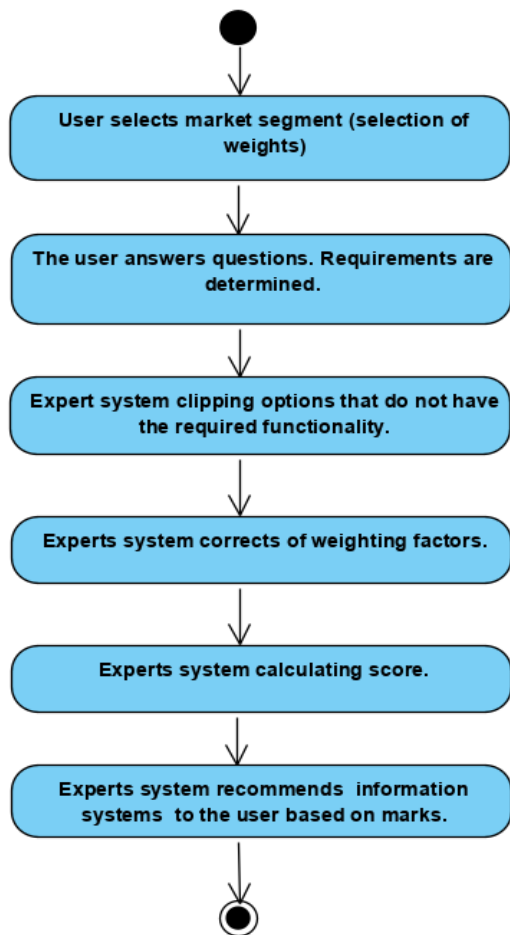


Fig. 3. Algorithm of user interaction with the expert system

**Conclusion.** As a result of the research, an algorithm that formalizes the process of assessing the effectiveness of information systems for FMCG retail enterprises was proposed. An algorithm for evaluating the effectiveness of systems and its possible software implementation in the form of an expert system was proposed. Potential future improvements to the expert system were also suggested.

#### References

1. Розничная торговля [Retail trade] Available at: <https://www.grandars.ru/college/biznes/roznichnaya-torgovlya.html> (дата звернення: 04.06.2021).
2. Малый, средний и крупный бизнес: что это такое, определения, отличия URL: <https://www.cleverence.ru/articles/biznes/malyu-sredniy-i-krupnyy-biznes-cto-eto-takoe-opredeleniya-otlichiya/> (дата звернення: 04.05.2021).
3. Salesforce official web-site. What is CRM? URL: <https://www.salesforce.com/crm/what-is-crm/> (дата звернення: 04.05.2021).
4. Что такое ECM? Системы управления контентом URL: <https://www.doc-online.ru/tags/ECM/> (дата звернення: 04.06.2021).
5. Что такое CPM-система и зачем она нужна финансовому директору URL: <https://www.fd.ru/articles/158150-cto-takoe-cpm-sistema-i-zachem-ona-nujna-finansovomu-direktoru> (дата звернення: 04.05.2021).

6. HRM - управление персоналом URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/human-resources-management-hrm> (дата звернення: 04.05.2021).
7. EAM - управление основными фондами URL: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/enterprise-asset-management-eam> (дата звернення: 04.05.2021).
8. WHAT IS EDMS URL: <https://www.accruent.com/what-is-an-electronic-document-management-system-edms> (дата звернення: 04.05.2021).
9. ISO 9000 URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO\\_9000](https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_9000) (дата звернення: 05.06.2021).
10. ISO/IEC 25000:2014 URL: <https://www.iso.org/ru/standard/64764.html> (дата звернення: 04.05.2021).
11. Петров К. Э., Крючковский В. В. Компараторная структурно-параметрическая идентификация моделей скалярного многофакторного оценивания. Херсон: Олди-Плюс, 2009. 294 с.
12. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0020025575900365> (дата звернення: 04.05.2021).

#### References (transliterated)

1. Roznichnaya trgovlya [Retail trade] Available at: <https://www.grandars.ru/college/biznes/roznichnaya-torgovlya.html> (accessed: 04.05.2021).
2. Malyy, sredniy i krupnyy biznes: chto eto takoe, opredeleniya, otlichiya [Small, medium and large business: what is it, definitions, differences] Available at: <https://www.cleverence.ru/articles/biznes/malyu-sredniy-i-krupnyy-biznes-cto-eto-takoe-opredeleniya-otlichiya/> (accessed: 04.05.2021).
3. Salesforce official web-site. What is CRM? Available at: <https://www.salesforce.com/crm/what-is-crm/> (accessed: 04.05.2021).
4. Chto takoe ECM? Sistemy upravleniya kontentom [What is ECM? Enterprise content management systems] Available at: <https://www.doc-online.ru/tags/ECM/> (accessed: 04.05.2021).
5. Chto takoe CPM Sistema i zachem ona nujna finansovomu direktoru [What is a CPM system and why does a CFO need it.] Available at: <https://www.fd.ru/articles/158150-cto-takoe-cpm-sistema-i-zachem-ona-nujna-finansovomu-direktoru> (accessed: 04.05.2021).
6. HRM – upravlenie personalom [HRM - Human Resources Management] Available at: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/human-resources-management-hrm> (accessed: 04.05.2021).
7. EAM – upravlenie osnovnymi fondami [EAM - Enterprise Asset Management] Available at: <https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/enterprise-asset-management-eam> (accessed: 04.05.2021).
8. WHAT IS EDMS Available at: <https://www.accruent.com/what-is-an-electronic-document-management-system-edms> (accessed: 04.05.2021).
9. ISO 9000 Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO\\_9000](https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO_9000) (accessed: 04.05.2021).
10. ISO/IEC 25000:2014 Available at: <https://www.iso.org/ru/standard/64764.html> (accessed: 05.06.2021).
11. Petrov K. E., Kryuchkovsky V. V. Komparatornaya strukturno-parametricheskaya identifikatsiya modelei skalyarnogo mnogofaktornogo ocenivaniya [Comparative structural-parametric identification of scalar multivariate estimation models] Kherson: Oldi-plus Publ., 2009. 294 c.
12. Zadeh L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0020025575900365> (accessed: 04.05.2021).

Надійшла (received) 11.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Беляєв Олександр Ігорович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0212-8895>; e-mail: [albell.916@gmail.com](mailto:albell.916@gmail.com).

**Лютенко Ірина Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-1826>; e-mail: [cherliv68@gmail.com](mailto:cherliv68@gmail.com)

**Стратієнко Наталія Костянтинівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7925-6687>; тел. (057)707-64-74, e-mail: [strana.snk@gmail.com](mailto:strana.snk@gmail.com)

**Беляев Александр Игоревич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», студент кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0212-8895>; e mail: [albell.916@gmail.com](mailto:albell.916@gmail.com).

**Лютенко Ірина Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-1826>; e-mail: [cherliv68@gmail.com](mailto:cherliv68@gmail.com)

**Стратієнко Наталія Константиновна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры программной инженерии и информационных технологий управления; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7925-6687>; тел. (057)707-64-74, e-mail: [strana.snk@gmail.com](mailto:strana.snk@gmail.com)

**Bieliayev Oleksandr Ihorovich** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», student of the Department of Software Engineering and Information Technology Management; Kharkiv city, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0212-8895>; e-mail: [albell.916@gmail.com](mailto:albell.916@gmail.com).

**Liutenko Iryna Victorivna** – Candidate of Engineering Sciences, docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Associate Professor, Department of Software Engineering and Management Information Technology; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-1826>; e-mail: [cherliv68@gmail.com](mailto:cherliv68@gmail.com)

**Stratiienko Nataliia Kostiantunivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Professor at the Software Engineering and Management Information Technologies Department; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7925-6687>; tel. (057)707-64-74, e-mail: [strana.snk@gmail.com](mailto:strana.snk@gmail.com)

**А. Ю. МЕЛЬНИКОВ****СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА КОМАНДЫ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРИМЕРЕ СПОРТИВНОГО ВАРИАНТА ИГРЫ «ЧТО? ГДЕ? КОГДА?»**

В работе была поставлена задача создания системы поддержки принятия решений, позволяющей определить оптимальный состав команды исполнителей. В качестве предметной области выбран спортивный вариант игры «Что? Где? Когда?». Описаны принципы проведения турниров по интеллектуальной игре «Что? Где? Когда?» и правила формирования команд для участия в таких соревнованиях. Сделан вывод, что для предсказания влияния изменений в составе команды на результат целесообразно использовать современные математические и интеллектуальные методы, в том числе – метод искусственных нейронных сетей. Приведены имеющиеся данные о результатах синхронных турниров ЛУК (СТ) с 2011 года и городских турнирах (ГТ) с 2017 года, охарактеризованы основные показатели по каждому соревнованию. Обосновано введение выходных факторов: отношение результата команды к среднему результату и отношение результата команды к результату победителя. Сформулирована задача прогнозирования как предсказание относительного результата команды на конкретной игре по имеющемуся перечню игроков команды на эту игру. Предложено учитывать место проведения конкретной игры, а участие игроков фиксировать в виде «доли» вклада в результат команды, при этом сумма «долей» всех игроков должна быть равной единице. Предложен метод искусственных нейронных сетей с архитектурой двухслойного персептрона, активационной функцией сигмоидой и алгоритмом обратного распространения ошибок для обучения сети. Приведены примеры расчета в среде Deductor Studio Lite. Сделаны выводы, что для практического применения модели постоянное использование стандартных пакетов неприменимо. Кроме того, также необходимо решить задачу автоматизации выбора состава команды. Описано разработанное в среде визуального программирования приложение – система поддержки принятия решений, которая позволяет импортировать исходные данные из XLS-файла, настраивать входные и выходные факторы, изменять архитектуру нейронной сети (число скрытых слоев и число нейронов в каждом слое), проводить обучение нейронной сети методом обратного распространения ошибок, сохранять обученную сеть на диске и загружать ее заново, осуществлять расчет значений для вводимых данных, проводить поиск вариантов состава команды. Разработанная система поддержки принятия решений позволяет посредством перебора вариантов давать рекомендации по формированию команды на конкретный турнир.

**Ключевые слова:** интеллектуальные игры, пакет вопросов, формирование команды, прогнозирование, искусственная нейронная сеть, персептрон, сигмоида, обучение сети.

**О. Ю. МЕЛЬНИКОВ****СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ КОМАНДИ ВИКОНАВЦІВ НА ПРИКЛАДІ СПОРТИВНОГО ВАРІАНТУ ГРИ «ЩО? ДЕ? КОЛИ?»**

В роботі була поставлена задача створення системи підтримки прийняття рішень, що дозволяє визначити оптимальний склад команди виконавців. У якості предметної області обрано спортивний варіант гри «Що? Де? Коли?». Описано принципи проведення турнірів з інтелектуальної гри «Що? Де? Коли?» і правила формування команд для участі в таких змаганнях. Зроблено висновок, що для передбачення впливу змін у складі команди на результат доцільно використовувати сучасні математичні та інтелектуальні методи, в тому числі – метод штучних нейронних мереж. Наведено наявні дані про результати синхронних турнірів ЛУК (СТ) з 2011 року і міських турнірах (МТ) з 2017 року, охарактеризовано основні показники по кожному змагання. Обґрунтовано введення вихідних факторів: відношення результату команди до середнього результату і відношення результату команди до результату переможця. Сформульовано задачу прогнозування як передбачення відносного результату команди на конкретній грі за наявним переліком гравців команди на цю гру. Запропоновано враховувати місце проведення конкретної гри, а участь гравців фіксувати у вигляді «частки» вкладу в результат команди, при цьому сума «часток» усіх гравців повинна дорівнювати одиниці. Запропоновано метод штучних нейронних мереж з архітектурою двошарового персептрону, активационною функцією сигмоїдою і алгоритмом зворотного поширення помилок для навчання мережі. Наведено приклади розрахунку в середовищі Deductor Studio Lite. Зроблено висновки, що для практичного застосування моделі постійне використання стандартних пакетів не є добрим. Крім того, також необхідно вирішити задачу автоматизації підбору складу команди. Описано розроблений в середовищі візуального програмування додаток – система підтримки прийняття рішень, яка дозволяє імпортувати вхідні дані з XLS-файлу, налаштувати вхідні і вихідні фактори, змінювати архітектуру нейронної мережі (число прихованих шарів і число нейронів у кожному шарі), проводити навчання нейронної мережі методом зворотного поширення помилок, зберігати мережу на диску і завантажувати її заново, здійснювати розрахунок значень для даних, що вводяться, проводити пошук варіантів складу команди. Розроблена система підтримки прийняття рішень дозволяє за допомогою перебору варіантів давати рекомендації щодо формування команди на конкретний турнір.

**Ключові слова:** інтелектуальні ігри, перелік питань, формування команди, прогнозування, штучна нейронна мережа, персептрон, сигмоїда, навчання мережі.

**О. Yu. MELNYKOV****DECISION SUPPORT SYSTEM FOR DETERMINING THE OPTIMAL COMPOSITION OF THE TEAM OF PERFORMERS ON THE EXAMPLE OF THE SPORTS VERSION OF THE GAME “WHAT? WHERE? WHEN?”**

The paper describes the task to create a decision support system that allows you to determine the optimal composition of the team of performers. The sports version of the game “What? Where? When?” is chosen. The principles of holding tournaments on the intellectual game “What? Where? When?” and the rules for the formation of teams to participate in such competitions. It is concluded that to predict the impact of changes in the team composition on the result, it is advisable to use modern mathematical and intellectual methods, including the method of artificial neural networks. The available data on the results of synchronous tournaments LUK (ST) since 2011 and city tournaments (GT) since 2017 are presented, the main indicators for each competition are characterized. The introduction of the output factors is substantiated: the ratio of the team’s result to the average result and the ratio of the team’s result to the winner’s result. The forecasting problem is formulated as a prediction of the relative result of a team on a specific game based on the available list of team players for this game. It is proposed to take into account the location of a particular game, and fix the participation of players in the form of a “share” of the contribution to the team’s result, while the sum of the “shares” of all players should be equal to one. A method of artificial

neural networks with a two-layer perceptron architecture, a sigmoid activation function and an error propagation algorithm for training a network is proposed. Examples of calculation in the Deductor Studio Lite environment are given. It is concluded that for the practical application of the model, the constant use of standard packages is inapplicable. In addition, it is also necessary to solve the problem of automating the selection of the team composition. Described is an application developed in a visual programming environment – a decision support system that allows you to import source data from an XLS file, configure input and output factors, change the architecture of the neural network (the number of hidden layers and the number of neurons in each layer), train the neural network using the backpropagation of errors, save the trained network on disk and load it again, calculate values for the input data, search for options for the composition of the team. The developed decision support system makes it possible to give recommendations on the formation of a team for a specific tournament by enumerating options.

**Keywords:** intellectual games, questions package, team building, forecasting, artificial neural network, perceptron, sigmoid, network training.

**Введение.** Согласно известным определениям [1–3], команда – это группа людей, имеющих общие цели, взаимодополняющие навыки и умения, высокий уровень взаимозависимости и разделяющих ответственность за достижение конечных результатов; команда – совместная целенаправленная работа от двух до восьми специалистов, решающих определенную общую комплексную задачу, проблему или реализующих совместный проект на основе интеграции знаний в различных профессиональных областях по правилам, выработанным сообща.

Очевидно, что для достижения лучшего результата деятельности необходимо определить оптимальный состав команды исполнителей, и это невозможно без применения современных математических и интеллектуальных методов (например, метода искусственных нейронных сетей) и информационных технологий.

Была поставлена задача создания системы поддержки принятия решений, позволяющей определить оптимальный состав команды исполнителей. В качестве предметной области выбран спортивный вариант игры «Что? Где? Когда?»

**Постановка задачи.** Уже более 20 лет под эгидой Лиги украинских клубов [4] проводятся чемпионаты по игре «Что? Где? Когда?», в том числе – так называемые синхронные турниры, когда команды разных городов отвечают в одно и то же время на одни и те же вопросы [5]. Последние 12 лет команды Краматорска имеют возможность участия в этом турнире на базе ДГМА, организатором «площадки» выступает Клуб интеллектуальных игр ДГМА [6]. Кроме того, с 2017 года по такой же форме для тех же команд-участниц организуются и проводятся городские турниры.

Команда формируется по правилам [7] и должна иметь в составе не более 6 человек на игру и не более 10 человек на игровой сезон. При внесении изменений в состав существующей команды необходимо понимать, как эти изменения могут повлиять на результат ее игры. Поскольку вопросы в игре «Что? Где? Когда?» предполагают не «прямое знание», а применение интеллектуальных способностей игрока, критерий отбора по уровню эрудиции не может быть эффективным. Кроме того, правильный ответ на ряд вопросов может быть найден только в формате обсуждения всеми участниками. Очевидно, что для предсказания влияния изменений в составе команды на результат ее игры целесообразно использовать математические и интеллектуальные методы.

**Анализ подходов к решению задачи.** В физической культуре и спорте нейронные сети используются для анализа и прогнозирования показателей физической подготовленности

спортсменов и результатов спортивных соревнований. Эффективность использования нейронных сетей объясняется возможностью моделирования физиологических процессов в организме человека, носящих нелинейный характер, а также способностью нейронных сетей к самообучению [8, 9].

**Исходные данные и методы обработки.** Имеются данные о результатах участия команды ДГМА «Интеллектуальные решения» в этапах синхронных турниров ЛУК (СТ) с 2011 года и городских турнирах (ГТ) с 2017 года (рис. 1). Все турниры проходили по единым правилам, и на каждом было задано ровно 45 вопросов. Основная информация по каждому соревнованию включает:

- результат команды (число правильных ответов);
- результат лидера (лучшее число правильных ответов на «площадке»);
- средний результат (среднее арифметическое правильных ответов на «площадке»).

Также имеются данные об игроках – участниках каждого этапа. Очевидно, что использование абсолютных показателей не может адекватно отражать ситуацию, поскольку на каждом турнире было разное число команд разного уровня подготовки, к тому же все этапы готовили разные редакторы.

Для расчета будем использовать относительные показатели, условно названные в таблице так:

- «Мы к среднему» – отношение результата команды к среднему результату.
- «Мы к лидеру» – отношение результата команды к результату победителя.

Таким образом будет косвенно учитываться уровень участников каждого турнира и уровень сложности пакета вопросов.

С математической точки зрения задачу прогнозирования можно сформулировать следующим образом: по имеющимся данным об игроках команды на конкретную игру предсказать относительный результат команды на этой игре.

На рис. 2 представлены обработанные данные: предлагается не рассматривать игроков, которые уже не принимают участие в играх (перенесены в графу «Другие»), добавлено место проведения конкретной игры, а участие игроков фиксируется в виде «доли» вклада в результат команды. Сумма «долей» всех игроков должна быть равной единице.

**Решение задачи методом искусственных нейронных сетей.** В качестве модели нейронной сети был выбран двухслойный персептрон. Оценка предпочтительного числа нейронов в скрытом слое проведена, используя известное неравенство [10–12].

| Дата       | Турнир  | Наши баллы | Среднее | Лидер | Мы к среднему | Мы к лидеру | Мельников | Шишкин | Ивченкова | Ляшенко | Баган | Сухонос | Капелешук | Коваленко | Балаболко | Бондарев | Другие | Ивченко | Власов | Луцицкий | Бакай | Бреусов | Спаская | Полянский | Челюбода | Всего игроков |
|------------|---------|------------|---------|-------|---------------|-------------|-----------|--------|-----------|---------|-------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|--------|---------|--------|----------|-------|---------|---------|-----------|----------|---------------|
| 09.04.2016 | ЗСТ1516 | 10         | 7,67    | 11    | 1,303781      | 0,90909     | 1         | 1      | 1         | 0       | 0     | 1       | 0         | 0         | 0         | 0        | 1      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 1        | 5             |
| 05.11.2016 | 1СТ1617 | 12         | 8,38    | 14    | 1,431981      | 0,85714     | 1         | 1      | 1         | 0       | 0     | 1       | 0         | 0         | 0         | 0        | 1      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 1        | 5             |
| 21.01.2017 | 2СТ1617 | 11         | 8,11    | 12    | 1,35635       | 0,91667     | 1         | 1      | 1         | 0       | 0     | 1       | 0         | 0         | 0         | 0        | 2      | 0       | 1      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 1        | 6             |
| 18.03.2017 | 3СТ1617 | 14         | 11,13   | 16    | 1,257862      | 0,875       | 1         | 1      | 1         | 0       | 0     | 1       | 0         | 0         | 0         | 0        | 2      | 0       | 0      | 1        | 0     | 0       | 0       | 0         | 1        | 6             |
| 04.11.2017 | 1ГТ1718 | 18         | 16,4    | 24    | 1,097561      | 0,75        | 1         | 1      | 0         | 0       | 1     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 2      | 0       | 1      | 1        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 5             |
| 18.11.2017 | 1СТ1718 | 17         | 12,67   | 17    | 1,341752      | 1           | 1         | 0      | 1         | 0       | 1     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 3      | 0       | 0      | 1        | 1     | 0       | 0       | 0         | 1        | 6             |
| 16.12.2017 | 2ГТ1718 | 21         | 19,67   | 30    | 1,067616      | 0,7         | 1         | 1      | 1         | 0       | 1     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 2      | 0       | 0      | 1        | 0     | 0       | 0       | 0         | 1        | 6             |
| 27.01.2018 | 2СТ1718 | 9          | 9,44    | 19    | 0,95339       | 0,47368     | 1         | 1      | 1         | 0       | 1     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 2      | 0       | 0      | 1        | 0     | 0       | 0       | 0         | 1        | 6             |
| 10.02.2018 | 3ГТ1718 | 17         | 17,3    | 28    | 0,982659      | 0,60714     | 1         | 0      | 0         | 0       | 1     | 1       | 0         | 0         | 0         | 0        | 2      | 0       | 0      | 1        | 0     | 0       | 0       | 0         | 1        | 5             |
| 10.03.2018 | 3СТ1718 | 15         | 10,44   | 19    | 1,436782      | 0,78947     | 1         | 1      | 1         | 0       | 1     | 1       | 0         | 0         | 0         | 0        | 1      | 0       | 0      | 1        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 31.03.2018 | 4ГТ1718 | 17         | 14,78   | 25    | 1,150203      | 0,68        | 1         | 0      | 0         | 0       | 1     | 1       | 0         | 0         | 0         | 0        | 1      | 0       | 0      | 1        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 4             |
| 02.06.2018 | 5ГТ1718 | 29         | 21      | 29    | 1,380952      | 1           | 1         | 1      | 1         | 1       | 0     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 0      | 1       | 0      | 1        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 29.09.2018 | 1ГТ1819 | 20         | 10,78   | 20    | 1,855288      | 1           | 1         | 1      | 1         | 1       | 0     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 0      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 4             |
| 03.11.2018 | 2ГТ1819 | 21         | 15,56   | 22    | 1,349614      | 0,95455     | 1         | 0      | 1         | 1       | 1     | 0       | 1         | 0         | 0         | 0        | 0      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 5             |
| 17.11.2018 | 1СТ1819 | 16         | 15,43   | 22    | 1,036941      | 0,72727     | 1         | 1      | 1         | 0       | 1     | 0       | 0         | 1         | 0         | 0        | 1      | 0       | 1      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 15.12.2018 | 3ГТ1819 | 17         | 14,86   | 20    | 1,144011      | 0,85        | 1         | 1      | 1         | 0       | 0     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 1      | 0       | 1      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 5             |
| 19.01.2019 | 2СТ1819 | 13         | 11,6    | 15    | 1,12069       | 0,86667     | 1         | 1      | 1         | 0       | 1     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 1      | 0       | 1      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 09.02.2019 | 4ГТ1819 | 21         | 14,6    | 23    | 1,438356      | 0,91304     | 1         | 1      | 1         | 0       | 1     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 1      | 0       | 1      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 09.03.2019 | 3СТ1819 | 11         | 7       | 16    | 1,571429      | 0,6875      | 1         | 1      | 1         | 0       | 1     | 0       | 0         | 1         | 0         | 0        | 1      | 0       | 1      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 30.03.2019 | 5ГТ1819 | 20         | 11      | 20    | 1,818182      | 1           | 1         | 1      | 1         | 1       | 0     | 0       | 0         | 0         | 0         | 0        | 1      | 0       | 1      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 27.04.2019 | 6ГТ1819 | 28         | 20,4    | 28    | 1,372549      | 1           | 1         | 1      | 1         | 1       | 0     | 0       | 0         | 1         | 0         | 0        | 1      | 0       | 1      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 15.06.2019 | 7ГТ1819 | 6          | 6,43    | 13    | 0,933126      | 0,46154     | 1         | 0      | 1         | 0       | 1     | 1       | 0         | 1         | 0         | 1        | 0      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 28.09.2019 | 1ГТ1920 | 18         | 15,1    | 21    | 1,192053      | 0,85714     | 1         | 0      | 0         | 1       | 1     | 1       | 0         | 0         | 1         | 0        | 0      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 26.10.2019 | 2ГТ1920 | 19         | 14,6    | 24    | 1,30137       | 0,79167     | 1         | 1      | 0         | 1       | 1     | 1       | 0         | 0         | 1         | 0        | 0      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 16.11.2019 | 1СТ1920 | 18         | 10,3    | 18    | 1,747573      | 1           | 1         | 1      | 0         | 0       | 1     | 1       | 0         | 1         | 0         | 1        | 0      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |
| 14.12.2019 | 3ГТ1920 | 19         | 12,4    | 22    | 1,532258      | 0,86364     | 1         | 1      | 0         | 0       | 1     | 1       | 1         | 0         | 1         | 0        | 0      | 0       | 0      | 0        | 0     | 0       | 0       | 0         | 0        | 6             |

Рис. 1. Данные о результатах соревнований

| Дата       | Турнир  | Место  | Наши баллы | Среднее | Лидер | Мы к среднему | Мы к лидеру | Мельников | Шишкин | Ивченкова | Ляшенко | Баган | Сухонос | Капелешук | Коваленко | Балаболко | Бондарев | Другие |
|------------|---------|--------|------------|---------|-------|---------------|-------------|-----------|--------|-----------|---------|-------|---------|-----------|-----------|-----------|----------|--------|
| 09.04.2016 | ЗСТ1516 | ДГМА   | 10         | 7,67    | 11    | 1,30378096    | 0,90909     | 0,20      | 0,20   | 0,20      | 0,00    | 0,00  | 0,20    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,20   |
| 05.11.2016 | 1СТ1617 | ДГМА   | 12         | 8,38    | 14    | 1,43198091    | 0,85714     | 0,20      | 0,20   | 0,20      | 0,00    | 0,00  | 0,20    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,20   |
| 21.01.2017 | 2СТ1617 | ДГМА   | 11         | 8,11    | 12    | 1,35635018    | 0,91667     | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,00    | 0,00  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,33   |
| 18.03.2017 | 3СТ1617 | ДГМА   | 14         | 11,13   | 16    | 1,25786164    | 0,875       | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,00    | 0,00  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,33   |
| 04.11.2017 | 1ГТ1718 | Фиеста | 18         | 16,4    | 24    | 1,09756098    | 0,75        | 0,20      | 0,20   | 0,00      | 0,00    | 0,20  | 0,00    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,40   |
| 18.11.2017 | 1СТ1718 | ДГМА   | 17         | 12,67   | 17    | 1,34175217    | 1           | 0,17      | 0,00   | 0,17      | 0,00    | 0,17  | 0,00    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,50   |
| 16.12.2017 | 2ГТ1718 | Фиеста | 21         | 19,67   | 30    | 1,06761566    | 0,7         | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,00    | 0,17  | 0,00    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,33   |
| 27.01.2018 | 2СТ1718 | ДГМА   | 9          | 9,44    | 19    | 0,95338983    | 0,47368     | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,00    | 0,17  | 0,00    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,33   |
| 10.02.2018 | 3ГТ1718 | Фиеста | 17         | 17,3    | 28    | 0,98265896    | 0,60714     | 0,20      | 0,00   | 0,00      | 0,00    | 0,20  | 0,20    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,40   |
| 10.03.2018 | 3СТ1718 | ДГМА   | 15         | 10,44   | 19    | 1,43678161    | 0,78947     | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,00    | 0,17  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,17   |
| 31.03.2018 | 4ГТ1718 | Фиеста | 17         | 14,78   | 25    | 1,15020298    | 0,68        | 0,25      | 0,00   | 0,00      | 0,00    | 0,25  | 0,25    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,25   |
| 02.06.2018 | 5ГТ1718 | Фиеста | 29         | 21      | 29    | 1,38095238    | 1           | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,17    | 0,17  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,17   |
| 29.09.2018 | 1ГТ1819 | Фиеста | 20         | 10,78   | 20    | 1,85528757    | 1           | 0,25      | 0,25   | 0,25      | 0,25    | 0,00  | 0,00    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,00   |
| 03.11.2018 | 2ГТ1819 | ДКИТ   | 21         | 15,56   | 22    | 1,3496144     | 0,95455     | 0,20      | 0,00   | 0,20      | 0,20    | 0,20  | 0,00    | 0,20      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,00   |
| 17.11.2018 | 1СТ1819 | ДГМА   | 16         | 15,43   | 22    | 1,03694102    | 0,72727     | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,00    | 0,17  | 0,00    | 0,00      | 0,17      | 0,00      | 0,00     | 0,17   |
| 15.12.2018 | 3ГТ1819 | ДКИТ   | 17         | 14,86   | 20    | 1,14401077    | 0,85        | 0,20      | 0,20   | 0,20      | 0,20    | 0,00  | 0,00    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,20   |
| 19.01.2019 | 2СТ1819 | ДГМА   | 13         | 11,6    | 15    | 1,12068966    | 0,86667     | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,17    | 0,00  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,17   |
| 09.02.2019 | 4ГТ1819 | ДГМА   | 21         | 14,6    | 23    | 1,43835616    | 0,91304     | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,17    | 0,00  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,17   |
| 09.03.2019 | 3СТ1819 | ДГМА   | 11         | 7       | 16    | 1,57142857    | 0,6875      | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,00    | 0,17  | 0,00    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,17   |
| 30.03.2019 | 5ГТ1819 | Фиеста | 20         | 11      | 20    | 1,81818182    | 1           | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,17    | 0,00  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,00      | 0,00     | 0,17   |
| 27.04.2019 | 6ГТ1819 | Фиеста | 28         | 20,4    | 28    | 1,37254902    | 1           | 0,17      | 0,17   | 0,17      | 0,17    | 0,00  | 0,00    | 0,00      | 0,17      | 0,00      | 0,00     | 0,17   |
| 15.06.2019 | 7ГТ1819 | ДКИТ   | 6          | 6,43    | 13    | 0,93312597    | 0,46154     | 0,17      | 0,00   | 0,17      | 0,00    | 0,17  | 0,17    | 0,00      | 0,17      | 0,00      | 0,17     | 0,00   |
| 28.09.2019 | 1ГТ1920 | ДКИТ   | 18         | 15,1    | 21    | 1,19205298    | 0,85714     | 0,17      | 0,00   | 0,00      | 0,17    | 0,17  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,17      | 0,17     | 0,00   |
| 26.10.2019 | 2ГТ1920 | ДКИТ   | 19         | 14,6    | 24    | 1,30136986    | 0,79167     | 0,17      | 0,17   | 0,00      | 0,17    | 0,17  | 0,17    | 0,00      | 0,00      | 0,17      | 0,00     | 0,00   |
| 16.11.2019 | 1СТ1920 | ДГМА   | 18         | 10,3    | 18    | 1,74757282    | 1           | 0,17      | 0,17   | 0,00      | 0,00    | 0,17  | 0,17    | 0,00      | 0,17      | 0,17      | 0,00     | 0,00   |
| 14.12.2019 | 3ГТ1920 | ДКИТ   | 19         | 12,4    | 22    | 1,53225806    | 0,86364     | 0,17      | 0,17   | 0,00      | 0,00    | 0,17  | 0,17    | 0,00      | 0,17      | 0,00      | 0,00     | 0,00   |

Рис. 2. Обработанные данные о результатах

Величину скрытого слоя приняли равным 5 нейронам. Тип активационной функции – сигмоида. Обучение сети проводилось методом обратного распространения ошибок. Архитектура используемой нейронной сети представлена на рис. 3. Расчет был проведен в среде Deductor Studio [13], результаты описаны в [14].

Однако такая модель не учитывала несколько факторов. Во-первых, каждый пакет вопросов готовят и редактируют разные люди. Во-вторых, место проведения игры также может оказать влияние на процесс нахождения правильного ответа и, соответственно, результат. Уточненные данные с перечнем редакторов каждого пакета в формате доли вклада каждого из них (сумма «долей» также должна

быть равной единице) и мест проведения игр были применены в модели двухслойного персептрона с 51 входным нейроном, архитектура сети и результаты подробно описаны в [15].

Там же были проанализированы результаты расчетов по каждой из моделей и сделан вывод о предпочтительности учета таких факторов, как редакторы пакетов и места проведения. Модель, созданная и обученная на основе данных за три года, была применена к расчету прогнозных значений первого в 2020 году городского турнира [16]. Данные, полученные в результате расчета, были близки к реальным результатам (рис. 4), команда «Интеллектуальные решения» заняла 1-е место с большим отрывом от соперников.

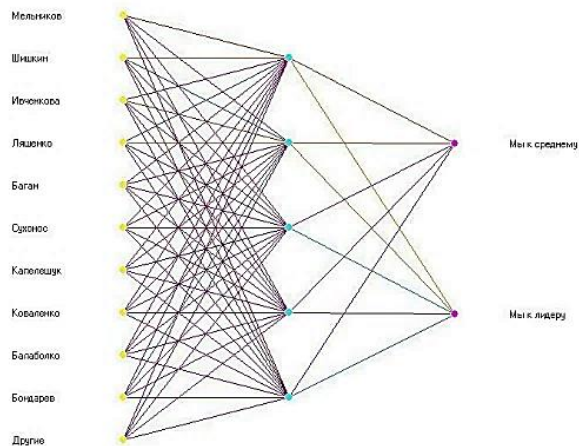


Рис. 3. Граф нейронной сети MLP-11-5-2

**Разработка специального приложения.** Однако для практического применения модели постоянное использование стандартных пакетов неприменимо. Также необходимо решить задачу автоматизации выбора состава команды.

В среде визуального программирования было разработано приложение – система поддержки принятия решений (рис. 4), которая позволяет осуществлять следующие действия:

- загружать (импортировать) исходные данные из XLS-файла;
- настраивать входные и выходные факторы;
- изменять архитектуру нейронной сети (число скрытых слоев и число нейронов в каждом слое);
- проводить обучение нейронной сети методов обратного распространения ошибок;
- сохранять обученную сеть на диске и загружать ее заново;
- осуществлять расчет значений для вводимых данных;
- проводить поиск вариантов состава команды.

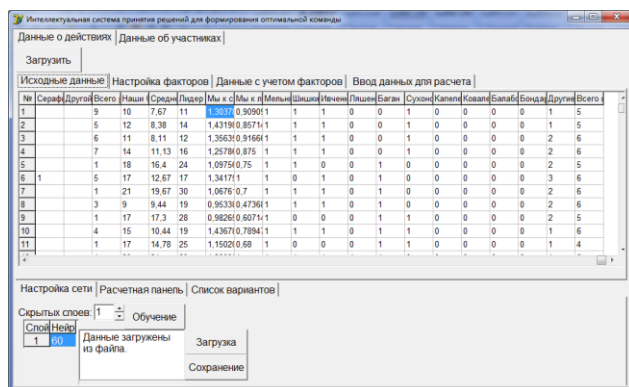


Рис. 4. Форма разработанного приложения

При настройке входных и выходных факторов (рис. 5) необходимо указать их принадлежность к одному из четырех классов:

- внешние входящие (отдельные);
- внешние входящие (группа);
- внутренние входящие (группа);
- выходные.

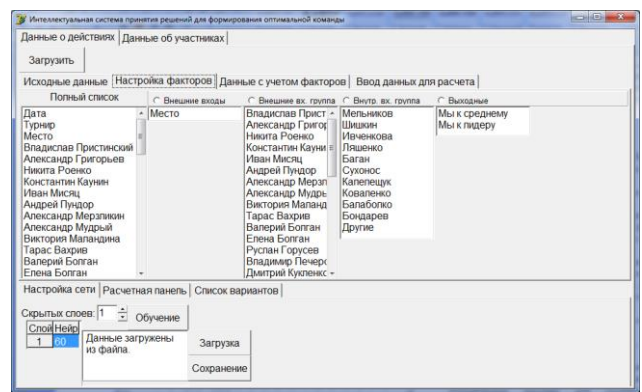


Рис. 5. Настройка факторов

Для групповых данных система сама сделает пересчет по «долям». Непосредственное прогнозирование состава будет осуществляться только по категории «внутренние входящие».

Первый этап расчета (рис. 6) показывает достаточно высокую точность моделирования: показатель «Мы к лидеру» во всех случаях правильно определяет место команды.

Рис. 6. Сравнение исходных данных и результатов

На следующем этапе (рис. 7) можно выбрать состав команды и рассчитать прогнозируемое место (с учетом места проведения и фамилий редакторов вопросов).

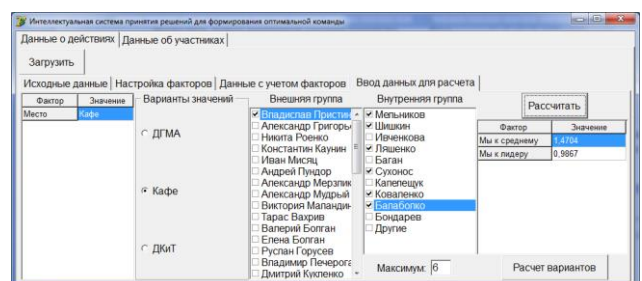


Рис. 7. Прогнозирование места команды в зависимости от ее состава

Последний этап – расчет вариантов (рис. 8) – позволяет составить список прогнозируемых мест команды в зависимости от вариантов ее состава.

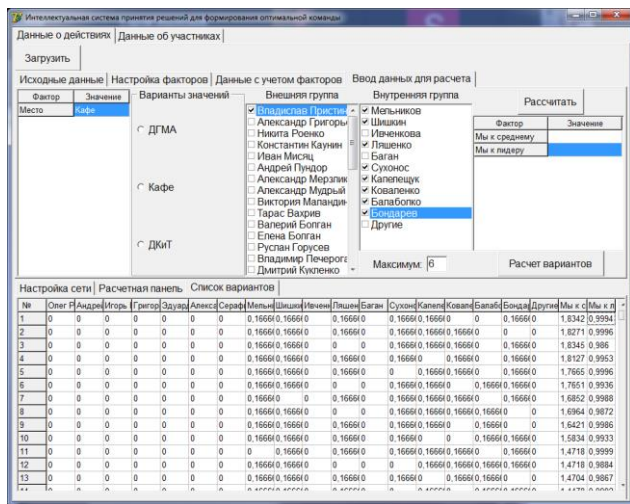


Рис. 8. Прогнозирование места команды в зависимости от вариантов ее состава

**Выводы.** Использование аппарата искусственных нейронных сетей для определения оптимального состава команды по игре «Что? Где? Когда?» и прогнозирования ее результатов может позволить по имеющимся данным о предполагаемом составе команды, редакторов пакетов вопросов и места проведения турнира предсказать ее относительный результат по отношению к победителю и по отношению к среднему значению.

Разработанная система поддержки принятия решений позволяет посредством перебора вариантов давать рекомендации по формированию команды на конкретный турнир.

#### Список литературы

1. Галкина Т.П. *Социология управления: от группы к команде: Учеб. пособие*. Москва: Финансы и статистика, 2003. 224 с.
2. Галлерт Манфред. *Все о командообразовании: руководство для тренеров* / Пер. с нем. Манфред Геллерт, Клаус Новак. Москва: Вершина, 2006. 352 с.
3. Семина А. П. Команда как групповая форма организации труда. *Вестник Алтайской академии экономики и права*. 2019. № 12-1. С. 128–133. URL: <https://vael.ru/ru/article/view?id=858> (дата обращения: 18.03.2021).
4. *Лига украинских клубов – ЛУК*. URL: <http://luk.org.ua/> (дата обращения: 16.03.2021).
5. *Регламент проведения Чемпионата Украины по спортивному варианту интеллектуальной игры «Что? Где? Когда?» без ограничения возраста*. URL: <https://goo.gl/DhJDHc> (дата обращения: 16.03.2021).
6. *Клуб интеллектуальных игр ДГМА*. URL: <https://www.facebook.com/groups/dgma.kii/> (дата обращения: 16.03.2021).
7. Положение о составах команд-участниц Чемпионата Украины по спортивному варианту игры «Что? Где? Когда?» без ограничения возраста. URL: <http://luk.org.ua/documents/polozhenie-o-sostavah> (дата обращения: 16.03.2021).
8. Касюк С. Т., Вахтомова Е. М. Использование нейронных сетей для анализа и прогнозирования данных в физической культуре и спорте. *Научно-теоретический журнал «Ученые записки»*. 2013. № 12 (106). С. 72–77.
9. Крутиков А. К. Прогнозирование спортивных результатов в индивидуальных видах спорта с помощью обобщенно-регрессионной нейронной сети. *Молодой ученый*. 2018. № 12. С. 22–26. URL: <https://moluch.ru/archive/198/48884/> (дата обращения: 20.01.2020).

10. Каллан Р. *Основные концепции нейронных сетей*. Москва: «Вильямс», 2001. 288 с.
11. Хайкин С. *Нейронные сети: полный курс, 2-е издание* / Пер. с англ. Москва: Вильямс, 2006. 1104 с.
12. Ковалевский С. В., Гитис В. Б. *Создание и применение нейронных сетей для решения прикладных задач: Учебно-методическое пособие для студентов специальности «Интеллектуальные системы принятия решений»*. Краматорск: ДГМА, 2008. 75 с.
13. *BaseGroup Labs: официальный сайт*. URL: <https://basegroup.ru/community/articles/intro> (дата обращения: 16.03.2021).
14. Мельников А. Ю. О возможностях применения нейросетевого моделирования для определения оптимального состава команды по игре «Что? Где? Когда?» и прогнозирования ее результатов. *Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2018: збірник наукових праць всеукраїнської наукової конференції з міжнародною участю «Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2018»* / за заг. ред. С.В.Ковалевського. Краматорск: ДГМА, 2018. С. 71–74.
15. Мельников А. Ю. Применение нейросетевого моделирования для определения оптимального состава команды в игре «Что? Где? Когда?» и прогнозирования ее результатов. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*. Краматорськ: ДГМА, 2020. № 1 (48). С. 154–160.
16. «Что? Где? Когда?»: четвертый городской турнир. URL: <https://www.facebook.com/groups/dgma.kii/permalink/1539402616220690/> (дата обращения: 16.03.2021).

#### References (transliterated)

1. Galkina T.P. *Sotsiologiya upravleniya: ot gruppy k komande: Ucheb. posobie* [Sociology of management: from group to team: Textbook. allowance]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 2003. 224 p.
2. Gallert Manfred. *Vse o komandoobrazovanii: rukovodstvo dlya trenerov* [All About Team Building: A Guide for Coaches] / Translated from German. Manfred Gellert, Klaus Novak. Moscow: Vershina Publ., 2006. 352 p.
3. Semina A. P. Komanda kak gruppovaya forma organizatsii truda. [Team as a group form of work organization.]. *Bulletin of the Altai Academy of Economics and Law*. 2019. № 12-1. С. 128–133. Available at: <https://vael.ru/ru/article/view?id=858> (accessed 18.03.2021)
4. *Liga ukrainских klubov – LUK* [League of Ukrainian Clubs – LUC]. Available at: <http://luk.org.ua/> (accessed 16.03.2021).
5. *Reglament provedeniya Chempionata Ukrainy po sportivnomu variantu intellektual'noy igry «Chto? Gde? Kogda?» bez ogranicheniya vozrasta* [Regulations of the Championship of Ukraine in the sports version of the intellectual game "What? Where? When?" no age limit]. URL: <https://goo.gl/DhJDHc> (accessed 16.03.2021).
6. *Klub intellektual'nykh igr DГМА* [Club of intellectual games of DSEA]. Available at: <https://www.facebook.com/groups/dgma.kii/> (accessed 16.03.2021).
7. *Polozhenie o sostavakh komand-uchastnits Chempionata Ukrainy po sportivnomu variantu igry «Chto? Gde? Kogda?» bez ogranicheniya vozrasta* [Regulations on the composition of the teams participating in the Championship of Ukraine in the sports version of the game "What? Where? When?" no age limit]. Available at: <http://luk.org.ua/documents/polozhenie-o-sostavah> (accessed 16.03.2021).
8. Kasyuk S. T., Vakhtomova E. M. Ispol'zovanie neyronnykh setey dlya analiza i prognozirovaniya dannykh v fizicheskoy kul'ture i sporte [Using neural networks for data analysis and forecasting in physical culture and sports]. *Scientific and theoretical journal "Scientific notes"*, 2013, № 12 (106), pp. 72–77.
9. Krutikov A. K. Prognozirovaniye sportivnykh rezul'tatov v individual'nykh vidakh sporta s pomoshch'yu obobshchenno-regressiionnoy neyronnoy seti [Prediction of sports results in individual sports using a generalized regression neural network]. *Young scientist*, 2018, № 12, pp. 22–26. Available at: <https://moluch.ru/archive/198/48884/> (accessed 20.01.2020).
10. Kallan R. *Osnovnye kontseptsii neyronnykh setey* [Basic concepts of neural networks]. Moscow: Williams Publ., 2001. 288 c.
11. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs, 2-e izdanie* [Neural Networks: Complete Course, 2nd Edition] / Translation from English. Moscow: Williams Publ., 2006. 1104 c.

12. Kovalevskiy S. V., Gitis V. B. Sozdanie i primeneniye neyronnykh setey dlya resheniya prikladnykh zadach: Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spetsial'nosti «Intel'kual'nye sistemy prinyatiya resheniy» [Creation and application of neural networks for solving applied problems: Study guide for students of the specialty "Intelligent decision-making systems"]. Kramatorsk: DSEA Publ., 2008. 75 p.
13. BaseGroup Labs: ofitsial'nyy sayt [BaseGroup Labs: official site]. Available at: <https://basegroup.ru/community/articles/intro> (accessed 16.03.2021).
14. Mel'nikov A. Yu. O vozmozhnostyakh primeneniya neyrosetevogo modelirovaniya dlya opredeleniya optimal'nogo sostava komandy po igre «Chto? Gde? Kogda?» i prognozirovaniya ee rezul'tatov [On the possibilities of using neural network modeling to determine the optimal team composition for the game "What? Where? When?" and predicting its results]. *Neural network technologies and their application NMTiZ-2018: a collection of scientific papers of the All-Ukrainian scientific conference with international participation* "Neural network technologies and their application NMTiZ-2018" / for general. ed. SV Kovalevsky. Kramatorsk: DSEA Publ., 2018, pp. 71–74.
15. Mel'nikov A. Yu. Primeneniye neyrosetevogo modelirovaniya dlya opredeleniya optimal'nogo sostava komandy v igre «Chto? Gde? Kogda?» i prognozirovaniya ee rezul'tatov [Application of neural network modeling to determine the optimal composition of the team in the game "What? Where? When?" and predicting its results]. *Bulletin of the Donbass State Engineering Academy: a collection of scientific papers*. Kramatorsk: DSEA Publ., 2020, № 1 (48), pp. 154–160.
16. «Chto? Gde? Kogda?»: chetvertyy gorodskoy turnir ["What? Where? When?": Fourth city tournament]. Available at: <https://www.facebook.com/groups/dgma.kii/permalink/1539402616220690/> (accessed 16.03.2021).

Поступила (received) 26.03.2021

*Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author*

**Мельников Александр Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>; e-mail: [alexandr@melnikov.in.ua](mailto:alexandr@melnikov.in.ua)

**Мельников Александр Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, доцент кафедры интеллектуальных систем принятия решений; г. Краматорск, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>; e-mail: [alexandr@melnikov.in.ua](mailto:alexandr@melnikov.in.ua)

**Melnykov Oleksandr Yuriyovich** – candidate of technical sciences, docent, Donbas State Engineering Academy, Associate Professor of the Department of Intelligent Decision Making Systems; Kramatorsk, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>; e-mail: [alexandr@melnikov.in.ua](mailto:alexandr@melnikov.in.ua)

*Д. С. ІВАЩЕНКО, О. С. КУЦЕНКО***ОГЛЯД І АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗВИТКУ ЕПІДЕМІЇ**

Сьогодні актуальною проблемою, яка постала перед людством, стала проблема боротьби з епідеміями і пандеміями. Одним із шляхів, які сприяють вирішенню цієї проблеми, є застосування математичних методів прогнозування процесу пандемії і оцінка впливу заходів, які приймаються органами охорони здоров'я, щодо зниження рівня темпів розвитку захворювання. У статті на основі аналізу великої кількості інформаційних джерел розглянуто найбільш ефективний підхід до математичного і комп'ютерного моделювання розвитку епідемії на основі індивідуально-орієнтованого і мультиагентного підходів. Проведено аналіз проблеми моделювання розвитку епідемії на основі мультиагентного підходу, а також можливостей прогнозування перебігу епідеміологічного процесу. Наведено приклад структури багатокomпонентної імітаційної моделі на основі загальноприйнятої вербальної моделі поширення вірусних захворювань. Як приклад розглянуто методіку імітаційного агентного моделювання за допомогою програмного продукту Any Logic процесів поширення 2019-nCoV. Отримані усереднені показники підтвердили основні середньо-годинні періоди протікання зараження, які були отримані чисто статистичними методами. На основі аналізу опублікованих робіт досліджені можливості управління розвитком епідемії шляхом впливу на ці фактори. Запропоновано відносно простий спосіб математичного моделювання та прогнозування епідемічної ситуації. Показано, що своєчасний і адекватний прогноз є необхідною умовою для планування структури, масштабів, термінів необхідних заходів, спрямованих на попередження епідемії і спалахів захворюваності, так само на скорочення та усунення їх негативних наслідків.

**Ключові слова:** агентне моделювання, вакцинація, епідемія, математичне моделювання, пандемія, прогнозування, імітаційне моделювання.

*Д. С. ІВАЩЕНКО, А. С. КУЦЕНКО***ОБЗОР И АНАЛИЗ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ ЭПИДЕМИИ**

Сегодня актуальной проблемой, возникшей перед человечеством, стала проблема борьбы эпидемиями и пандемиями. Одним из путей, способствующих решению этой проблемы, является применение математических методов прогнозирования процесса пандемии и оценка влияния мероприятий, принимаемых органами здравоохранения, по снижению уровня темпов развития заболевания. В статье на основе анализа множества источников информации рассмотрен наиболее эффективный подход к математическому и компьютерному моделированию развития эпидемии на основе индивидуально-ориентированного и мультиагентного подходов. Проведен анализ проблемы моделирования развития эпидемии на основе мультиагентного подхода, а также возможностей прогнозирования течения эпидемиологического процесса. Приведен пример структуры многокомпонентной имитационной модели на основе общепринятой вербальной модели распространения вирусных заболеваний. Как пример рассмотрено методика имитационного агентного моделирования с помощью программного продукта Any Logic процессов распространения 2019-nCoV. Полученные усредненные показатели подтвердили основные среднечасовые периоды протекания заражения, которые были получены чисто статистическими методами. На основе анализа опубликованных работ исследованы возможности управления развитием эпидемии путем воздействия на эти факторы. Предложены относительно простой способ математического моделирования и прогнозирования эпидемической ситуации. Показано, что своевременный и адекватный прогноз является необходимым условием для планирования структуры, масштабов, сроков необходимые меры, направленные на предупреждение эпидемий и вспышек заболеваемости, так же на сокращение и устранение их негативных последствий.

**Ключевые слова:** агентное моделирование, эпидемия, математическое моделирование, пандемия, прогнозирование, имитационное моделирование.

*D. S. IVASHCHENKO, O. S. KUTSENKO***OVERVIEW AND ANALYSIS OF METHODS FOR MODELING THE EPIDEMIC DEVELOPMENT PROCESS**

Today, the urgent problem facing humanity is the problem of fighting epidemics and pandemics. One of the ways to solve this problem is the use of mathematical methods for predicting the pandemic process and assessing the impact of measures taken by health authorities to reduce the rate of development of the disease. Based on the analysis of a variety of information sources, the article considers the most effective approach to mathematical and computer modeling of the development of the epidemic on the basis of individually oriented and multi-agent approaches. The analysis of the problem of modeling the development of epidemics on the basis of a multi-agent approach, as well as the possibilities of predicting the course of the epidemiological process is carried out. An example of the structure of a multicomponent simulation model based on the generally accepted verbal model of the spread of viral diseases is given. As an example, the methodology of simulation agent-based modeling using the Any Logic software product of distribution processes 2019-nCoV is considered. The obtained averaged indicators confirmed the main hourly average periods of infection, which were obtained by purely statistical methods. Based on the analysis of published works, the possibilities of managing the development of the epidemic by influencing these factors have been investigated. A relatively simple method of mathematical modeling and forecasting of the epidemic situation has been proposed. It is shown that a timely and adequate forecast is a prerequisite for planning the structure, scale, timing of the necessary measures aimed at preventing epidemics and outbreaks of disease, as well as reducing and eliminating their negative consequences.

**Keywords:** agent simulation, epidemic, math modeling, pandemic, prognostication, simulation.

**Вступ.** Аналіз і математичне моделювання спалахів захворювань грають важливу роль в плануванні заходів у відповідь органів охорони здоров'я на спалахи інфекційних захворювань, епідемії і пандемії [1]. Основна мета будь-якого такого моделювання – це визначення характеристик, динаміки і впливу пандемій, а також оцінки ефективності заходів в різних умовах [2–3]. Проте, слід враховувати, що

основна інформація для прийняття рішень надходить на щоденній основі не за результатами складного імітаційного моделювання, а з простого і проведеного в реальному часі статистичного аналізу, що ґрунтується на механістичних моделях передачі захворювання, що використовують доступні епідеміологічні та вірусологічні дані [4]. Математичне моделювання може служити могутнім інструментом

для обробки доступних даних і вказувати, які додаткові відомості можуть бути корисні при прийнятті управлінських рішень [5-9].

**Огляд існуючих розробок.** Для моделювання динаміки розвитку епідемії в даний час застосовується в основному метод системної динаміки, запропонований Форрестером, що підтверджується роботами як вітчизняних так і зарубіжних вчених [1-9]. При такому підході процес розвитку епідемії розглядається як динамічний процес з зосередженими параметрами [8], в якому всі індивідууми належать до деякого класу: здорові, які одужують, хворі. Такий підхід реалізований в класичній моделі SIR [10-14]. Мультиагентний підхід до моделювання епідемічної обстановки заснований на побудові загальних закономірностей [13] в результаті моделювання взаємодій конкретних суб'єктів всередині населеного пункту, підприємства, житлового масиву.

**Математичне моделювання процесу пандемії.** Перспективним напрямком на сьогоднішній день є використання, для вирішення завдань епідеміології багатокомпонентних систем, імітаційного моделювання. У цих системах поширення захворювань задається комплексом взаємодіючих між собою моделей, реалізованих на основі різних модельних підходів і відповідають за різні процеси, що відбуваються в даній системі (наприклад, пересування індивідів і контакти між ними, перебіг захворювання у конкретного індивіда, робота системи охорони здоров'я щодо виявлення та лікуванню індивідів). У разі необхідності модельний опис будь-якого з процесів може бути замінено іншим без необхідності перестроювання всієї системи. Універсальність багатокомпонентної системи може бути розширена багатьма способами.

Детальні багатокомпонентні моделі, призначені для обліку великої кількості взаємодіючих факторів,

можуть демонструвати високу ступінь реалістичності при збереженні гнучкості настройки в залежності від поставлених завдань (ця пружність досягається за рахунок багатокомпонентності). Зворотною стороною є зниження швидкодії, пов'язане, в тому числі, з необхідністю обміну інформацією між компонентами. Так, наприклад, згадана вище багатокомпонентна модель BioWar колективу авторів з університету Карнегі Меллон вимагає для настройки своїх підмоделей 40 вхідних файлів з параметрами і витрачає чотири з половиною години на проведення обчислювального експерименту з населенням з 275.000 індивідів.

У роботі Леоненко [11], пропонується багатокомпонентна індивідуум-орієнтована модель виявлення індивідів, схильних до колоректального раку, в якій поєднується популяційний опис динаміки численностей індивідів з дискретно-подієвою моделлю протікання захворювання у хворих індивідів і індивідів в стані ремісії. Моделі такого типу можуть будуватися на основі стохастичних популяційних моделей в разі, коли неоднорідність індивідів щодо протікання захворювання надає ефект на динаміку епідемії в популяції.

Цей підхід дозволяє відображати особливості протікання захворювання у кожного індивіда з потрібним ступенем деталізації, при цьому швидкодія моделюють програм є достатнім для проведення обчислювальних експериментів на персональних комп'ютерах. Модель, побудована на основі такого підходу, використовувалася для порівняння ефективності двох методів колоноскопії індивідів: фіброколоноскопії і віртуальна колоноскопія (ВКС) для запобігання захворюваності населення на колоректальний рак. В роботі було показано перевагу масового обстеження з використанням ВКС в довгостроковому періоді. Багатокомпонентна модель,

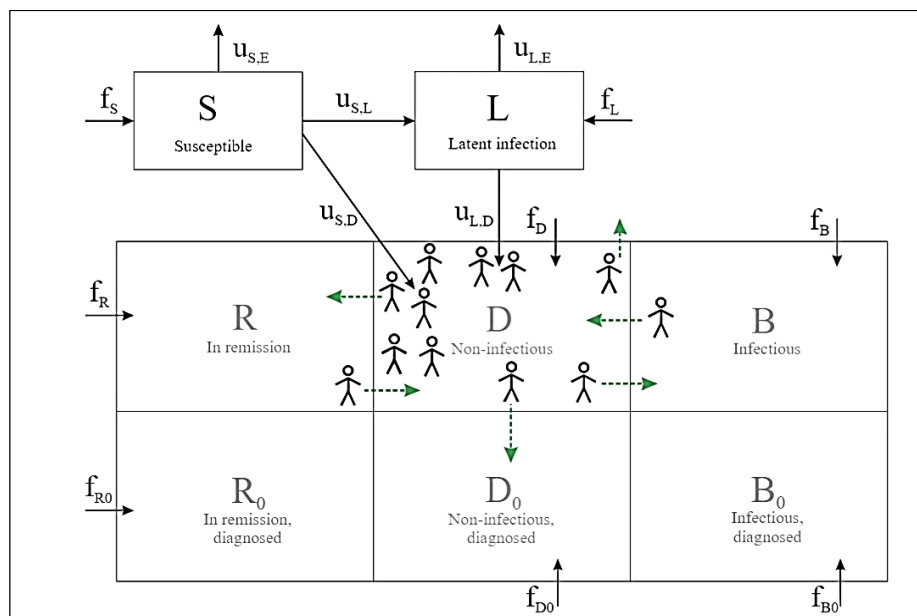


Рис. 1. Структура багатокомпонентної моделі на прикладі моделі розповсюдження вірусних захворювань

побудована за аналогічним принципом [11], також застосовувалася авторами для моделювання поширення туберкульозу показана на рис. 1., де  $f_k$  – це приток населення до  $k$ -ї групи,  $U_{jk}$  – кількість індивідумів які переходять з групи  $J$  в групу  $K$ .

В основі сучасного математичного моделювання епідемії закладений принцип експоненціального зростання числа хворих. Це означає, що зростання числа хворих з плином часу поступово збільшується пропорційно певному коефіцієнту, який є константою і розраховується для кожного захворювання окремо.

**Імітаційне моделювання та агентний підхід.** В даний час набирають популярність так звані методи імітаційного моделювання та агентного підходу. Сутність імітаційного моделювання полягає в тому, що для досліджуваної системи (розвитку епідемії) будуються графічні діаграми зв'язків і глобальних впливів одних параметрів на інші в часі. Створена на основі цих діаграм модель імітується на комп'ютері (одним з програмних продуктів дозволяють це зробити є програма AnyLogic). Такий вид моделювання дозволяє проникнути в суть того, що відбувається в системі і виявити причинно-наслідкові зв'язки між об'єктами і явищами. Метою агентного моделювання є отримання уявлення про ці глобальні правила, загалом поведінці системи, виходячи з припущень про індивідуальний, приватному поведінці її окремих активних об'єктів і взаємодії цих об'єктів в системі. Саме такий метод був застосований китайськими вченими для моделювання епідемії корона вірусу в Китаї.

Агентне моделювання (АМ) використовується для моделювання дій і взаємодій агентів з персоналізованими властивостями і поведінкою. Воно знаходить широке застосування в багатьох сферах, включаючи біологію, екологію та соціологію. Оскільки, як зазначають китайські дослідники, поширення 2019-nCoV – це відносно складний процес, отримання відповідних параметрів для побудови моделі АМ важко. Тому в моделі складний процес поширення 2019-nCoV до деякої міри спрощений. Людина, представлений у вигляді агента – основа цієї імітаційної моделі [1–13]. Дослідження передбачає, що статус кожної людини в моделі можна розділити на 4 види: вразливий, інфікований, хворий і з придбаним імунітетом (класична модель SEIR). У дослідженні було зроблено припущення, що:

- кожного хворого можна ефективно ізолювати і лікувати;
- як тільки виявлено перший випадок захворювання, люди можуть успішно мінімізувати особисті контакти;
- після певного проміжку лікування людина одужує і стає несприйнятливим до хвороби.

Для дослідження в моделі було створене просте інтерактивне середовище. Було висунуто припущення, що людина постійно перебуває вдома або в громадських місцях. До появи симптомів хвороби (тобто людина не інфікована або знаходиться в інкубаційному періоді) він зазвичай виходить з дому, прямуючи в

громадське місце, а після цього повертається назад. Щоб імітувати тенденцію поширення епідемії 2019-nCoV, в моделі існували 10000 чоловік, один з яких був випадково заражений. Модель запускала 10 разів, і середні значення показників були взяті як результат експерименту. Отримані дані були відсортовані і відкориговані за допомогою програми R3.6.2, а модель створювалася на основі ПО AnyLogic [4]. В ході дослідження групі китайських медиків вдалося розрахувати деякі усереднені показники, зокрема частоту зараження 2019-nCoV при особистому контакті у пацієнтів (10,4%); тривалість інкубаційного періоду ( $\approx 6,6$  днів) і час, який необхідно, щоб вилікуватися при призначеному курсі лікування ( $\approx 9,8$  днів).

**Висновки.** В даній роботі були розглянуті методи моделювання розвитку захворюваності. На жаль, варто визнати, що на сьогоднішній день не існує ефективної і універсальної моделі, яка на основі базової статистики захворювань змогла б досить точно спрогнозувати виникнення і оцінити перебіг того чи іншого захворювання. Кожна хвороба має свої особливості з одного боку, а крім того, навіть в рамках однієї епідемії ці особливості в різних соціумах можуть проявлятися неоднаково, що ми можемо спостерігати на прикладі останньої пандемії коронавірусної інфекції COVID-19, викликаній коронавірусів SARS-CoV-2. Особливо це добре простежується на тлі порівняння перебігу захворювання в Південно-Східній Азії і в країнах Південної і Центральної Європи, Латинської Америки. Однак сучасне моделювання (особливо в поєднанні різних методів – математичних і імітаційних) дозволяє оцінити масштаби і наслідки епідемії при різних сценаріях і діях влади, що має підвищити якість і ефективність вжитих заходів і управлінських рішень.

#### Список літератури

1. Иванов М. В. *Математическое моделирование процесса пандемии: теория и практика*. URL: <https://indsi.ru/2020/04/30/математическое-моделирование-процесса/> (дата звернення: 15.11.2020).
2. Матихин А. В. *Финальные вероятности для марковских процессов эпидемии: дис. д-ра. техн. наук*. Москва, 2011. 606 с.
3. Авиллов К. *Математическое моделирование в эпидемиологии как задача анализа сложных данных*. URL: <http://download.yandex.ru/company/experience/seminars/KAvilovmatmodelirovanie.pdf> (дата звернення: 7.04.2021).
4. Allen L. J. S. *An Introduction to stochastic epidemic models*. URL: <http://eaton.math.rpi.edu/csurns/papers/epidemic/allenstochasticepidemic.pdf> (дата звернення: 3.04.2021).
5. Gray A., Greenhalgh D., Mao X., Pan J. *The SIS epidemic model with markovian switching*. URL: <http://strathprints.strath.ac.uk/41322> (дата звернення: 10.03.2021).
6. Асатрян М. Н., Салман Е. Р., Боев Б. В. Моделирование и прогнозирования эпидемического процесса гепатита В. *Эпидемиология и Вакцинопрофилактика*. Москва: Мир, 2012. №1 (62). С. 49–54.
7. Боев Б. В. Моделирование развития эпидемии гриппа А (H1N1). *Эпидемиология и Вакцинопрофилактика*. 2010. №1 (50). С.52–54.
8. Боев Б. В., Салман Е. Р., Асатрян М. Н. Применение компьютерного инструментария для прогнозирования вспышек гепатита А техногенного характера с оценкой эффективности мер противодействия. *Эпидемиология и Вакцинопрофилактика*. 2010. № 3 (52). С. 57–62.
9. Carley K. M., Altman N., Kaminsky B., Nave D., Yahja A. *BioWar: A City-Scale Multi-Agent Network Model of Weaponized Biological Attacks*. CASOS Technical Report 2004. URL:

- [http://www.casos.cs.cmu.edu/publications/papers/carley\\_2004\\_biowarcityscale.pdf](http://www.casos.cs.cmu.edu/publications/papers/carley_2004_biowarcityscale.pdf) (дата звернення: 17.10.2020).
- Coakley S. *Formal Software Architecture for Agent-Based Modelling in Biology Ph. D. thesis*. Department of Computer Science, University of Sheffield, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 2007.
  - Леоненко В. Н., Перцев Н. В. Анализ эффективности программ выявления индивидуумов, подверженных колоректальному раку, на основе имитационного моделирования. *Электронное научное периодическое издание института проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук «Управление большими системами»*. Москва: ИПУ РАН. 2011. № 35. С. 207–236.
  - Бейли Н. *Математика в биологии и медицине*. Москва: Мир, 1970. 326 с.
  - Bellu G., Saccomani M. P., Audoly S., D. L. DAISY: A new software tool to test global identifiability of biological and physiological systems. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2007. Vol. 88, № 1, pp. 52–61.
  - Криворотко О. И., Андорная Д. В., Кабанихин С. И. Анализ чувствительности и практическая идентифицируемость математических моделей биологии. *Сибирский журнал промышленной математики*. 2020. Т. 23, № 1. С. 107–125.
  - i Vaksynoprofilaktyka*. [Model and prognosis of the hepatitis B epidemic process. Epidemiology and vaccine prophylaxis]. Moscow: Mir Publ., 2012, no. 1 (62), pp. 49–54.
  - Boev B. V. *Modeliuvannia i prohnouzuvannia epidemichnoho protsesu hepatytu A (H1N1)*. [Modeling the development of the epidemic influenza A (H1N1)]. Epidemiology and Vaccine prophylaxis. 2010, no. 1 (50), pp. 52–54.
  - Boev B. V., Salman E. R., Asatryan M. N. *Zastosuvannia kompiuternoho instrumentarii dlia prohnouzuvannia vodnykhvspyshkek hepatytu Atekhnohennoho kharakteru c otsinkoiu efektyvnosti merprotivodeistviia*. *Epidemiolohiia i Vaksynoprofilaktyka*. [Stagnation of computer tools for predicting water hepatitis indications A technogenic character with an assessment of the effectiveness of measures. Epidemiology and Vaccine prophylaxis.]. 2010, no. 3 (52), pp. 57–62.
  - Carley K. M., Altman N., Kaminsky B., Nave D., Yahja A. *BioWar: A City-Scale Multi-Agent Network Model of Weaponized Biological Attacks*. CASOS Technical Report 2004. URL: [http://www.casos.cs.cmu.edu/publications/papers/carley\\_2004\\_biowarcityscale.pdf](http://www.casos.cs.cmu.edu/publications/papers/carley_2004_biowarcityscale.pdf) (accessed: 17.10.2020)
  - Coakley S. *Formal Software Architecture for Agent-Based Modeling in Biology Ph. D. thesis*. Department of Computer Science, University of Sheffield, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 2007.
  - Leonenko V. N., Pertsev N. V. *Analiz effektivnosti programm vyivavleniya individuumov, podverzhennykh kolorektalnom rake, na osnove imitatsionnogo modelirovaniya*. [Analysis of the effectiveness of the program for the treatment of individuals with advanced colorectal cancer, based on the simulation model.] *Electronic science periodically seen Institute of Management Problems by V.A. Trapeznikov of the Russian Academy of Sciences «Management of great systems»*. Moscow, IPU RAN Publ., 2011, no. 35, pp. 207–236.
  - Bailey N. *Mathematics in biology and medicine*. United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland, 1969, 448 p. (Russ. ed.: C. G. Kovalenko. *Matematika v biologii i medicinie* Moscow, Mir Publ., 1970. 326 p.).
  - Bellu G., Saccomani M. P., Audoly S., D. L. DAISY: A new software tool to test global identifiability of biological and physiological systems. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. 2007, vol. 88, no. 1, pp. 52–61.
  - Krivorotko O. I., Andornaya D. V., Kabanikhin S. I. Sensitivity analysis and practical identifiability of mathematical models of biology. *Siberian Journal of Industrial Mathematics*. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 107–125.

#### References (transliterated)

Надійшла (received) 14.04.2021

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

**Івашенко Дар'я Сергіївна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірантка кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7365-111X; e-mail: [daria.ivashchenko@khpri.edu.ua](mailto:daria.ivashchenko@khpri.edu.ua).

**Куценко Олександр Сергійович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7964-1286; e-mail: [kuzenko@kpi.kharkov.ua](mailto:kuzenko@kpi.kharkov.ua).

**Ивашенко Дарья Сергеевна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирантка кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий, г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-7365-111X; e-mail: [daria.ivashchenko@khpri.edu.ua](mailto:daria.ivashchenko@khpri.edu.ua).

**Куценко Александр Сергеевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: [kuzenko@kpi.kharkov.ua](mailto:kuzenko@kpi.kharkov.ua).

**Ivashchenko Daria Sergiivna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student of the Department of Systems Analysis and Information and Analytical Technologies, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7365-111X; e-mail: [daria.ivashchenko@khpri.edu.ua](mailto:daria.ivashchenko@khpri.edu.ua).

**Kutsenko Oleksandr Serhiyovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6059-3694; e-mail: [kuzenko@kpi.kharkov.ua](mailto:kuzenko@kpi.kharkov.ua).

**О. А. ПАВЛОВ, О. В. ВОЗНЮК, О. Г. ЖДАНОВА**

### **ЗАДАЧА ДРОБОВО-ЛИНІЙНОГО ПРОГРАМУВАННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Розглядається задача дробово-лінійного програмування в умовах невизначеності. Під невизначеністю у роботі розуміється неоднозначність значень коефіцієнтів функціонала оптимізації. Наведено дві математичні постановки задачі: в першій задачі невизначеність відноситься до чисельника – є кілька наборів коефіцієнтів цільової функції, кожен з яких може визначати чисельник критерію задачі на етапі реалізації її розв'язку, у другій – невизначеність відноситься до знаменника функціоналу. У роботі пропонується кілька компромісних критеріїв оцінки розв'язків даної задачі. Детально розглянуто два з них: 1) знаходження компромісного розв'язку, у якого значення часткових функціоналів відхиляються від їх оптимальних значень в заданих межах; 2) знаходження компромісного розв'язку за критерієм мінімізації сумарного зваженого перевищення значень часткових функціоналів відповідно заданих допустимих відхилень від їх оптимальних значень (величин поступок). Для знаходження компромісного розв'язку задач дробово-лінійного програмування за цими двома критеріями сформульована допоміжна задача лінійного програмування, обмеження якої залежать від напрямку оптимізації вихідної задачі. Для дослідження властивостей задачі були проведені серії експериментів чотирьох типів, метою яких було: 1) дослідження впливу зміни величин встановлених допустимих відхилень часткових цільових функцій на величини фактичних відхилень і на величини поступок; 2) дослідження впливу зміни експертних ваг часткових цільових функцій на величини фактичних відхилень і на величини поступок, що відповідають отриманим компромісним розв'язкам. В роботі запропоновані схеми експериментів і представлені їх результати в графічному вигляді. При цьому було встановлено, що отримані залежності залежать від напрямку оптимізації вихідної задачі.

**Ключові слова:** оптимізація, невизначеність, згортка, дробово-лінійне програмування, задача лінійного програмування, компромісний розв'язок.

**А. А. ПАВЛОВ, А. В. ВОЗНЮК, Е. Г. ЖДАНОВА**

### **ЗАДАЧА ДРОБНО-ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Рассматривается задача дробно-линейного программирования в условиях неопределенности. Под неопределенностью в работе понимается неоднозначность значений коэффициентов функционала оптимизации. Приведены две математические постановки задачи: в первой задаче неопределенность относится к числителю – имеются несколько наборов коэффициентов целевой функции, каждый из которых может определять числитель критерия задачи на этапе реализации ее решения, во второй – неопределенность относится к знаменателю функционала. В работе предлагается несколько компромиссных критериев оценки решений рассматриваемой задачи. Детально рассмотрены два из них: 1) нахождение компромиссного решения, у которого значения частных функционалов отклоняются от их оптимальных значений в заданных пределах; 2) нахождение компромиссного решения по критерию минимизации суммарного взвешенного превышения значений частных функционалов относительно заданных допустимых отклонений от их оптимальных значений (величины уступок). Для нахождения компромиссного решения задач дробно-линейного программирования по этим двум критериям сформулирована вспомогательная задача линейного программирования, ограничения которой зависят от направления оптимизации исходной задачи. Для исследования свойств задачи были проведены серии экспериментов четырех типов, целью которых было: 1) исследование влияния изменения величин установленных допустимых отклонений частных целевых функций на величины фактических отклонений и на величины уступок; 2) исследование влияния изменения экспертных весов частных целевых функций на величины фактических отклонений и на величины уступок получаемых компромиссных решений. В работе предложены схемы экспериментов и представлены их результаты в графическом виде. При этом было установлено, что полученные зависимости зависят от направления оптимизации исходной задачи.

**Ключевые слова:** оптимизация, неопределенность, свертка, дробно-линейное программирование, задача линейного программирования, компромиссное решение.

**A. A. PAVLOV, O. V. VOZNIUK, O. G. ZHDANOVA**

### **THE LINEAR-FRACTIONAL PROGRAMMING PROBLEM UNDER UNCERTAINTY CONDITIONS**

This paper addresses the problem of linear-fractional programming under uncertainty. The uncertainty here is understood as the ambiguity of the coefficients' values in the optimized functional. We give two mathematical formulations of the problem. In the first one, the uncertainty refers to the numerator: there are several sets of objective function coefficients, each coefficient can determine the numerator of the problem's criterion at the stage of its solution implementation. The uncertainty in the second formulation refers to the denominator of the functional. We propose several compromise criteria for evaluating solutions to the problem we consider. We study the following two criteria in detail: 1) finding a compromise solution in which the deviation of the values of the partial functionals from their optimal values is within the specified limits; 2) finding a compromise solution according to the criterion of minimizing the total weighted excess of the values of partial functionals in relation to the specified feasible deviations from their optimal values (the values of concessions). We formulate an auxiliary linear programming problem to find a compromise solution to the linear-fractional programming problems by these two criteria. The constraints of the auxiliary problem depend on the optimization direction in the original problem. We carried out a series of experiments of four types to study the properties of the problem. The purposes of the experiments were: 1) to study how changes in the values of the specified feasible deviations of partial objective functions impact the values of actual deviations and the values of concessions; 2) to study how changes in the expert weights of partial objective functions impact the values of actual deviations and the values of concessions for the compromise solutions we obtain. We propose in this work the schemes of experiments and present their results in graphical form. We have found that the obtained relations depend on the optimization direction in the original problem.

**Keywords:** optimization, uncertainty, convolution, linear-fractional programming, linear programming problem, compromise solution.

**Вступ.** Проблема прийняття рішень в умовах невизначеності займає важливе місце в загальній проблемі прийняття рішень. Успішне її вирішення в даний час неможливо без застосування нових інформаційних технологій, складовою частиною яких математичні методи прийняття рішень (ПР) [1].

Ускладнює вирішення задач ПР різні трактування поняття «невизначеність». Автор [2] розрізняє ситуаційну і інформаційну невизначеність (в останньому випадку передбачається, що прийняття рішень проводиться в умовах неповної інформації). Якщо невизначеність інформації становить від 20% і

більше, застосовують так званий «сірий» аналіз. Методи сірого аналізу допускають завдання декількох критеріїв оптимальності і рішення декількох задач управління, з урахуванням можливої зміни ситуації і можливого переходу від однієї задачі управління до іншої, при цьому розв'язок задачі є множинним, а не поодиноким.

Серед відомих методів та підходів до прийняття рішень найбільший інтерес являють ті, що дають можливість враховувати багатокритеріальність [3] та невизначеність, а також дозволяють обирати розв'язки з множини альтернатив різного типу при наявності критеріїв, що мають різні типи шкал вимірювання.

Згідно [4], за типами експертної інформації виділяють наступні методи вирішення задач в умовах невизначеності:

1) методи з дискретизацією невизначеності, що використовуються коли в постановці задачі відсутня інформація про уподобання і є кількісна і/або інтервальна інформація про наслідки [5];

2) стохастичне домінування [6], методи прийняття рішень в умовах ризику та невизначеності на основі глобальних критеріїв, метод аналізу ієрархій [7], методи теорії нечітких множин [8], що використовуються коли в постановці задачі надана якісна інформація про переваги та наслідки;

3) метод практичного прийняття рішень та методи вибору статистично ненадійних рішень, які використовуються коли надана якісна (порядкова) інформація про уподобання і наслідки;

4) методи кривих байдужості для прийняття рішень в умовах ризику та невизначеності, методи дерев рішень та декомпозиційні методи теорії очікуваної корисності, які використовуються коли надана кількісна інформація про уподобання та наслідки.

На вибір метода вирішення задач в умовах невизначеності суттєво впливає обраний критерій оптимальності. У роботах [9, 10] були викладені основи конструктивної теорії знаходження компромісного розв'язку для класу задач комбінаторної оптимізації в умовах невизначеності виду:

$$\text{extremum}_{\sigma \in \Omega} \sum_{i=1}^s \omega_i k_i(\sigma), \quad (1)$$

де  $\omega_i$  – числа;

$k_i(\sigma)$  –  $i$ -та довільна числова характеристика допустимого розв'язку  $\sigma$  ( $i = 1, \dots, s$ );

$\Omega$  – множина допустимих розв'язків.

Під невизначеністю тут розуміється невизначеність значень коефіцієнтів  $\omega_i$  ( $i = 1, \dots, s$ ). В [11] підтверджена ефективність цих теоретичних положень на прикладі однопродуктової і багатодуктової задачі. В цій роботі отримані в [9–11] результати розповсюджуються на задачу дробово-лінійного програмування, де величини  $\omega_i$  і  $k_i(\sigma)$  ( $i = 1, \dots, s$ ) зв'язані нелінійно і формально не належать до класу задач комбінаторної оптимізації (1).

**Постановка задачі.** Задача дробово-лінійного програмування (ЗДЛП) у детермінованій постановці має вигляд:

$$\text{extremum}_x \frac{\sum_{i=1}^n c_i x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i}, \quad (2)$$

$$Ax = b, x \geq 0, \quad (3)$$

де  $c_1, \dots, c_n, d_1, \dots, d_n$  – дійсні числа;

$b = (b_1, \dots, b_m)^T$  – дійсні числа;

$A = (a_{ij})$  – дійсні числа;

$x = (x_1, \dots, x_n)^T$  – змінні задачі.

Для того, щоб при поясненні уникнути необхідності розгляду множини різних можливих варіантів, припустимо, що на  $x_i$  накладаються такі обмеження, при яких знаменник в (2) строго додатний для всіх допустимих значень  $x_i$ , а також, що максимум  $c(x)$  є скінченним [12]:

$$\sum_{i=1}^n d_i x_i \neq 0, \sum_{i=1}^n d_i x_i > 0.$$

**Перша постановка задачі дробово-лінійного програмування в умовах невизначеності (ЗДЛПНУ).** Існує  $R$  наборів коефіцієнтів  $c^r = (c_1^r, \dots, c_n^r)^T$ ,  $r = 1, \dots, R$  можливих значень коефіцієнтів  $c_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Тоді задача (2)–(3) перетворюється на ЗДЛПНУ. За наявності невизначеності ставиться задача знаходження так званого компромісного розв'язку цієї задачі.

**Друга постановка задачі дробово-лінійного програмування в умовах невизначеності.** Існує  $R$  наборів коефіцієнтів  $d^r = (d_1^r, \dots, d_n^r)^T$ ,  $r = 1, \dots, R$  можливих значень коефіцієнтів  $d_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . При цьому для допустимих розв'язків, що задовольняють обмеженням (3), мають місце наступні умови:

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i > 0, \forall r \sum_{i=1}^n d_i^r x_i > 0,$$

$$\sum_{i=1}^n c_i x_i < +\infty, \forall r \sum_{i=1}^n d_i^r x_i < +\infty.$$

За наявності невизначеності ставиться задача знаходження так званого компромісного розв'язку задачі (2)–(3).

В даній роботі буде показано, що усі результати, отримані в [9, 10] для класу задач комбінаторної оптимізації в умовах невизначеності виду (1) (для якої існує  $R$  наборів вагів  $\{\omega_i^r, i = 1, \dots, s, r = 1, \dots, R$  кожний з яких може бути набором коефіцієнтів  $\omega_1, \dots, \omega_s$  задачі (1) на етапі реалізації її розв'язку) можуть застосовуватися і для задачі дробово-лінійного програмування (2)–(3) в умовах невизначеності (перша і друга постановки). Хоча остання задача формально не належить до класу задач комбінаторної оптимізації (1), в силу специфіки одного із приведених в [9, 10] компромісних критеріїв має місце більш ефективний метод розв'язання.

Критерії оцінки розв'язків для першої постановки ЗДЛПУН. Оскільки в умовах невизначеності досить складно визначити чіткі критерії ефективності розв'язання, у цій роботі пропонується декілька компромісних критеріїв оцінки розв'язку задачі, що розглядається.

**Критерій 1.** Знайти компромісний розв'язок  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ , що задовольняє обмеженням задачі (2)–(3) і для якого виконується

$$\text{extremum}_x \sum_{r=1}^R \omega_r \left( \frac{\sum_{i=1}^n c_i^r x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i} - f_{\text{opt}}^r \right), \quad (4)$$

$$Ax = b, x \geq 0,$$

де  $\omega_r > 0, r = 1, \dots, R$  – експертні вагові коефіцієнти;

$$f_{\text{opt}}^r = \text{extremum}_x \frac{\sum_{i=1}^n c_i^r x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i}.$$

**Критерій 2.** Введемо випадкову величину  $F = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{c}_i x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i} - \bar{f}_{\text{opt}}$ , де  $(n+1)$ -вимірний дискретний випадковий величина  $\bar{c}_1, \dots, \bar{c}_n, \bar{f}_{\text{opt}}$ , задається таблицею

$$\{c_1^r, \dots, c_n^r, f_{\text{opt}}^r\},$$

$$p_r > 0, r = 1, \dots, R, \sum_r p_r = 1.$$

Знайти компромісний розв'язок  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ , що задовольняє обмеженням задачі (2)–(3) і для якого виконується

$$\min_x M F = \min_x \sum_{r=1}^R p_r \left( \frac{\sum_{i=1}^n c_i^r x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i} - f_{\text{opt}}^r \right).$$

**Критерій 3.** Знайти компромісний розв'язок  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ , що задовольняє обмеженням задачі (2)–(3) і для якого виконується

$$\Delta_i \leq l_i, l_i \geq 0, i = 1, \dots, R, \quad (5)$$

де для задачі на мінімум:

$$\Delta_r = \frac{\sum_{i=1}^n c_i^r x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i} - f_{\text{opt}}^r, r = 1, \dots, R,$$

а для задачі на максимум відповідно:

$$\Delta_r = f_{\text{opt}}^r - \frac{\sum_{i=1}^n c_i^r x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i}, r = 1, \dots, R.$$

Зміст величин  $l_r, r = 1, \dots, R$ : допустимі відхилення значень часткових функціоналів компромісного розв'язку від їх оптимальних значень.

**Критерій 4.** Якщо компромісного розв'язку, що задовольняє критерію 3 не існує, то знайти  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ , що задовольняє обмеженням задачі (2)–(3) і на якому досягається

$$\min_x \sum_{r=1}^R \omega_r \max\{0; \Delta_r - l_r\},$$

де  $\omega_r > 0, r = 1, \dots, R$  – експертні вагові коефіцієнти;

**Критерій 5.** Для одного з наборів вагів  $c^r, r \in \{1, \dots, R\}$  знайти оптимальний розв'язок задачі

$$\text{extremum}_x \sum_{r=1}^R \frac{\sum_{i=1}^n c_i^r x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i},$$

$$Ax = b, x \geq 0,$$

якому відповідало б

$$\min_x \sum_{j=1}^R \omega_j \Delta_j, j \neq r,$$

де  $\omega_r > 0, r = 1, \dots, R$  – експертні вагові коефіцієнти;

**Критерії оцінки розв'язків для другої постановки ЗДЛПУН.** Так як у другій постановці невизначеність відноситься до значень компонент вектору  $d$ , критерії для цієї задачі відрізняються від критеріїв 1–5 тим, що вираз  $\frac{\sum_{i=1}^n c_i^r x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i}$  замінюється на  $\frac{\sum_{i=1}^n c_i x_i}{\sum_{i=1}^n d_i^r x_i}$ , а максимізація/мінімізація функціоналу  $\frac{\sum_{i=1}^n c_i x_i}{\sum_{i=1}^n d_i^r x_i}$  замінюється на мінімізацію/максимізацію.

**Побудова компромісного розв'язку. Перша постановка ЗДЛПУН.** Як відомо [12], задача (2)–(3) зводиться до задачі лінійного програмування (ЗЛП) наступним чином. Введемо нові змінні:

$$k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n d_i x_i}, y_i = k x_i, i = 1, \dots, n.$$

Тоді задача (2)–(3) прийме вигляд:

$$\text{extremum}_{y,k} \sum_{i=1}^n c_i y_i, \quad (6)$$

$$Ay = kb, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i y_i = 1, y \geq 0, \quad (8)$$

де  $y = (y_1, \dots, y_n)^T$ .

По розв'язку ЗЛП (6)–(8) знаходиться оптимальний розв'язок задачі (2)–(3):  $x_i = \frac{y_i}{k}, i = 1, \dots, n$ . При цьому оптимальне значення функціоналів (2) і (8) приймають однакове значення.

ЗЛП (6)–(8) належить класу (1) і, таким чином, усі результати [9, 10] можуть бути застосовані до цієї ЗЛП і, як результат, до задачі (2)–(3) у випадку, коли коефіцієнти  $d_i, i = 1, \dots, n$  задані, а невизначеність відноситься тільки до  $c_i, i = 1, \dots, n$ . Таким чином, ми довели наступні твердження.

**Твердження 1.** Для довільних  $q_r > 0, r = 1, \dots, R$ , справедливо

$$\begin{aligned} & \arg \operatorname{extremum}_x \sum_{r=1}^R q_r \left( \frac{\sum_{i=1}^n c_i^r x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i} - f_{\text{opt}}^r \right) \\ &= \arg \operatorname{extremum}_x \sum_{i=1}^n \left( \frac{\sum_{r=1}^R q_r c_i^r}{\sum_{i=1}^n d_i x_i} \right) x_i, \end{aligned}$$

$$Ax = b, x \geq 0.$$

**Твердження 2.** Нехай  $x(\omega_1, \dots, \omega_R, \Delta_1, \dots, \Delta_R)$  – розв’язок задачі

$$\min_x \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{r=1}^R \omega_r c_i^r) x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i},$$

$$Ax = b, x \geq 0,$$

де  $\Delta_r > 0, r = 1, \dots, R$  визначаються виразом (4), тоді якщо  $\omega'_j > \omega_j$ , то для має місце  $x(\omega_1, \dots, \omega_{j-1}, \omega'_j, \omega_{j+1}, \dots, \omega_R, \Delta'_1, \dots, \Delta'_R)$

$$(\omega'_j - \omega_j)(\Delta'_j - \Delta_j) \leq 0.$$

Твердження 2 очевидним способом виникає із наслідка 4 твердження 5 в [9].

**Наслідок 1.** Якщо  $|f_{\text{opt}}^r| < \infty, r = 1, \dots, R$ , то в силу того, що множина вершин многогранника ЗЛП (6)–(8) кінцева, завжди існує таке  $\omega_j^* > 0$  величина якого залежить від значень  $\omega_1, \dots, \omega_{j-1}, \omega_{j+1}, \dots, \omega_R$ , що для всіх значень  $\hat{\omega}_j > \omega_j^*$  у розв’язку

$$x_i(\omega_1, \dots, \omega_{j-1}, \hat{\omega}_j, \omega_{j+1}, \dots, \omega_R), i = 1, \dots, R \quad (9)$$

Величина  $\Delta_j$  дорівнює нулю, тобто розв’язок (9) є оптимальним для задачі (2)–(3) з коефіцієнтами  $a_i = a_i^r, i = 1, \dots, n$ , причому цьому розв’язку відповідає мінімум виразу

$$\min_x \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq j}}^R \omega_r \left( \frac{E}{F} - f_{\text{opt}}^r \right),$$

де

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^n c_i^r x_i(\omega_1, \dots, \omega_{j-1}, \bar{\omega}_j, \omega_{j+1}, \dots, \omega_R, \\ &\quad \Delta'_1, \dots, \Delta'_{j-1}, 0, \Delta'_{j+1}, \dots, \Delta'_R), \\ F &= \sum_{i=1}^n d_i x_i(\omega_1, \dots, \omega_{j-1}, \bar{\omega}_j, \omega_{j+1}, \dots, \omega_R, \\ &\quad \Delta'_1, \dots, \Delta'_{j-1}, 0, \Delta'_{j+1}, \dots, \Delta'_R). \end{aligned}$$

**Наслідок 2.** В силу результатів, що викладені в [1,2], для задачі

$$\min_x \frac{\sum_{i=1}^n (\sum_{r=1}^R q_r c_i^r) x_i}{\sum_{i=1}^n d_i x_i},$$

$$Ax = b, x \geq 0.$$

має місце очевидний аналог твердження 2 і його наслідків.

Далі для першої постановки ЗДЛПУН будуть детально розглянуті критерії 3 та 4.

**Знаходження компромісного розв’язку за критеріями 3 та 4.** Компромісний розв’язок ( $x_i = \frac{y_i}{y_0}$ ,  $i = 1, \dots, n$ ) за критеріями 3 та 4 (якщо за критерієм 3 розв’язку не існує) знаходиться за розв’язком наступної ЗЛП:

$$z = \min_{y,z,k} \sum_{r=1}^R \omega_r z_r, \quad (10)$$

$$Ay = y_0 b, \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^n d_i y_i = 1, \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n c_i^r y_i - z_r \leq f_{\text{opt}}^r + l_r, r = 1, \dots, R. \quad (13)$$

Якщо вихідна задача (2)–(3) є задачею на максимум, то в задачі (10)–(13) нерівності (13) мають вигляд:

$$\sum_{i=1}^n c_i^r y_i + z_r \geq f_{\text{opt}}^r - l_r, r = 1, \dots, R.$$

Зміст величин  $z_r, r = 1, \dots, R$ : величина, яка показує наскільки ми повинні “посунутися” (поступитись) від встановленого допустимого відхилення від найкращого значення  $r$ -го часткового функціоналу у випадку якщо не задовольняються обмеження (5).

Примітка: ЗЛП, що відповідають компромісним розв’язкам за критеріями 1, 2 та 5 формуються аналогічно з використанням результатів, отриманими в [10].

**Експериментальне дослідження.** Метою експериментів є дослідження залежності вихідних даних задачі від зміни деяких вхідних параметрів. Далі будуть представлені результати експериментів для задач розмірності  $n = 5, m = 5, R = 5$ , а величини  $c = (c_1, \dots, c_n)^T$ ,  $d = (d_1, \dots, d_n)^T$ ,  $b = (b_1, \dots, b_m)^T$ ,  $A = (a_{ij}), i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n$  розподілені рівномірно.

**Експеримент типу 1.** Мета – дослідження того, як впливає зміна величин встановлених допустимих відхилень часткових цільових функцій  $l_r$  від їх оптимальних значень на змінні задачі  $z_r, r = 1, \dots, R$ . Для деякої ЗДЛПУН ініціалізуються значення  $l_r$ , а потім ці значення змінюються з певним кроком і для

кожного набору  $l_r, r = 1, \dots, R$  розв'язується ця задача. Нижче наведено приклад схеми експерименту типу 1.

Згенерувати індивідуальну ЗДЛПУН Р.

Встановити  $l_1 = 1, l_2 = 1, l_3 = 200, l_4 = 502, l_5 = 102$ .

for N:= 1 to 500

Розв'язати задачу Р з параметрами  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$

$$l_1 := l_1 + 0.00001$$

$$l_2 := l_2 + 0.000015$$

$$l_3 := l_3 + 0.00002$$

$$l_4 := l_4 - 0.002$$

$$l_5 := l_5 - 0.0015$$

На рис. 1 та 2 наведені результати експерименту. З них видно, що як у випадку максимізації так і у випадку мінімізації має місце чітка закономірність – при збільшенні величин  $l_r, r = 1, \dots, R$  величини  $z_r, r = 1, \dots, R$  зменшуються або залишаються сталими на певний інтервал і навпаки.

**Експеримент типу 2.** Мета – дослідження того, як впливає зміна величин експертних ваг часткових цільових функцій  $\omega_r$  на змінні задачі  $z_r$ . Для деякої ЗДЛПУН ініціалізуються значення  $\omega_r$ , а потім ці значення змінюються з певним кроком і для кожного набору  $\omega_r, r = 1, \dots, R$  розв'язується ця задача. Нище наведено приклад схеми експерименту типу 2.

Згенерувати індивідуальну ЗДЛПУН Р.

Встановити  $\omega_1 = 1, \omega_2 = 1, \omega_3 = 200, \omega_4 = 502, \omega_5 = 102$ .

for N:= 1 to 500

Розв'язати задачу Р з параметрами  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$

$$\omega_1 := \omega_1 + 0.00001$$

$$\omega_2 := \omega_2 + 0.000015$$

$$\omega_3 := \omega_3 + 0.00002$$

$$\omega_4 := \omega_4 - 0.002$$

$$\omega_5 := \omega_5 - 0.0015$$

На рис. 3 та 4 бачимо як для задачі на максимум так і на мінімум чітку закономірність – при збільшенні величин  $\omega_r, r = 1, \dots, R$  зменшуються або залишаються сталими на певний інтервал величини  $z_r, r = 1, \dots, R$  і навпаки. Також слід зазначити, що дані залежності мають ступінчасту форму. Це означає, що існує така комбінація значень параметрів  $\omega_r, r = 1, \dots, R$  при яких величини  $z_r, r = 1, \dots, R$  різко або зменшують або збільшують своє значення. В усіх інших варіантах існують інтервали при яких значення  $z_r, r = 1, \dots, R$  будуть залишатися сталими не дивлячись на зміну параметрів  $\omega_r, r = 1, \dots, R$ .

**Експеримент типу 3.** Мета – дослідження того, як впливає зміна величин встановлених допустимих відхилень значень часткових цільових функцій  $l_r$  на величини  $\Delta_r$ . Нище наведено приклад схеми експерименту типу 3.

Згенерувати індивідуальну ЗДЛПУН Р.

Встановити  $l_1 = 1, l_2 = 1, l_3 = 200, l_4 = 502, l_5 = 102$ .

for N:= 1 to 500

Розв'язати задачу Р з параметрами  $l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$

$$l_1 := l_1 + 0.00001$$

$$l_2 := l_2 + 0.000015$$

$$l_3 := l_3 + 0.00002$$

$$l_4 := l_4 - 0.002$$

$$l_5 := l_5 - 0.0015$$

На рис. 5 та 6 бачимо, що збільшення або зменшення величин  $l_r, r = 1, \dots, R$  не гарантують нам зменшення або збільшення  $\Delta_r, r = 1, \dots, R$  відповідно. Це зумовлене тим, що на величину  $\Delta_r, r = 1, \dots, R$  впливають не тільки параметри  $l_r, r = 1, \dots, R$ , а також і  $\omega_r, r = 1, \dots, R$  і якщо якийсь  $\omega_r, r = 1, \dots, R$  є достатньо малим в порівнянні з іншими, то не дивлячись на те, що ми встановимо мале значення  $l_r, r = 1, \dots, R$ , то все одно отримаємо достатньо велике  $\Delta_r, r = 1, \dots, R$ .

**Експеримент типу 4.** Мета – дослідження того, як впливає зміна величин встановлених допустимих відхилень значень часткових цільових функцій  $\omega_r$  на змінні задачі  $\Delta_r$ . Для деякої ЗДЛПУН ініціалізуються значення  $\omega_r$ , а потім ці значення змінюються з певним кроком і для кожного набору  $\omega_r, r = 1, \dots, R$  розв'язується ця задача. Нище наведено приклад схеми експерименту типу 4.

Згенерувати індивідуальну ЗДЛПУН Р.

Встановити  $\omega_1 = 0.00001, \omega_2 = 0.00001, \omega_3 = 0.00001, \omega_4 = 0.001, \omega_5 = 0.001$ .

for N:= 1 to 500

Розв'язати задачу Р з параметрами  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$

$$\omega_1 := \omega_1 + 0.00001$$

$$\omega_2 := \omega_2 + 0.000015$$

$$\omega_3 := \omega_3 + 0.00002$$

$$\omega_4 := \omega_4 - 0.002$$

$$\omega_5 := \omega_5 - 0.0015$$

На рис. 7 та 8 бачимо чітку закономірність – при збільшенні величин  $\omega_r, r = 1, \dots, R$  зменшуються або залишаються сталими на певний інтервал величини  $\Delta_r, r = 1, \dots, R$  і навпаки. Також слід зазначити, що дані залежності мають ступінчасту форму. Це означає, що існує така комбінація значень параметрів  $\omega_r, r = 1, \dots, R$  за яких величини  $\Delta_r, r = 1, \dots, R$  різко або зменшують або збільшують своє значення. В усіх інших варіантах існують інтервали за яких значення  $\Delta_r, r = 1, \dots, R$  будуть залишатися сталими не дивлячись на зміну параметрів  $\omega_r, r = 1, \dots, R$ .

**Висновки.** В роботі вперше розглянуто дві задачі дробово-лінійного програмування в умовах невизначеності та п'ять компромісних критеріїв оцінки їх розв'язків. Для задачі дробово-лінійного програмування, де невизначеність відноситься до чисельника детально розглянуто два з них:

1) знаходження компромісного розв'язку, у якого значення часткових функціоналів відхиляються від їх оптимальних значень в заданих межах;

2) знаходження компромісного розв'язку за критерієм мінімізації зваженої суми величин поступок.

Для знаходження компромісного розв'язку сформульована допоміжна задача лінійного програмування.

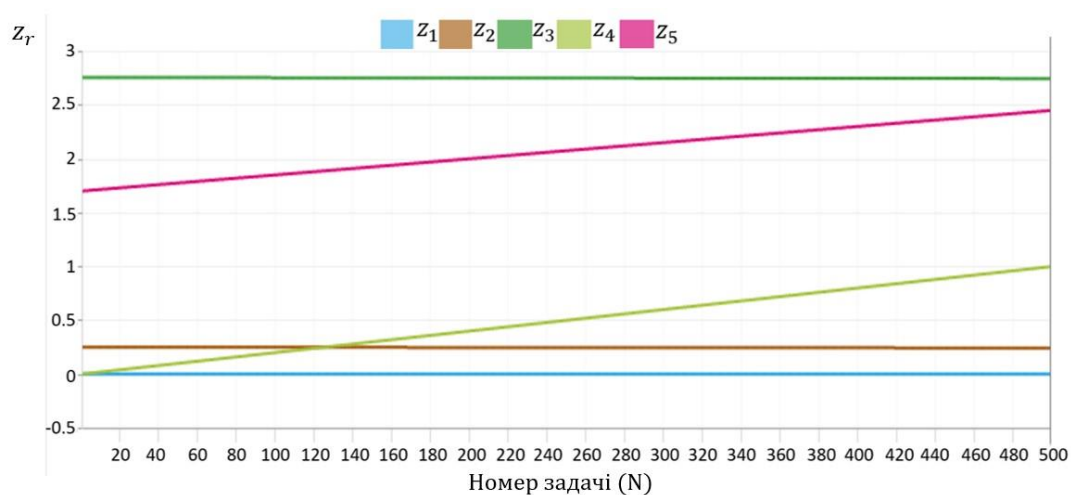


Рис. 1. Результати експерименту типу 1 для задачі на максимум

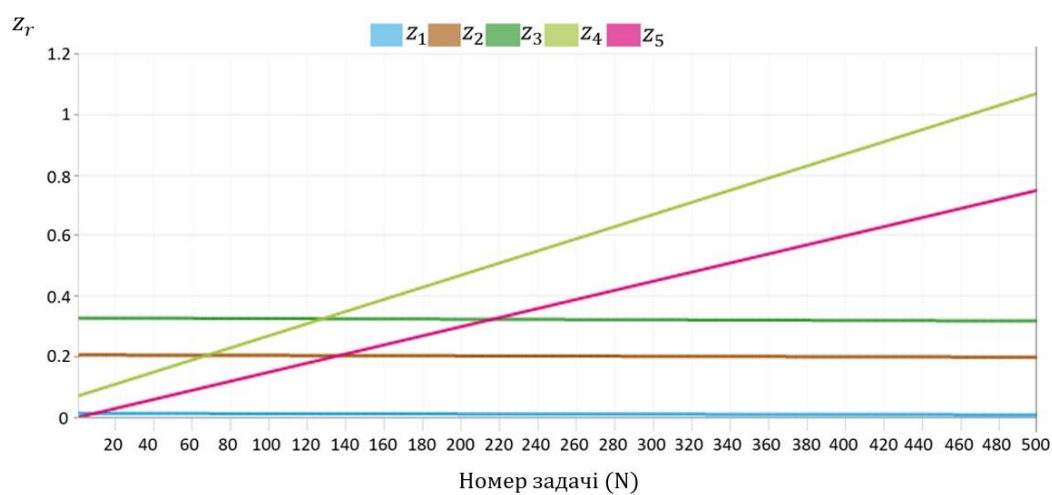


Рис. 2. Результати експерименту типу 1 для задачі на мінімум

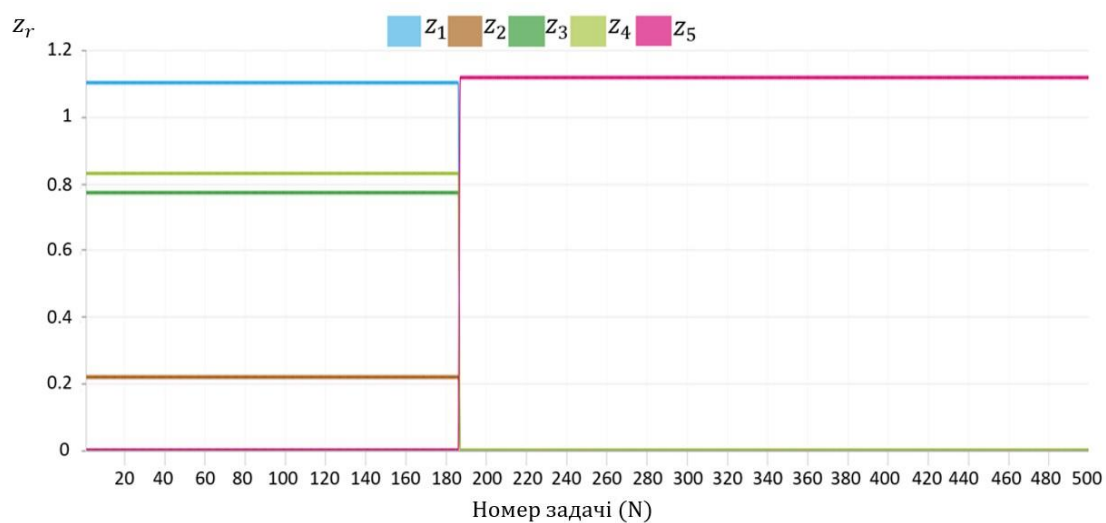


Рис. 3. Результати експерименту типу 2 для задачі на максимум

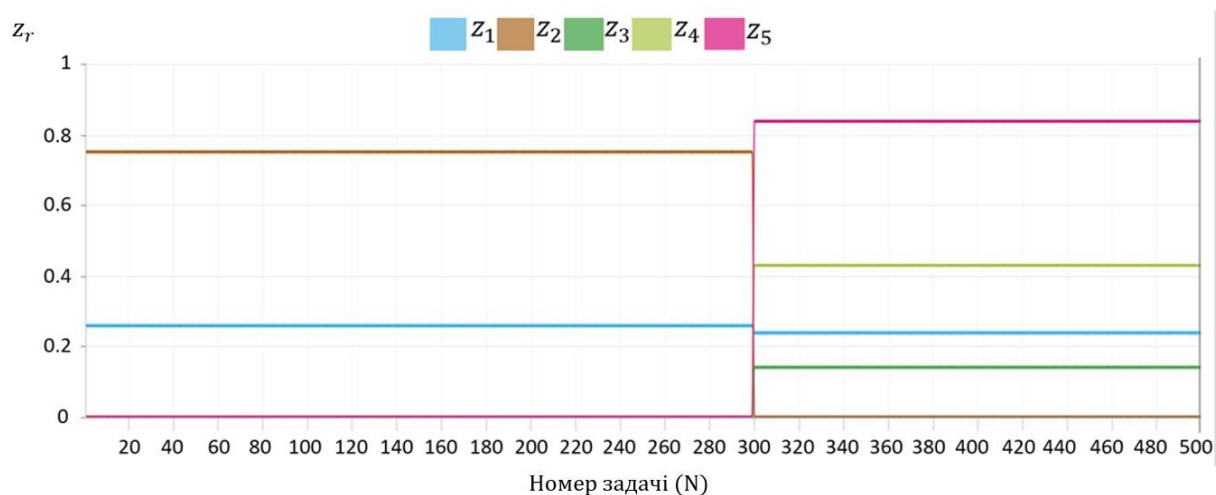


Рис. 4. Результати експерименту типу 2 для задачі на мінімум

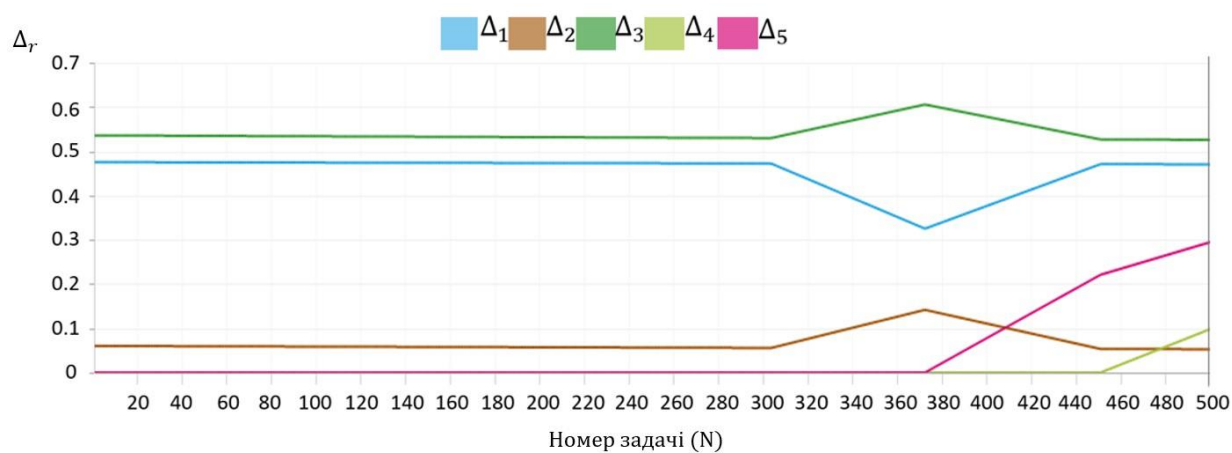


Рис. 5. Результати експерименту типу 3 для задачі на максимум

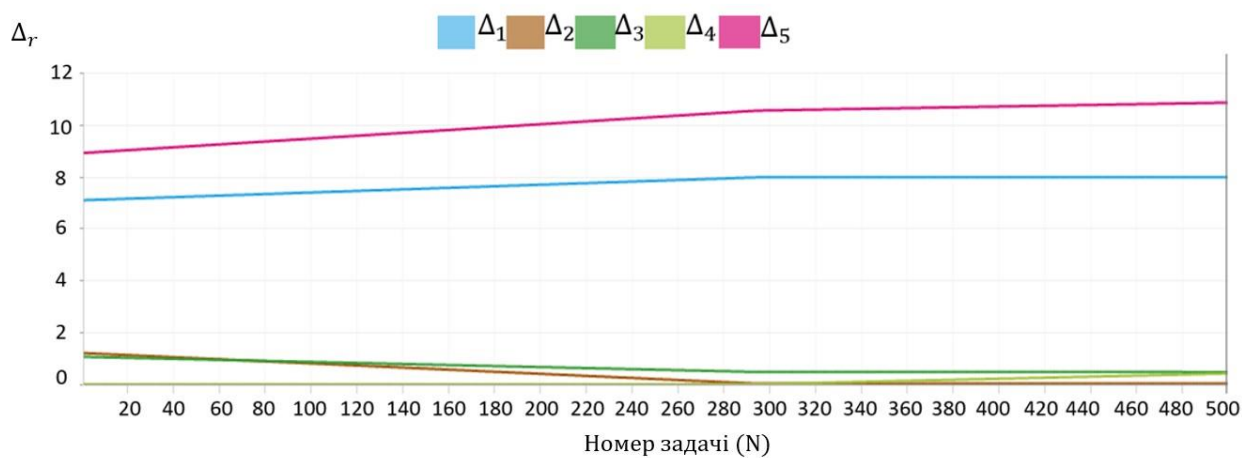


Рис. 6. Результати експерименту типу 3 для задачі на мінімум

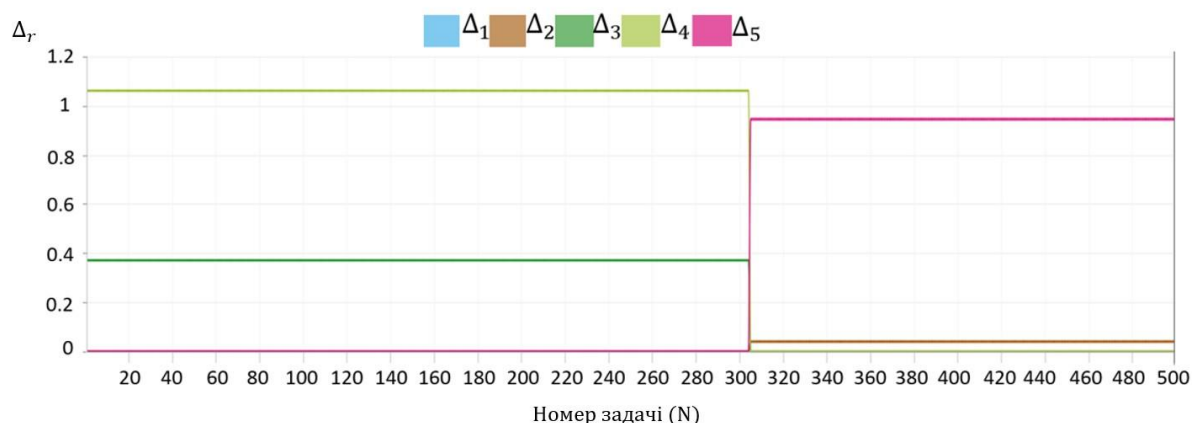


Рис. 7. Результати експерименту типу 4 для задачі на максимум

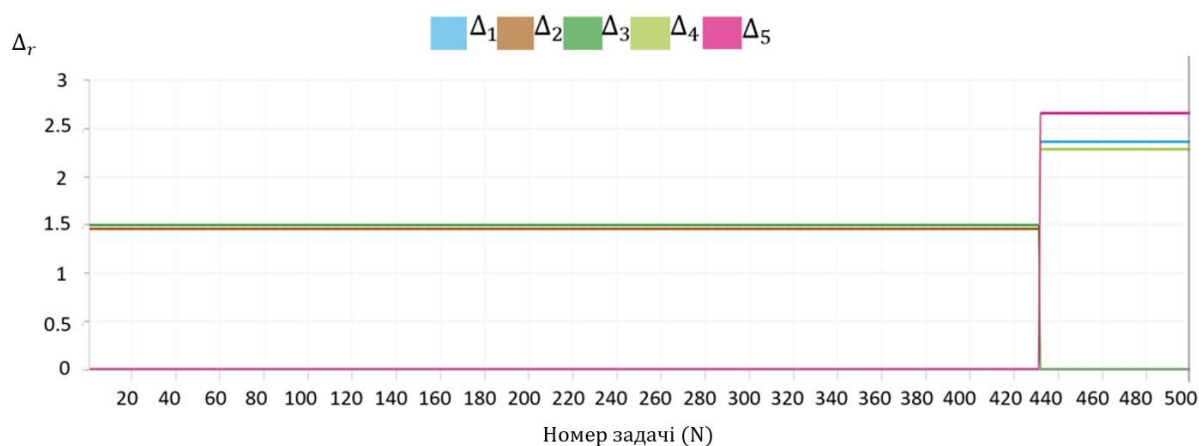


Рис. 8. Результати експерименту типу 4 для задачі на мінімум

Були проведені експерименти чотирьох типів, метою яких було дослідження впливу зміни величин встановлених допустимих відхилень часткових цільових функцій та експертних ваг на величини фактичних відхилень і на величини поступок. Аналіз результатів описаних експериментів показав, що отримані залежності відповідають теоретичному матеріалу. А саме підтверджено, що встановлені допустимі відхилення значень часткових цільових функцій та вагові коефіцієнти впливають на величину поступок. Також підтверджено, що вагові коефіцієнти впливають на значення різниці між значенням часткової цільової функції та оптимумом всієї задачі. Виявлено, що графіки описаних залежностей часто мають ступінчасту форму і це в свою чергу потребує більш детального дослідження. Також, є цікавим той факт, що для задач на пошук максимума і мінімуму як правило не співпадає кількість “сходинок” і інтервали за яких величини, що спостерігаються, мають одне і те ж саме значення.

#### Список літератури

1. Демидова Л. А., Кираковский В. В., Пылькин А. Н. *Принятие решений в условиях неопределенности*. Москва: Горячая линия – Телеком, 2015. 283 с.
2. Розенберг И. Н. Управление в условиях неопределенности. *Современные технологии управления*. 2017. № 7 (79).

3. Ehrgott M. *Multicriteria Optimization*. Berlin: Springer, 2005. 323 p.
4. Полтавский А. В., Семенов С. С., Крянев А. В., Маклаков В. В. Стохастическое доминирование в условиях рисковости разных степеней. *Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления*. Москва: ИПУ РАН, 2014. С. 8101–8124.
5. Броневиц Ф. Г., Каркищенко А. Н., Лепский А. Е. *Анализ неопределенности выделения информативных признаков и представленный изображений*. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 320 с.
6. Арефьева И. Ю. Анализ методов принятия решений при разработке сложных технических систем. *Вестник Санкт-петербургского университета Сер. 10*. 2009. Вып. 4 С. 25–32.
7. Саати Т. *Принятие решений. Метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.
8. Зайченко Ю. П. *Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах*. Киев: Слово, 2008. 344 с.
9. Pavlov A. A. Optimization for one class of combinatorial problems under uncertainty. *Адаптивні системи автоматичного управління*. 2019, № 34. С. 81–89.
10. Pavlov A. A. Models and algorithms of multipurpose linear programming. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 52, issue 11. P. 48–59.
11. Pavlov A. A., Zhdanova E. G. The Transportation Problem under Uncertainty. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 52, issue 4. P. 1–13.
12. Вагнер Г. *Основы исследования операций. Том 2*. Москва: Мир, 1973. 489 с.

#### References (transliterated)

1. Demidova L. A., Kirakovsky V. V., Pylykin A. N. *Prinyatiye resheniy v usloviyakh neopredelennosti* [Decision making under uncertainty]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2015. 283 p.

2. Rozenberg I. N. Upravleniye v usloviyakh neopredelennosti [Management in the face of uncertainty]. *Sovremennyye tekhnologii upravleniya* [Modern control technologies]. 2017. № 7 (79).
3. Ehrgott M. *Multicriteria Optimization*. Berlin: Springer, 2005. 323 p.
4. Poltavskiy A. V., Semenov S. S., Kryanev A. V., Maklakov V. V. Stokhasticheskoye dominirovaniye v usloviyakh riskovosti raznykh stepeney [Stochastic dominance in terms of riskiness of different degrees]. *Trudy XII Vserossiyskogo soveshchaniya po problemam upravleniya* [Proceedings of the XII All-Russian Meeting on Management Problems]. Moscow: IPU RAN Publ., 2014. P. 8101–8124.
5. Bronevich F. H., Karkischenko A. N., Lepsky A. E. *Analiz neopredelennosti videleniya informativnykh priznakov i predstavleniy izobrazheniy* [Uncertainty analysis of the vision of informative features and representations of images]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2013. 320 p.
6. Arefieva I. Y. Analiz metodov prinyatiya resheniy pri razrabotke slozhnykh tekhnicheskikh system [Analysis of decision-making methods in the development of complex technical systems]. *Vestnik Sankt-peterburgskogo universiteta Ser* [Saint Petersburg University Bulletin Ser. 10]. 2009. Ed. 4 P. 25–32.
7. Saati T. *Prinyatiye resheniy. Metod analiza iyerarkhiy* [Making decisions. Hierarchy analysis method]. Moscow: Radio and communication Publ., 1993. 278 p.
8. Zaichenko Y. P. *Nechetkiye modeli i metody v intellektual'nykh sistemakh* [Fuzzy models and methods in intelligent systems]. Kyiv: Slovo Publ., 2008. 344 p.
9. Pavlov A. A. Optimization for one class of combinatorial problems under uncertainty. *Adaptyvni systemy avtomatichnoho upravlinnya* [Adaptive automatic control systems]. 2019, № 34. P. 81–89.
10. Pavlov A. A. Models and algorithms of multipurpose linear programming. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 52. Iss. 11. P. 48–59.
11. Pavlov A. A., Zhdanova E. G. The Transportation Problem under Uncertainty. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. Vol. 52, issue 4, pp. 1–13.
12. Wagner H. *Osnovy issledovaniya operatsiy* [Operations research fundamentals]. Moscow: Mir Publ., 1973, vol. 2. 489 p.

*Надійшла (received) 22.04.2021*

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

**Павлов Олександр Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», завідувач кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>; e-mail: alexanderpavlov1944@gmail.com.

**Вознюк Олександра Віталіївна** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студентка кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1422-027X>; e-mail: 16alexandra09@gmail.com.

**Жданова Олена Григорівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-846X>; e-mail: Zhdanova.Elena@hotmail.com.

**Павлов Александр Анатольевич** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», заведующий кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; г. Киев, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>; e-mail: alexanderpavlov1944@gmail.com.

**Вознюк Александра Витальевна** – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», студентка кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; г. Киев, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1422-027X>; e-mail: 16alexandra09@gmail.com.

**Жданова Елена Григорьевна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», доцент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления; г. Киев, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-846X>; e-mail: Zhdanova.Elena@hotmail.com.

**Pavlov Oleksandr Anatoliyovych** – doctor of technical sciences, professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Head of the Department of Computer-Aided Management and Data Processing Systems; Kyiv city, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6524-6410>; e-mail: alexanderpavlov1944@gmail.com.

**Vozniuk Oleksandra Vitaliyivna** – National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», student of the Department of Computer-Aided Management and Data Processing Systems; Kyiv city, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1422-027X>; e-mail: 16alexandra09@gmail.com.

**Zhdanova Olena Grygorivna** – PhD, Associate Professor, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Associate Professor of the Department of Computer-Aided Management and Data Processing Systems; Kyiv city, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8787-846X>; e-mail: Zhdanova.Elena@hotmail.com.

# УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 629.3.017.5

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.01.05

*Е. Е. АЛЕКСАНДРОВ, Т. Е. АЛЕКСАНДРОВА, А. Л. ГРИГОРЬЕВ, Я. Ю. МОРГУН*

#### О ВЛИЯНИИ КОЛЕБАНИЙ ТРАНСПОРТИРУЕМОЙ ЖИДКОСТИ НА ОБЛАСТЬ УСТОЙЧИВОСТИ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КУРСОМ АВТОМОБИЛЯ

Рассмотрены существующие работы по оптимизации автомобильных систем курсовой устойчивости. Составлена математическая модель, которая описывает возмущенное движение автомобиля с цистерной. Данная математическая модель позволяет учесть колебания свободной поверхности жидкости и определить их влияние на курсовую устойчивость автомобиля при равномерном движении и во время резкого торможения. Описаны характеристики автомобиля-топливозаправщика, который использовался для проведения расчетов. Разработан алгоритм вывода характеристического уравнения для сложной системы дифференциальных уравнений, описывающей динамические изменения параметров движения автомобиля с цистерной, колебания парциальных слоев жидкости в цистерне, работу электромагнитного привода управляющего клапана и электронного ПИД-регулятора для двухконтурной системы обеспечения курсовой устойчивости. На основе разработанной математической модели исследуется влияние вынужденных колебаний жидкости на область устойчивости системы в плоскости варьируемых параметров регулятора. Показано, что низкочастотные колебания свободной поверхности жидкости приводят к значительному сокращению области устойчивости, что свидетельствует о необходимости учета таких колебаний при решении задач анализа и синтеза этой системы. Установлено, что для автомобиля с цистерной, где происходят низкочастотные поперечные колебания жидкости, которые сопровождаются перераспределением массы, что возмущает движение, увеличение курсовой скорости однозначно приводит к снижению курсовой устойчивости. Это позволило исключить эту скорость из числа варьируемых параметров и существенно упростить решаемую задачу. Проведены расчеты для разных уровней загрузки цистерны. Установлено, что уровень жидкости в цистерне, с учетом его связи со скоростью движения, оказывает неоднозначное влияние на курсовую устойчивость автомобиля, и ограничивать исследования расчетами для случая 50 % нагрузки недопустимо. Вместо этого упрощения необходимо находить линию, которая огибает сверху те границы устойчивости, которые соответствуют многим уровням жидкости.

**Ключевые слова:** колебания жидкости; курсовая устойчивость; область устойчивости; цистерна; ПИД-регулятор; параметры.

*Є. Є. АЛЕКСАНДРОВ, Т. Є. АЛЕКСАНДРОВА, О. Л. ГРИГОР'ЄВ, Я. Ю. МОРГУН*

#### ПРО ВПЛИВ КОЛИВАНЬ ТРАНСПОРТУЄМОЇ РІДИНИ НА ОБЛАСТЬ СТІЙКОСТІ ЗАМКНЕНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ КУРСОМ АВТОМОБІЛЯ

Розглянуто існуючі роботи для оптимізації автомобільних систем курсової стійкості. Складено математичну модель, яка описує збурений рух автомобіля з цистерною. Дана математична модель дозволяє врахувати коливання вільної поверхні рідини та визначити їх вплив на курсову стійкість автомобіля під час рівномірного руху та різкого гальмування. Описані характеристики автомобіля-паливозаправника, що використовувався для проведення розрахунків. Розроблено алгоритм побудови характеристичного рівняння для складної системи диференціальних рівнянь, що описує динамічні зміни параметрів руху автомобіля з цистерною, коливання парціальних прошарків рідини у цистерні та роботу електромагнітного приводу керуючого клапана і електронного ПИД-регулятора для двоконтурної системи забезпечення курсової стійкості. На основі розробленої математичної моделі досліджується вплив вимушених коливань рідини на область стійкості системи в площині варіюваних параметрів регулятора. Показано, що низькочастотні коливання вільної поверхні рідини призводять до значного скорочення області стійкості замкненої системи, що свідчить про необхідність врахування таких коливань при вирішенні задач аналізу і синтезу цієї системи. Встановлено, що для автомобіля з цистерною, де відбуваються низькочастотні поперечні коливання рідини, які супроводжуються перерозподілом маси, що збурює рух, збільшення курсової швидкості однозначно призводить до погіршення курсової стійкості. Це дозволило виключити цю швидкість із числа варіюваних параметрів і суттєво спростити вирішувану задачу. Проведені розрахунки для різних рівнів завантаженості цистерни. З'ясовано, що рівень рідини в цистерні, з урахуванням його зв'язку зі швидкістю руху, оказує неоднозначний вплив на курсову стійкість автомобіля, і обмежувати дослідження розрахунками для випадку 50 % навантаження неприпустимо. Замість цього спрощення треба знаходити лінію, яка огинає зверху ті межі, що відповідають багатьом рівням рідини.

**Ключові слова:** коливання рідини; курсова стійкість; область стійкості; цистерна; ПИД-регулятор; параметри.

*Y. Y. ALEKSANDROV, T. Y. ALEKSANDROVA, A. L. GRIGORIEV, Y. Y. MORHUN*

#### ABOUT THE INFLUENCE OF VIBRATIONS OF THE CONVEYED LIQUID ON THE AREA OF STABILITY OF A CLOSED SYSTEM AUTOMATIC VEHICLE COURSE CONTROL

The existing publications that investigate vehicle course stability optimization were analyzed. A mathematical model, which describes the disturbed movement of a car with a tank, was compiled. This model allows to consider the liquid free surface oscillations and determine their effect on the car course stability during constant motion or emergency braking. There was described the main information regarding the car that was used to perform

© Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, А. Л. Григорьев, Я. Ю. Моргун, 2021

mathematical calculations. An algorithm was developed for deriving the characteristic equation for a complex system of differential equations describing dynamic changes in the movement parameters of a car, oscillations of partial layers of liquid in a tank and the operation of an electromagnetic drive of the control valve and an electronic PID controller for a two-circuit system for ensuring course stability. Based on the developed mathematical model, the influence of forced oscillations of the fluid on the stability area of the system built in the plane of variable parameters of the controller is investigated. It is shown that low-frequency oscillations of the free surface of a liquid lead to a significant reduction in the stability area, which indicates the need to consider such oscillations when solving problems of analysis and synthesis of this system. It was found that for a car with a tank, where low-frequency transverse oscillations of the liquid occur, which are accompanied by a redistribution of mass and disturb the movement, an increase of the speed unambiguously leads to a deterioration in directional stability. That enables exclusion of speed from the number of variable parameters and significantly simplify the problem being solved. The calculations for cases with different loading levels were performed. It was found out that the level of liquid in the tank, considering its relationship with the speed, has an ambiguous effect on the car course stability, and it is unacceptable to limit the research calculations to the case with 50 % load. Instead of this, it is necessary to find a line that bends from above the stability boundaries that correspond to many liquid levels.

**Key words:** fluid vibrations; exchange rate stability system; area of stability; tank; PID-controller; parameters.

**Введение.** Обеспечение высоких показателей безопасности движения – одно из основных заданий современного машиностроения. Состояние дорог Украины влечет за собой повышенный уровень аварийности, сравнительно со странами ЕС и США. Режим экстренного торможения при возникновении непредвиденных препятствий может привести к потере сцепления колес с дорогой и отклонению автомобиля от заданной траектории движения.

Поэтому на современных машинах широко распространены системы автоматического управления тормозами, которые содержат две или три параллельно работающие подсистемы:

антиблокировочную систему ABS – препятствует блокировке колес при нажатии на педаль тормоза;

антипробуксовочную систему TRC, которая предотвращает букс ведущих колес при резком нажатии на педаль акселератора;

и систему курсовой устойчивости VSC, которая выполняет стабилизацию заданной траектории движения автомобиля.

Системы курсовой устойчивости VSC могут быть одно- и двухконтурными. В одноконтурных системах выполняется стабилизация направления движения автомобиля, а в двухконтурной системе также минимизируется боковой сдвиг центра масс автомобиля.

Опыт управления автомобилями, оснащенными горизонтальными емкостями для транспортировки жидкостей (цистернами), показывает, что такие автомобили наиболее подвержены потере устойчивости в процессе экстренного торможения, что приводит к тяжелым авариям с выделением в окружающую среду жидких топливных материалов и агрессивных веществ. Целью предлагаемой работы является исследование влияния возмущенных колебаний транспортируемой жидкости на область устойчивости замкнутой системы курсовой устойчивости автомобиля и рекомендации по выбору допустимых значений варьируемых параметров регулятора этой системы, которые необходимо учитывать на этапе оптимизации.

**Анализ последних публикаций.** С начала XXI века наблюдается широкое распространение систем курсовой устойчивости автомобиля корпорациями США, Японии, Южной Кореи и стран ЕС. Параллельно практическим разработкам, проводятся научные исследования таких систем, с целью их усовершенствования [1–3], международные научно-технические конференции [4–8], где обсуждаются результаты последних исследований о разработках электронных систем

распределения тормозных усилий EBD (Electronic Brake Distribution). В работе [9] описана методика вычисления оптимальных значений варьируемых параметров регулятора, которые обеспечивают максимальные запас устойчивости и быстродействие замкнутой системы курсовой устойчивости автомобиля. В работе [10] применен алгоритмический метод параметрического синтеза регулятора системы курсовой устойчивости, обеспечивающий максимальную точность замкнутой системы, а в работе [11], рассматривается задача параметрического синтеза цифрового регулятора системы курсовой устойчивости автомобиля. Статьи [12, 13] посвящены количественной оценке влияния колебаний транспортируемой жидкости на движение машинотракторного агрегата и автомобиля с цистерной. В работах [14, 15] рассматриваются проблемы уменьшения влияния колебаний жидкости, которая транспортируется, на курсовую устойчивость автомобиля-топливозаправщика за счет рационального выбора конструкции цистерны. Однако вопросам влияния возмущенных колебаний жидкости на область устойчивости движения внимание не уделялось.

**Математическая модель возмущенного движения автомобиля с цистерной.** Согласно работам [12, 13], математическая модель возмущенного движения замкнутой двухконтурной системы курсовой устойчивости автомобиля в процессе торможения с учетом поперечных и крутящих колебаний жидкости в цистерне, а также бокового смещения шин и поворота корпуса в поперечной плоскости, может быть описана так:

$$J_z \ddot{\psi} = -0.5 B k_{\Gamma} \Delta p - f_c (Z_{\Gamma} B \varphi + f_{\Gamma} \dot{\varphi}) - \xi M_{\text{ж}}^{(1)} - \xi M_{\text{ж}}^{(2)}; \quad (1)$$

$$\ddot{\psi}_l + \varepsilon_l \dot{\psi}_l + \omega_l^2 \psi_l = -\ddot{\psi}, \quad (l \in \overline{1,3}); \quad (2)$$

$$\dot{y} = -V \psi; \quad (3)$$

$$\ddot{y}_l + \varepsilon_l \dot{y}_l + \omega_l^2 y_l = V \dot{\psi} - \Delta L \ddot{\psi} - \ddot{\delta} - h_l^* \varphi, \quad (l \in \overline{1,3}); \quad (4)$$

$$M \ddot{\delta} + f_{\delta} \dot{\delta} + Z_{\delta} \delta = M g \varphi + M V \dot{\psi} + F_{\text{ж}}, \quad (5)$$

$$J_x^* \ddot{\varphi} + f_{\Gamma} \dot{\varphi} + Z_{\Gamma} B \varphi = M g h_{\text{цм}} \varphi + h_{\text{цм}} M V \dot{\psi} - M_{\text{ж}}^{(3)} + M_{\text{ж}}^{(4)}; \quad (6)$$

$$J_x^* = J_x + h_{\text{цм}}^2 M;$$

$$J_k \Delta \ddot{p} + f_k \Delta \dot{p} + c_k \Delta p = k_n R_{06} I; \quad (7)$$

$$\Lambda_{06} \dot{I} + R_{06} I = U; \quad (8)$$

$$U = K_\psi \psi + K_\omega \dot{\psi} - K_y y; \quad (9)$$

где  $B$  – ширина колеи;

$k_\Gamma, k_n$  – коэффициенты пропорциональности;

$\Delta p$  – разница давлений тормозной жидкости в магистралях правого и левого бортов автомобиля;

$f_c$  – приведенное значение коэффициента сопротивления качению всех колес автомобиля;

$Z_\Gamma$  – суммарный коэффициент радиальной жесткости шин одного борта;

$\varphi, \delta$  – угол наклона и боковое смещение автомобиля в следствии упругости шин;

$f_r, f_\delta$  – коэффициенты диссипации энергии при радиальных и боковых деформациях шин;

$M, J_z, J_x$  – масса и моменты инерции загруженного автомобиля относительно его собственных вертикальной и горизонтальной осей;

$\psi$  – угловое отклонение собственной продольной оси автомобиля относительно заданной траектории;

$y$  – боковое отклонение центра масс от заданной траектории движения в режиме торможения;

$\Delta L$  – расстояние между центром масс автомобиля и вертикальной осью цистерны (рис. 1);

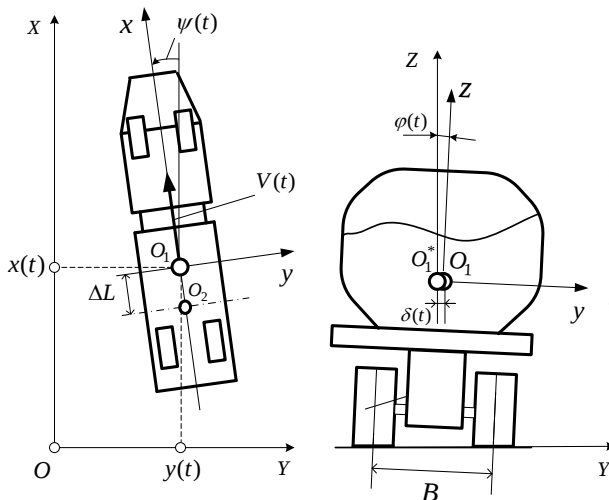


Рис. 1. Системы координат:  $OXY$  – инерциальная;  $O_1xy$  – связанная с центром масс автомобиля;  $O_2$  – центр цистерны;  $O_1^*$  – положение центра масс при условии отсутствия бокового смещения шин

$Z_\delta$  – суммарный коэффициент боковой жесткости всех шин автомобиля;

$V$  – курсовая скорость движения центра масс;

$t$  – время;

$h_{цм}$  – подъем центра масс  $O_1$  относительно лесной оси;

$K_\psi, K_\omega, K_y$  – коэффициенты принятого ПИД-закона регулирования, которые принимают положительные значения (при отсутствии регулирования равны нулю);

$U(t), I(t)$  – напряжение и электрический ток в цепи управления, которые вырабатываются системой курсовой устойчивости автомобиля;

$\Lambda_{06}, R_{06}$  – индуктивность катушки и электрическое сопротивление цепи;

$J_k$  – момент инерции коромысла электромагнита (ЭМ) в электромагнитном усилителе (ЭМУ);

$f_k$  – коэффициент вязкого трения в оси коромысла;

$c_k$  – коэффициент жесткости пружины, которая фиксирует коромысло в нейтральном положении;

$F_{ж}$  – вес жидкости в цистерне с учетом поперечных смещений:

$$F_{ж} = \sum_{l=1}^3 m_l \ddot{y}_l;$$

$M_{ж}$  – масса жидкости в цистерне:

$$M_{ж} = \rho abh;$$

$$M_{ж}^{(1)} = \Delta L \sum_{l=1}^3 m_l \ddot{y}_l;$$

$$M_{ж}^{(2)} = \sum_{l=1}^3 J_l \ddot{\psi}_l;$$

$$M_{ж}^{(3)} = \sum_{l=1}^3 m_l \ddot{y}_l (H_n + h_l); \quad (10)$$

$$M_{ж}^{(4)} = \sum_{l=1}^3 g m_l y_l \quad (11)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;

$a, b$  – длина и ширина цистерны;

$y_l(t), \psi_l(t)$  – поперечное и угловое смещение центров масс парциальных осцилляторов (относительно вертикальной оси цистерны);

$m_l, J_l$  – их массы и моменты инерции:

$$m_l = M_{ж} \frac{2 \operatorname{th}(\lambda_l h)}{\pi^2 \lambda_l h (l - 0.5)^2};$$

$$J_l = m_l c_*^2, (l \in \overline{1,3});$$

$g$  – ускорение свободного падения;

$h$  – уровень жидкости в цистерне;

$\lambda_l, \omega_l, \varepsilon_l$  – волновые числа, собственные частоты и коэффициенты диссипации осцилляторов, которые определяются формулами:

$$\lambda_l = \frac{\pi(2l - 1)}{b}, \quad (12)$$

$$\omega_l = \sqrt{g \lambda_l \operatorname{th}(\lambda_l h)}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_l = \omega_l^y \frac{\Delta f}{\pi}, \quad (14)$$

где  $\Delta f$  – логарифмический декремент затухания колебаний жидкости;

$c$  – расстояние между вертикальной осью цистерны и центром ее крутящей массы,

$$c^2 = \frac{a^2 + ab + 2b^2}{12};$$

$$c_*^2 = \frac{a-b}{b} c^2;$$

$\xi$  – эффективный коэффициент передачи усилия

$$\xi = \frac{1}{1 + \frac{4}{B^2} \sum_{j=1}^3 A_j^2 \times \frac{n_j}{\sum_{j=1}^3 n_j}} - f_c,$$

где  $A_j, n_j, j \in \overline{1,3}$  – длина от центра масс  $O_1$  к мостам автомобиля и соответствующие количества шин.

В формулах (10) и (11) величины  $H_n, h_l$  – это расстояния от колесной оси к дну цистерны и от дна цистерны к центру масс  $l$ -й частичной прослойки,

$$h_l = h - \frac{\text{th}\left(\frac{\lambda_l h}{2}\right)}{\lambda_l};$$

$$h_l^* = h_l - h_{\text{цм}}.$$

Заметим, что в случае, когда односекционная цистерна имеет внутренние негерметичные перегородки, уменьшающие колебания жидкости, то формулы (10–14) требуют корректировки:

$$M_{\text{ж}}^{(4)} = \frac{1}{1 + n_y} \sum_{l=1}^3 g m_l y_l;$$

$$\lambda_l = (1 + n_y) \frac{(2l-1)\pi}{b},$$

где  $n_y$  – количество продольных перегородок.

Особенно подчеркнем обстоятельство, что описанная математическая модель не является замкнутой, так как у нее отсутствуют уравнения, описывающие изменение курсовой скорости  $V(t)$ . После учета влияния продольных колебаний жидкости эти уравнения будут такими:

$$M\dot{V} = -2k_{\Gamma} p_0 - F_{\text{ж}}^x - f_c M g; \quad (15)$$

$$\ddot{x}_k + \varepsilon_k^x \dot{x}_k + (\omega_k^x)^2 x_k = -\dot{V}(k \in \overline{1,3}); \quad (16)$$

$$F_{\text{ж}}^x = \sum_{l=1}^3 m_k \ddot{x}_k;$$

$$\lambda_k^x = \frac{\pi(2k-1)}{a};$$

$$\omega_k^x = \sqrt{g \lambda_k^x \text{th}(\lambda_k^x h)};$$

$$\varepsilon_k^x = \omega_k^x \frac{\Delta f}{\pi};$$

$$m_k^x = M_{\text{ж}} \frac{2 \text{th}(\lambda_k^x h)}{\pi^2 \lambda_k^x h (k-0.5)^2}, (k \in \overline{1,3});$$

где  $k_{\Gamma}, p_0$  – площадь тормозных поршней и давление в тормозах.

На рис. 2 показан результат интегрирования уравнений (15), (16) для моделирования экстренного торможения. Параметры автомобиля и цистерны (рис. 3) приведены в табл. 1. Скорость падает монотонно, но ускорения имеют существенные колебания.

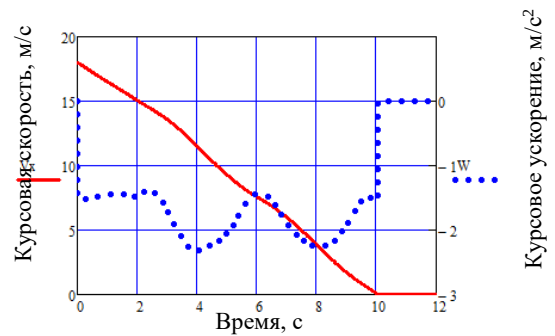


Рис. 2. Параметры торможения топливозаправщика КраЗ-63221 с цистерной АПЦ-20



Рис. 3. Топливозаправщик КраЗ-63221 с цистерной АПЦ-20

Таблица 1 – Основные технические и некоторые динамические параметры топливозаправщика КраЗ-63221

| Параметр                                                                            | Величина                              |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Сухая масса, кг                                                                     | 10700                                 |
| Максимальный вес груза, кг                                                          | 18000                                 |
| Размеры цистерны $a \times b \times H$ , м                                          | $6 \times 2.4 \times 1.4$             |
| Ширина колеи, м                                                                     | 2                                     |
| Максимальная скорости при перевозке $10 \text{ м}^3$ топлива, м/с                   | 18                                    |
| Моменты инерции при загрузке на 50 %:<br>$J_z, \text{кгм}^2$<br>$J_x, \text{кгм}^2$ | $1.48 \times 10^5$<br>$3 \times 10^4$ |
| Радиальная жесткость шины, Н/м                                                      | $10^6$                                |
| Боковая жесткость шины, Н/м                                                         | $2.5 \times 10^5$                     |
| Коэффициент сопротивления качению колес $f_c$                                       | 0.09                                  |
| Частота колебаний наклона, Гц                                                       | 2...5                                 |
| Коэффициент диссипации для колебаний наклона $f_{\Gamma}, \text{Нмс}$               | $1 \cdot 10^5$                        |
| Частота колебаний смещения, Гц                                                      | 1.5...2.2                             |
| Коэффициент диссипации для колебаний смещения $f_{\delta}, \text{Нс}$               | $5 \times 10^3$                       |
| Собственные частоты частичных осцилляторов, Гц                                      | рис. 4                                |
| Относительные массы частичных осцилляторов                                          | рис. 5                                |
| Логарифмический декремент затухания колебаний частичных осцилляторов, $\Delta f$    | 0.05                                  |

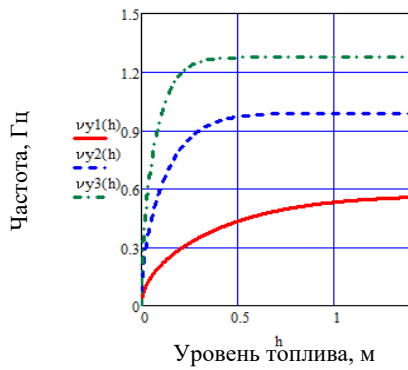


Рис. 4. Зависимость собственных частот первых трех осцилляторов от уровня жидкости в цистерне

Однако в случае использования этих уравнений, модель возмущенного движения становится нелинейной (вследствии связи (3)), что существенно усложняет исследование ее асимптотической устойчивости. Поэтому переменную скорости  $V(t)$  в дальнейшем будем считать постоянным параметром  $V$ , который в конкретном расчёте «замораживается», но его значения варьируются в заданных пределах [16]. Несколько упрощая реальные зависимости, верхнюю границу скорости автомобиля будем определять, при условии наличия нагрузки цистерны, по формуле:

$$V_0(h) = V_0^* \frac{M(h_*)}{M(h)},$$

где  $V_0^*$  – максимальная скорость при уровне жидкости  $h_*$ , для которого она известна (табл. 1).

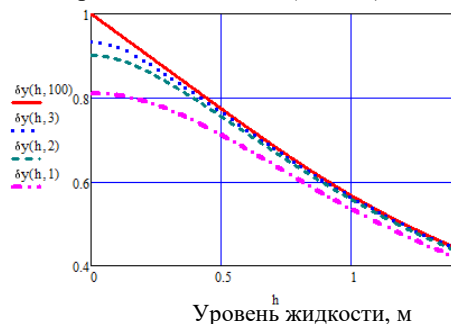


Рис. 5. Зависимость относительной массы жидкости, которая двигается в одной, двух и трёх первых парциальных прослойках, от уровня жидкости в цистерне

Заметим, что от уровня жидкости  $h$  зависят координаты центра масс и другие величины (см. рис. 4, 5), которые по-разному влияют на колебания и выполнение условия курсовой устойчивости. Поэтому исследование асимптотической устойчивости движения мы вынуждены проводить при разных уровнях загрузки цистерны.

**Построение характеристического уравнения математической модели.** Ввиду линейности и однородности математической модели, применим к ее уравнениям метод комплексных амплитуд, когда каждая переменная величина  $f(t)$  подается в виде:

$$f(t) = f_* \exp(pt),$$

где  $p$  – комплексное число,  $p = d\omega + i\omega$ ;

$\omega$  – действительная частота колебаний;

$d$  – действительный декремент затухания (или

увеличения) амплитуды колебаний;

$$i = \sqrt{-1};$$

$f_*$  – начальная амплитуда колебаний, «звездочка» в обозначении будем пренебрегать.

Понятно, что  $p$  – характеристическое число системы дифференциальных уравнений (1–9), и, ввиду общего порядка системы, таких чисел, при каждом наборе параметров  $h$  и  $V$ , насчитывается более 20.

Начнем с уравнения (3), которое принимает вид:

$$y = -V\psi/p \quad (17)$$

Как результат, уравнения (7–9) приводят к:

$$(J_k p^2 + f_k p + c_k) \Delta p = k_n (1 + \tau_{об} p) \left( K_\psi + K_\omega p + \frac{K_y V}{p} \right) \psi, \quad (18)$$

где  $\tau_{об}$  – постоянная времени ЭМ,  $\tau_{об} = \frac{\Lambda_{об}}{R_{об}}$ .

Значения констант ЭМУ приведены в табл. 2.

Как видим, в отличие от классического ПИД-закона интегральное звено при разных курсовых скоростях имеет разные коэффициенты, и это обстоятельство, безусловно, повлияет на результаты управления режимом экстренного торможения.

Выполним аналогичные преобразования для дифференциальных уравнений (2) и (4),

$$\varphi_l = \frac{-p^2 \psi}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2}, \quad (l = \overline{1,3}); \quad (19)$$

$$y_l = \frac{(Vp - \Delta L p^2) \psi - p^2 \delta - h_l^* \varphi}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2}, \quad (l = \overline{1,3}), \quad (20)$$

и, с учетом этих формул, для уравнений (5), (6):

$$\begin{aligned} (M p^2 + f_\delta p + Z_\delta) \delta &= M g \varphi + M V \psi p + \\ &+ \sum_{l=1}^3 m_l p^2 \frac{(Vp - \Delta L p^2) \psi - p^2 \delta - h_l^* \varphi}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2}; \\ (J_x^* p^2 + f_x p + Z_x B) \varphi &= M g h_{цм} \varphi + \\ &+ h_{цм} M V \psi p + \sum_{l=1}^3 m_l [g - (H_{п} + h_l) p^2] \times \\ &\times \frac{(Vp - \Delta L p^2) \psi - p^2 \delta - h_l^* \varphi}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2}. \end{aligned}$$

Запишем эти зависимости в виде системы двух линейных уравнений

$$\begin{cases} a_{1,1}(p) \delta + a_{1,2}(p) \varphi = b_1(p) \psi; \\ a_{2,1}(p) \delta + a_{2,2}(p) \varphi = b_2(p) \psi, \end{cases} \quad (21)$$

$$a_{1,1} = M p^2 + f_\delta p + Z_\delta + F_\varphi p^4;$$

$$a_{1,2} = -M g + p^2 M_\varphi;$$

$$a_{2,1} = F_\psi p^2;$$

$$a_{2,2} = J_x^* p^2 + f_x p + Z_x B - M g h_{цм} + M_\psi;$$

$$b_1 = M V + (V - \Delta L p) p^3 F_\varphi;$$

$$b_2 = h_{цм} M V p + p(V - \Delta L p) F_\psi;$$

$$F_{\psi}(p) = \sum_{l=1}^3 m_l \frac{g - (H_{\Pi} + h_l)p^2}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2};$$

$$F_{\phi}(p) = \sum_{l=1}^3 \frac{m_l}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2};$$

$$M_{\psi} = \sum_{l=1}^3 m_l h_l^* \frac{g - (H_{\Pi} + h_l)p^2}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2};$$

$$M_{\phi} = \sum_{l=1}^3 \frac{m_l h_l^*}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2}.$$

Систему (21) решим методом определителей:

$$\delta = \frac{\begin{vmatrix} b_1 & a_{1,2} \\ b_2 & a_{2,2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{vmatrix}} = \Delta(p)\psi; \quad (22)$$

$$\phi = \frac{\begin{vmatrix} a_{1,1} & b_1 \\ a_{2,1} & b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} \\ a_{2,1} & a_{2,2} \end{vmatrix}} = \Phi(p)\psi. \quad (23)$$

Выполним аналогичное преобразование для (1)

$$J_z p^2 \psi = -0.5 B k_{\Gamma} \Delta p - f_c (Z_r B + f_r p) \phi + \xi \sum_{l=1}^3 \frac{J_l p^2 \psi - m_l p^2 \Delta L [p(V - \Delta L p) \psi - p^2 \delta - h_l^* \phi]}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2},$$

и используем формулы (22) и (23):

$$J_z p^2 \psi = -0.5 B k_{\Gamma} \Delta p - f_c (Z_r B + f_r p) \Phi \psi + \xi p^2 \sum_{l=1}^3 m_l \frac{c_*^2 p^2 - \Delta L (V p - \Delta L p^2 - p^2 \Delta - h_l^* \Phi)}{p^2 + \varepsilon_l p + \omega_l^2} \psi,$$

откуда получим:

$$C(p)\psi = -0.5 B k_{\Gamma} \Delta p$$

$$C(p) = J_z p^2 + (f_c (Z_r B + f_r p) + \xi p^2 M_{\phi}(p)) \Phi(p) - \xi p^3 [c_*^2 p - \Delta L (V - \Delta L p - p \Delta(p))] F_{\phi}(p). \quad (24)$$

Заметим, что при условии высокой жесткости шины (как это бывает на высоконагруженных грузовиках, табл. 1) функция  $C(p)$  упрощается к виду:

$$C(p) = J_z p^2 + \frac{f_c (M_0 + M_{43}) + \xi M_{12}}{(1 - k_{\phi})(1 + k_{\delta})}, \quad (25)$$

$$M_0 = h_{\text{цм}} M V p;$$

$$M_{43} = p(V - \Delta L p)(g F_{\phi} - p^2 M_{\phi});$$

$$M_{12} = p^3 [(V - \Delta L p) \Delta L - c_*^2 p] F_{\phi};$$

$$F_{\phi} p^4$$

$$k_{\delta} = \frac{M p^2 + f_{\delta} p + Z_{\delta}}{M p^2 + f_{\delta} p + Z_{\delta}},$$

$$k_{\phi} = \frac{M g h_{\text{цм}} - M_{\psi}}{J_x^* p^2 + f_x p + Z_r B}.$$

Если жидкость потеряла возможность двигаться (напр., фактически или условно замерзла в цистерне), то эта формула становится достаточно простой:

$$C(p) = J_z p^2 + \frac{f_c M g h_{\text{цм}} V p}{1 - k_{\phi}}, \quad (26)$$

$$k_{\phi} = \frac{M g h_{\text{цм}}}{J_x^* p^2 + f_x p + Z_r B}.$$

Понятно, что в этом случае исследования на устойчивость движения возможно проводить аналитическими методами, которые недопустимы для цистерны с жидкостью и при условии допустимого упрощения математической модели (напр., уменьшение количества парциальных осцилляторов или пренебрежение упругостью шин). Поэтому мы не занимались упрощением модели, так как неизвестно как они повлияют на границу области устойчивости.

Таблица 2 – Основные параметры ЭМ привода

| Параметр                                                | Величина              |
|---------------------------------------------------------|-----------------------|
| Индуктивность катушки $\Lambda_{об}$ , Ом $\times$ с    | 0.15                  |
| Сопротивление цепи $R_{об}$ , Ом                        | 30                    |
| Константа времени для ЭМ $\tau_{об}$ , с                | 0.005                 |
| Момент инерции коромысла $J_k$ , кгм <sup>2</sup>       | $0.98 \times 10^{-2}$ |
| Коэффициент жесткости пружины коромысла, $c_k$ , Нм     | $1.01 \cdot 10^2$     |
| Коэффициент трения в опоре коромысла $f_k$ , Нмс        | 0.55                  |
| Собственная частота колебаний коромысла, Гц             | 16                    |
| Логарифмический декремент затухания колебаний в ЭМУ     | 1.7                   |
| Коэффициент усиления $\kappa_{и}$ , НмПаВ <sup>-1</sup> | $10^6$                |

В завершении рассмотрим систему уравнений (18), (26) и увидим, что для ее совместности необходимо выполнение следующего условия:

$$K_{\psi} + K_{\omega} p + \frac{K_y V}{p} = \Psi(p). \quad (27)$$

$$\Psi(p) = -\frac{2C(p)}{\kappa_{и} B k_{\Gamma}} (J_k p^2 + f_k p + c_k)(1 + \tau_{об} p), \quad (28)$$

где  $C(p)$  – мелко-рациональная функция, заданная формулами (24) или (25), или (26).

Равенство (27) – целевое характеристическое уравнение возмущенного движения автомобиля с цистерной, который оснащен двухконтурной системой курсовой устойчивости.

**Алгоритм и результаты исследования устойчивости системы. Этап 1: одноконтурное регулирование.** Заметим, что в равенстве (28) можно избавиться от знаменателей, и, не смотря на высокую степень полинома, найти все его корни  $p_j, j \in \overline{1,22}$ , используя для этого стандартные компьютерные программы. По расположению этих корней в комплексной плоскости можно сделать вывод про асимптотическую устойчивость системы, и получить ценную, исчерпывающую информацию о поведении ее отдельных звеньев. Но этот путь решения является предельно неэффективным, и мы поступим иначе.

На первом этапе расчетного исследования выберем для интегрального коэффициента регулятора значение  $K_y = 0$  и подставим в уравнение

$$K_\psi + K_\omega p = \Psi(p)$$

мнимое характеристическое число  $p = \omega i$ :

$$K_\psi + K_\omega \omega i = \Psi(\omega i) \quad (29)$$

Равенство (29) эквивалентно системе двух равенств:

$$\begin{cases} K_\psi = \operatorname{Re}[\Psi(\omega i)] \\ K_\omega = \operatorname{Re}\left[\frac{\Psi(\omega i)}{\omega i}\right], \end{cases} \quad (30)$$

где  $\operatorname{Re}[p]$  – действительная часть комплексного числа  $p$ .

В работе [8] для подобной задачи действительная часть функции отделялась аналитическими методами, но теперь функция стала сложнее, поэтому поручим эту работу (как и предыдущую) компьютеру.

С помощью компьютерной программы меняем значение круговой частоты  $\omega: 0 \rightarrow \infty$  и на экране компьютера в координатах  $K_\psi, K_\omega$  изображаем траекторию движения точки, т.е. формулы (30) описывают эту траекторию в параметрической форме. Общий вид этой траектории для топливозаправщика КрАЗ-63221 показан на рис. 6, а ее нижней границы – на рис. 7, 8. Для сравнения на рис. 9 приведены графики, которые соответствуют так называемому «замороженному грузу», который потерял возможность двигаться в цистерне.

Нижняя граница области устойчивости отвечает диапазону частот 0–10 Гц, а верхняя граница –

диапазону 10–15 Гц. При еще больших частотах граница уходит в зону отрицательных значений коэффициента  $K_\psi$ , где ограничение теряет актуальность.

Как видно на рис. 6, расположение верхней границы зависит от загруженности автомобиля, и при высоких частотах чем больше вес, тем легче обеспечить его курсовую устойчивость за счет регулирующего влияния на тормозную систему. Если груз закреплен, то и на низких частотах действует аналогичное правило (см. рис. 9).

Но, если в цистерне транспортируется жидкость, то на низких частотах (рис. 7) более важную роль имеет скорость автомобиля, которая, при граничном уменьшении нагрузки, увеличивается до 25 м/с, а при полной нагрузке цистерны жидкостью уменьшается до 12 м/с. К тому же, свой вклад делают парциальные осцилляторы, которые имеют низкий декремент затухания и резонируют при частотах, которые изображены на рис. 4, а также колебания смещения (их собственная частота приведена в табл. 1, а логарифмический декремент затухания при отсутствии амортизаторов равен 0.08, т.е. он тоже минимальный).

В результате на рис. 7 можно увидеть два узла колебаний, причиной создания первого узла (если их считать слева направо) и едва заметной «колебательной дорожки» после него являются парциальные осцилляторы, а второй, более масштабный, узел связан с развитием колебаний смещения.

Заметим, что пучок приближенно прямых линий (рис. 9), определяет общий тренд для направления границы каждой области устойчивости, изображенной на рис. 7, и этот тренд можно увидеть на рис. 8.

Каждая траектория, которая отвечает принятому уровню нагрузки, при некоторой частоте колебаний

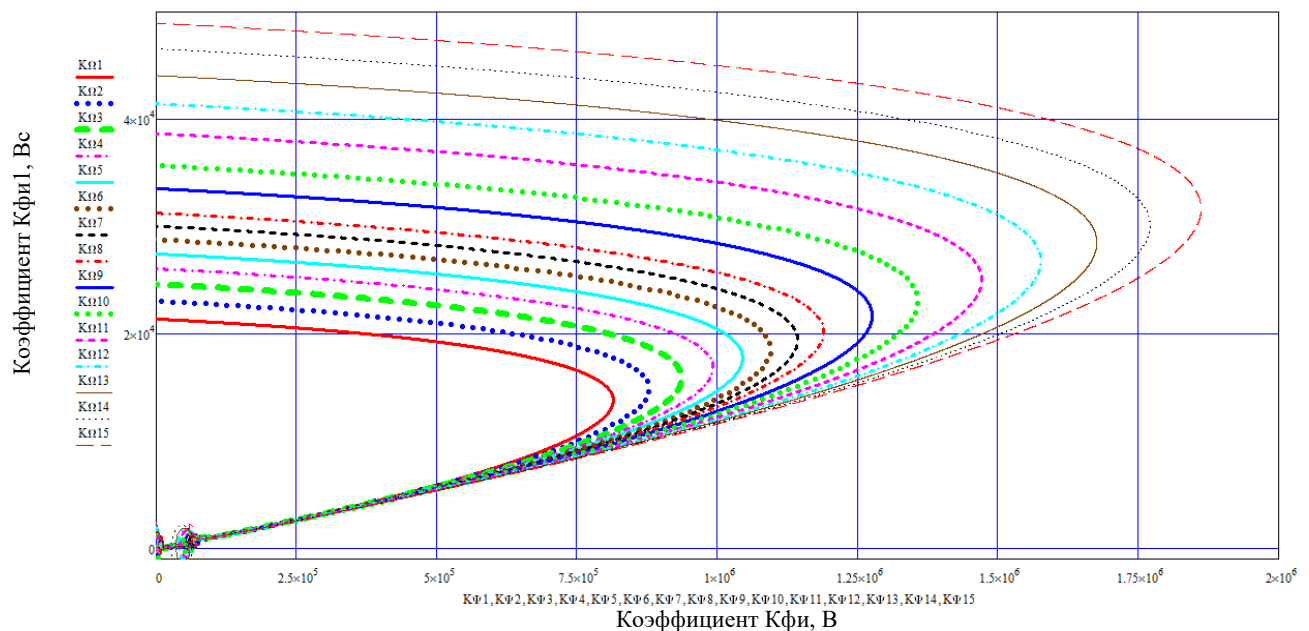


Рис. 6. Общий вид области курсовой устойчивости. Обозначение Кфи отвечает коэффициенту  $K_\psi$ , а обозначение Кфи1 – коэффициенту  $K_\omega$ . Номер границы тут и дальше отвечает следующим уровням жидкости: 1 – 0.05; 2 – 0.10; 3 – 0.15; 4 – 0.20; 5 – 0.25; 6 – 0.30; 7 – 0.35; 8 – 0.40; 9 – 0.50; 10 – 0.60; 11 – 0.75; 12 – 0.90; 13 – 1.05; 14 – 1.20; 15 – 1.35 м

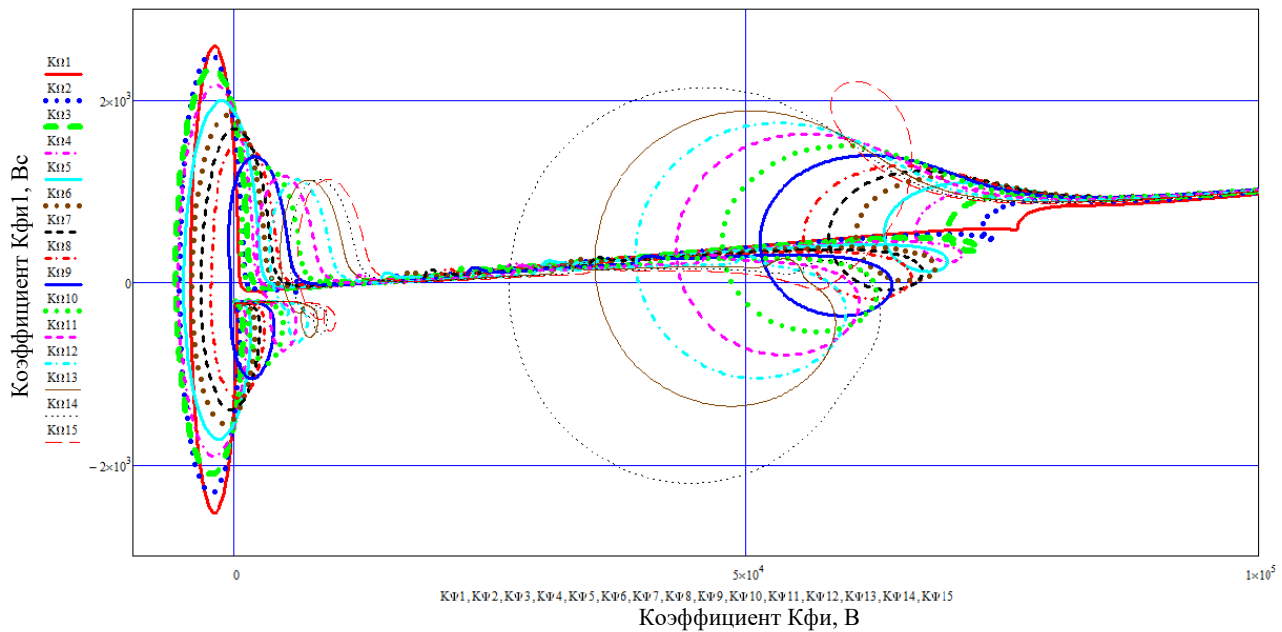
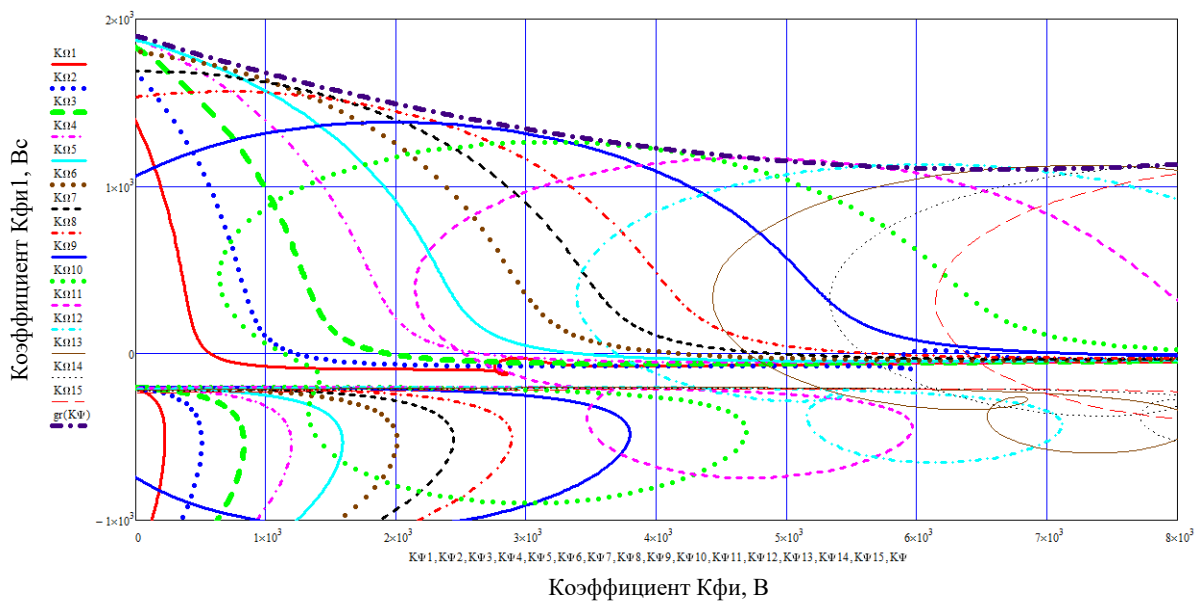


Рис. 7. Общий вид нижней границы области курсовой устойчивости при частотах 0–2 Гц

Рис. 8. Актуальный участок нижней границы области курсовой устойчивости при частотах 0–0.4 Гц и коэффициенте  $K_y = 0$ . Штрихпунктирная линия огибает все траектории сверху и становится границей этой области

выходит из общего пучка, и, при большей частоте, возвращается к этому пучку. В результате, отклоняясь от общего тренда, она создает в плоскости параметров  $K_\psi, K_\omega$  несколько последовательных петель.

Детальное исследование первой петли, которая проходит возле нулевой точки и при малых нагрузках огибает ее (рис. 8) показало, что асимптотическая устойчивость наблюдается при условии расположения параметра  $K_\omega$  выше этой петли.

Это соответствует правилу штриховки области устойчивости, примененному в работе [8].

Однако, по причине присутствующего усложнения общей картины, изображенной на рис. 7, 8, в

сравнении с классическими параболой рис. 6, асимптотическая устойчивость потребовала конкретной проверки.

Как видим, между жидким и «отвердевшим» грузом проявляется качественное различие: если отключить ПИД-регулятор, то у автомобиля с закрепленным грузом после действия кинематического или силового возбудителя курсовой угол выравнивается самостоятельно, без вмешательства водителя (рис. 9), а у автомобиля с цистерной (при нагрузке менее 40 % от полной, рис. 8) такого свойства нет.

Однако, это не касается курсового смещения, для ликвидации которого, в этих случаях, необходимо

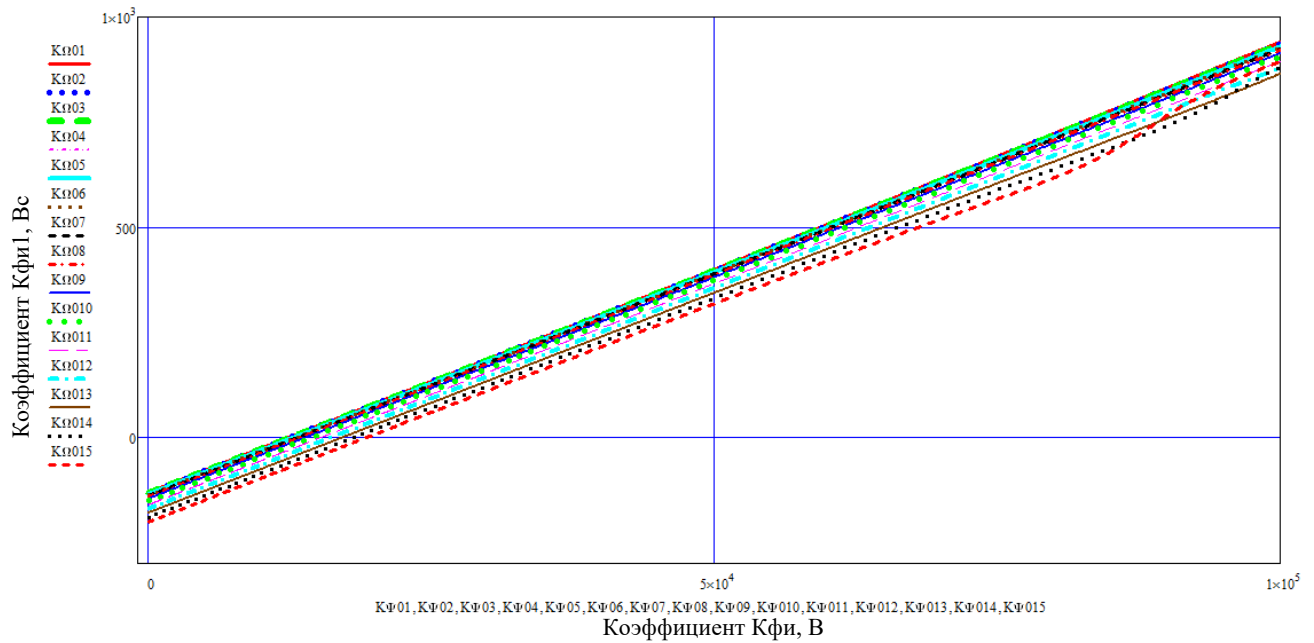


Рис. 9. Актуальный участок нижней границы области курсовой устойчивости при частотах 0–0.4 Гц и коэффициенте  $K_y = 0$  для автомобиля с «затвердевшим» грузом.

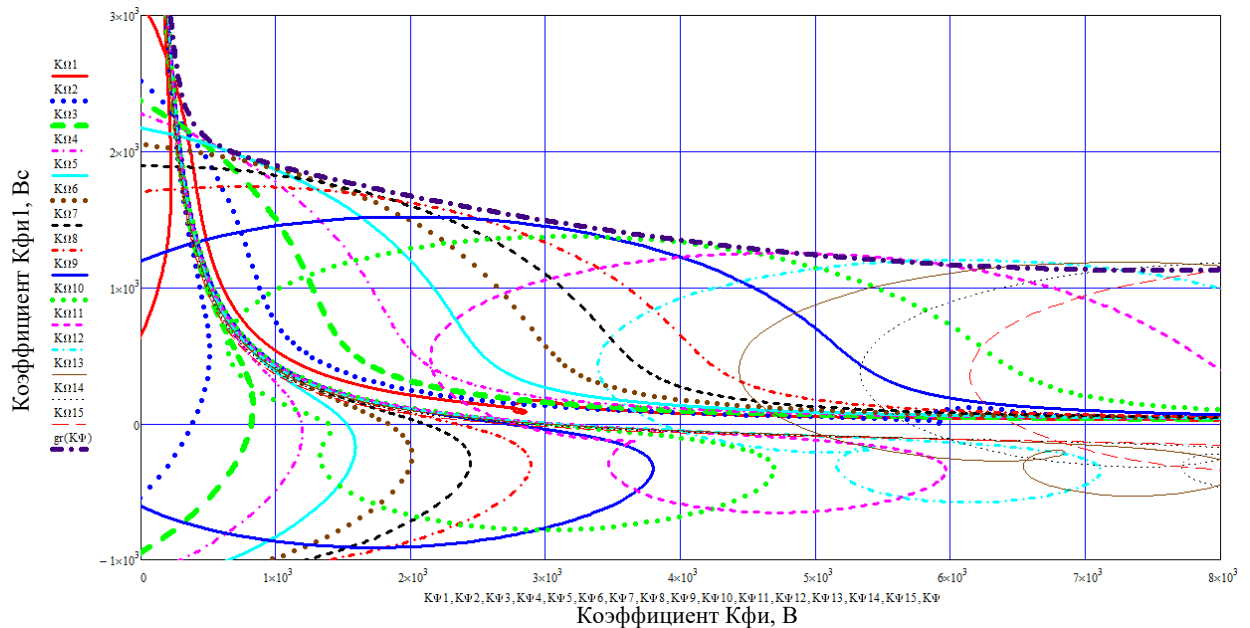


Рис. 10. Актуальный участок нижней границы области курсовой устойчивости при частотах 0–0.4 Гц и значении коэффициента  $K_y = 50 \text{ Вм}^{-1}$ . Штрихпунктирная линия огибает все траектории сверху и создает указанную границу

иметь двухконтурный регулятор с рациональной настройкой коэффициентов усиления.

**Алгоритм и результаты исследования на этапе 2: двухконтурное регулирование.** Зафиксируем коэффициент  $K_y$  на некотором положительном уровне, и вместо (30) получим новые параметрические уравнения:

$$\begin{cases} K_\psi = \text{Re}[\Psi(\omega i)] \\ K_\omega = \text{Re}\left[\frac{\Psi(\omega i)}{\omega i}\right] + \frac{K_y V}{\omega^2} \end{cases} \quad (31)$$

Из содержания параметрических уравнений (31) можно понять, что коррекция области устойчивости будет выполняться только для диапазона малых частот, что подтверждается графиками (рис. 10).

На рис. 11, а графики функции  $K_\omega = \text{Gr}(K_\psi, K_y)$  описывают нижние пределы области устойчивости при разных значениях коэффициента  $K_y$  от 0 до  $100 \text{ Вм}^{-1}$ , который соответствует возможностям используемого ЭМУ.

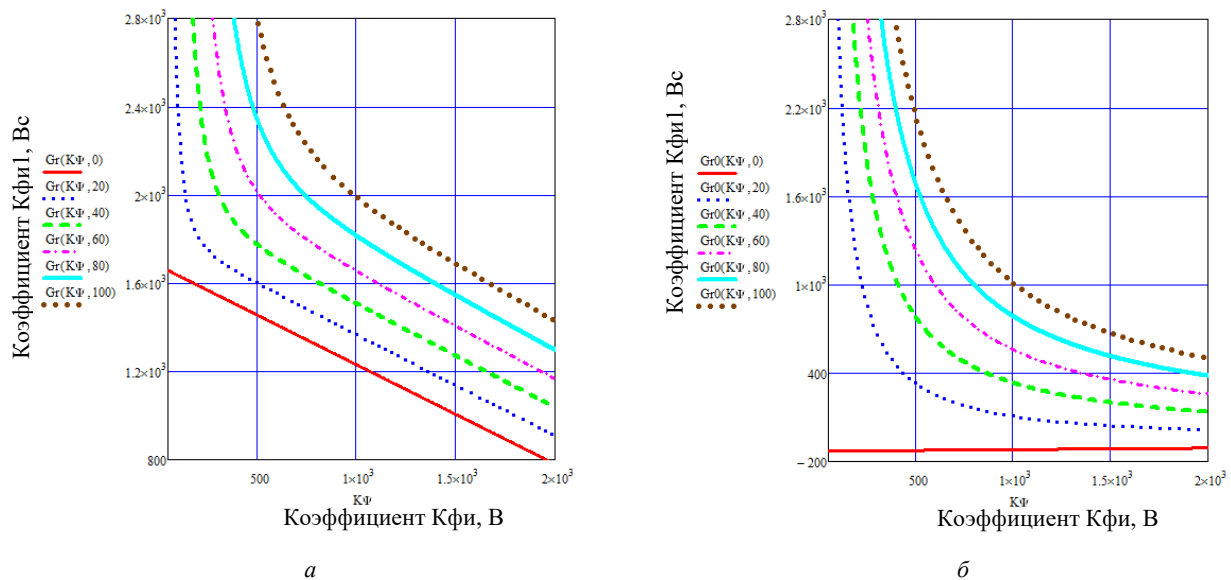


Рис. 11. Изменения нижней границы области устойчивости в зависимости от выбора интегрального коэффициента  $K_y$ : а – для жидкого груза предел описывается  $K_\omega = \text{Gr}(K_\psi, K_y)$ ; б – для «отвердевшего» груза граница описывается  $K_\omega = \text{Gr0}(K_\psi, K_y)$

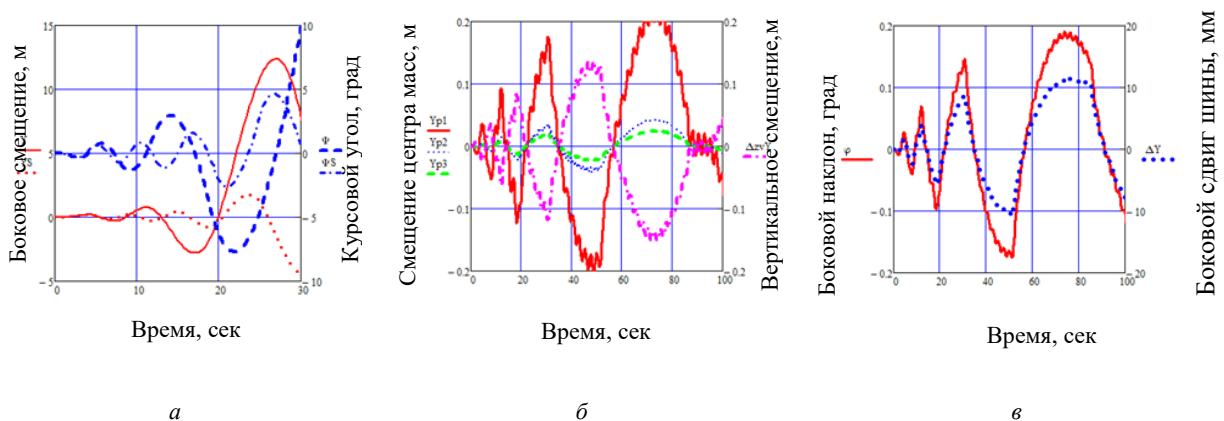


Рис. 12. Неустойчивый процесс движения при  $K_\psi = 1000\text{В}$ ,  $K_\omega = 300\text{Вс}$ ,  $K_y = 50\text{Вм}^{-1}$ : а – изменение курсовых параметров (буква S соответствует «отвердевшему» грузу); б – колебания парциальных осцилляторов; в – боковые колебания корпуса автомобиля

Форма границы для «отвердевшего» груза задает новую линию тренда, ниже которой амплитуды колебаний курсовых параметров автомобиля носят растущий характер (рис. 12). В зазоре между соответствующими линиями, взятыми с графиков на рис. 11, а и рис. 11, б при одинаковых значениях, движение жидкости в цистерне представляет собой автоколебания малой амплитуды (рис. 13), а выше границы устойчивости все колебания затухают (рис. 14).

Графики функции  $K_\omega = \text{Gr0}(K_\psi, K_y)$  на рис. 11, б описывают нижние гранцы области автоколебаний для автомобиля с жидким грузом в цистерне.

Расчеты (рис. 12–14) были выполнены с использованием математической модели, описанной ранее; для возмущения колебаний использовался одинаковый импульс давления  $\Delta P$  в системе управления тормозами, который имел треугольную форму.

Уровень жидкости в цистерне был выбран  $0.5\text{ м}$ , для которого максимальная скорость топливозаправщика КрАЗ-63221 равна  $20\text{ м/с}$ . Этому уровню нагрузки и скорости на рис. 10 соответствует петля синего цвета с номером 9.

Как видим, при принятом для этих расчетов значениях коэффициентов  $K_\psi = 1000\text{В}$ ,  $K_y = 50\text{Вм}^{-1}$  линия тренда имеет ординату  $K_\omega = 400\text{Вс}$ , а на границе устойчивости имеем  $K_\omega = 1300\text{Вс}$ . Таким образом, данные, которые представлены на рис. 12–14, совпадают с теми, которые были получены при анализе характеристического уравнения, а проанализированные три переходные процесса, как это и предусматривалось теорией, действительно находятся в зоне неустойчивости, в зоне автоколебаний (где асимптотически неустойчивыми являются колебания жидкости) и в зоне асимптотической устойчивости движения исследуемой системы.

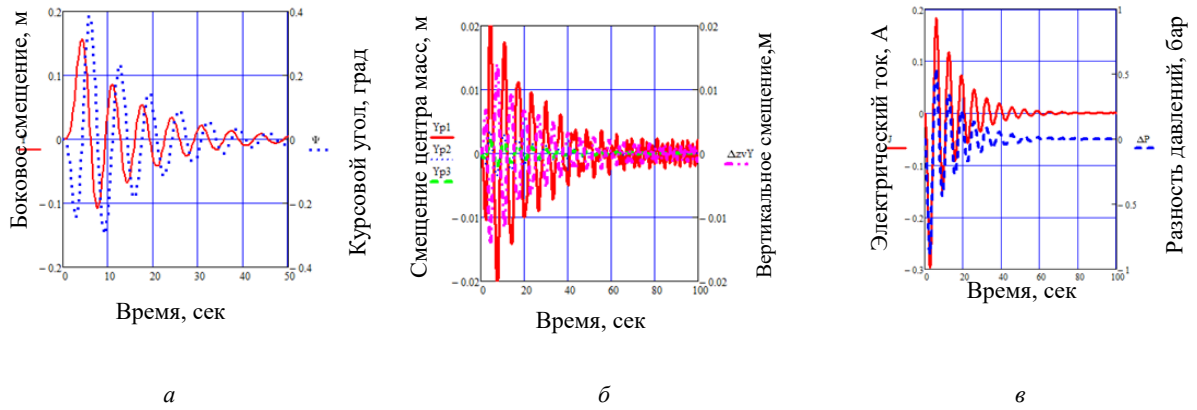


Рис. 13. Медленные переходные процессы при  $K_\psi = 1000\text{В}, K_\omega = 1000\text{Вс}, K_y = 50\text{Вм}^{-1}$ : а – изменение курсовых параметров; б – колебания парциальных осцилляторов; в – колебания параметров регулятора

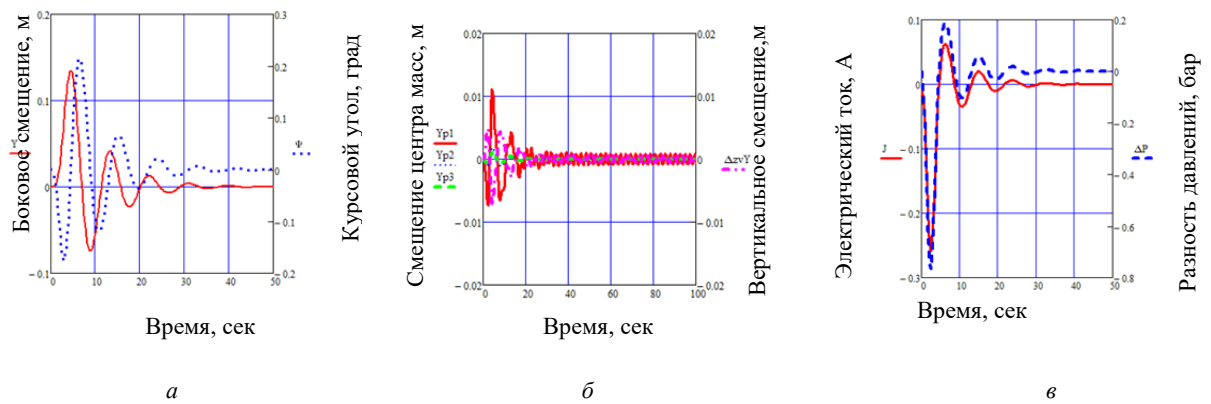


Рис.14. Быстрое восстановление курса при  $K_\psi = 1000\text{В}, K_\omega = 2000\text{Вс}, K_y = 50\text{Вм}^{-1}$  а – изменение курсовых параметров; б – колебания парциальных осцилляторов; в – колебания параметров регулятора

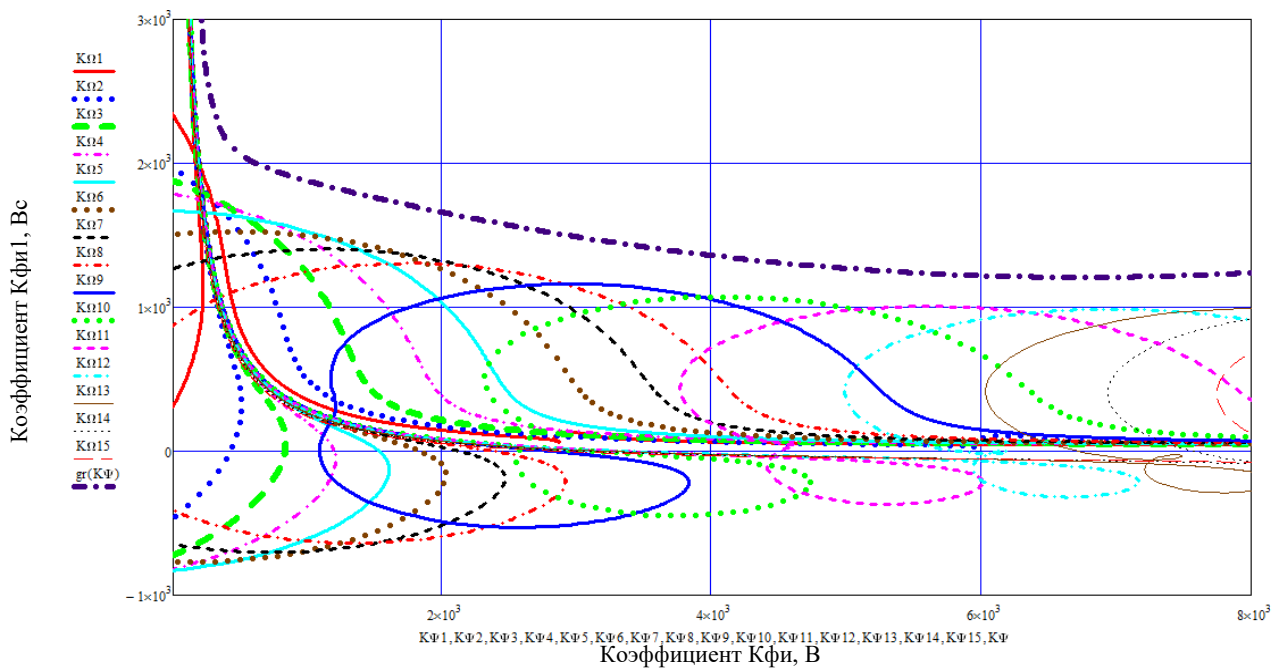


Рис.15. Актуальный участок нижней границы области курсовой устойчивости при частотах 0–0.4 Гц и значении  $K_y = 50\text{Вм}^{-1}$ . Пре среднем уровне жидкости  $h_* = 0.7\text{м}$  скорость автомобиля снижена до 12м/с, а штрихпунктирная линия является границей области устойчивости для  $V_* = 18\text{м/с}$

На основе анализа результатов другого расчетного исследования (см. рис. 15) установлено, что увеличение курсовой скорости однозначно приводит к подъему нижней границы устойчивости движения, причем на втором этапе этот эффект усиливается за счет формул (21). Что позволяет при решении поставленной задачи исключить курсовую скорость  $V$  из числа варьируемых параметров, а ее расчетное значение установить максимально возможным для принятого уровня загрузки цистерны автомобиля.

Поскольку разные точки предела курсовой устойчивости отвечают разным уровням жидкости  $h$ , необходимость рассматривать равные, выбранные со всего диапазона  $0 \dots H$ , остается неизменной и для второго этапа решения задачи. Иначе, ограничиваясь, как это принято, средним уровнем жидкости, можна допустить серьезные ошибки.

**Выводы.** Составлена математическая модель, описывающая возмущенное движение автомобиля с цистерной, которая позволяет учесть колебания свободной поверхности жидкости и определить их влияние на курсовую устойчивость автомобиля при стабильном движении и при экстренном торможении.

Разработан алгоритм построения характеристического уравнения для сложной системы дифференциальных уравнений, которое описывает динамические изменения параметров движения автомобиля с цистерной, колебания парциальных прослоек жидкости в цистерне и работу электромагнитного привода управляющего клапана и электронного ПИД-регулятора для двухконтурной системы обеспечения курсовой устойчивости.

Показано, что низкочастотные колебания свободной поверхности жидкости приводят к существенному сокращению области устойчивости замкнутой системы курсовой устойчивости автомобиля, что свидетельствует о необходимости учета таких колебаний при решении задач анализа и синтеза этой системы.

Установлено, что для автомобиля с цистерной, где происходят низкочастотные поперечные колебания жидкости, которые сопровождаются перераспределением массы и возбуждают движение, увеличение курсовой скорости однозначно приводит к ухудшению курсовой устойчивости. Что позволило исключить эту скорость из числа варьируемых параметров и существенно упростить задачу.

Было выяснено, что уровень жидкости в цистерне, с учетом его связи с максимальной скоростью движения, оказывает неоднозначное влияние на курсовую устойчивость автомобиля, и ограничивать исследование только лишь расчетами для случая 50 % нагрузки недопустимо. Вместо этого традиционного упрощения нужно искать линию, которая огибает сверху те границы, которые соответствуют многим уровням жидкости из диапазона их изменений.

#### Список литературы

1. Tavernini D., Velenis E., Longo S. Feedback Brake Distribution Control for Minimum Pitch. *Vehicle System Dynamics*. 2017. Vol. 55, issue 6. pp. 902–923.

2. Fujimoto H., Harada S. Model-based Range Expansion Control System for Electric Vehicles With Front and Rear Driving-Braking Force Distribution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2015. Vol. 62, issue 5. P. 3245–3254. doi: 10.1109/TIE.2015.2402634.
3. Gong X., Qian L., Ge W., Yan J. Research on Electronic Brake Force Distribution and Anti-Lock Brake of Vehicle Based on Direct Drive Electro Hydraulic Actuator. *International Journal of Automotive Engineering*. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 22–29. doi: 10.20485/jsaeijae.11.2.22.
4. Tavernini D., Velenis E., Longo S. Model-Based Active Brake Force Distribution for Pitch Angle Minimization. *IEEE 54th Conference on Decision and Control (December 15–18, 2015, Osaka)*. Osaka: IEEE, 2015. P. 197–202. doi: 10.1109/CDC.2015.7402108.
5. Nakamura E., Soga M., Sacai A., Otomo A., Kobayashi T. Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle. *SAE 2002 World Congress (March 4–7, 2002, Detroit)*. Detroit: SAE, 2002. 6 p. doi: 10.4271/2002-01-0300.
6. Park G., Choi S. B. Optimal Brake Distribution for Electronic Stability Control Using Weighted Least Square Allocation Method. *16th International Conference on Control "Automation and Systems" (October 16–19, 2016, Gyeongju)*. Gyeongju: IEEE, 2016. pp. 1420–1425. doi: 10.1109/ICCAS.2016.7832492.
7. Xinyu Wu. Control Strategy and Algorithm Study on Light Vehicle Electronic Mechanical Braking System. *5th International Conference on Education, Management, Information and Medicine (April 24–26, 2015, Shenyang)*. Shenyang, 2015. P. 1453–1458. doi: 10.2991/emim-15.2015.282.
8. Her H., Cho W., Yi K. Vehicle Stability Control Using Individual Break Force Based on Tire Force Information. *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (October 5–7, 2011, Washington)*. Washington: IEEE, 2011. P. 22–29.
9. Aleksandrov Y., Aleksandrova T., Morhun Y. Parametric Synthesis of the Electronic Control Unit of the Course Stability System of the Car. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6, no. 9 (102). P. 39–45.
10. Aleksandrov Y., Aleksandrova T., Kostianyk I., Morhun Y. Parametric Synthesis a Non-Stationary Automatic Control System of the Course Stability of the Car. *Сучасні Інформаційні Системи*. 2020. Т. 4, № 2. С. 51–59. doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.10.
11. Александров Е. Е., Александрова Т. Е., Костяник И. В., Моргун Я. Ю. Параметрический синтез цифровой системы курсовой устойчивости автомобиля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2020. № 17. С. 69–76.
12. Кожушко А. П., Григор'єв О. Л. Математичне моделювання низкочастотних коливань в'язкої рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ». 2018. № 3 (1271). С. 41–51.
13. Александров Е. С., Григор'єв О. Л., Моргун Я. Ю. Про вплив коливань верхньої поверхні транспортуємої рідини на курсову стійкість автомобіля, що оснащений цистерною з рідким наповнювачем. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. Тези доповідей VII Міжнародної науково-технічної Інтернет-конференції (23–24 листопада 2020 р., Харків)*, Харків: ХНАДУ, 2020. С. 88–90.
14. Высоцкий М. С., Плещакевский Ю. М., Шимановский А. О., Кузнецова М. Г. Обеспечение безопасности движения автоцистерн на основе оптимизации конструкции кузова. *Механика машин, механизмов и материалов*. 2012. № 3 (20), № 4(21). С. 142–148.
15. Шимановский А. О. Конструктивные решения, обеспечивающие безопасность движения цистерн (обзор). *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2009. № 1. С. 44–59.
16. Александров Е. С. Основы автомобильной автоматизации: навчально-методичний посібник. Харків: ХНАДУ, 2010. 172 с.

#### References (transliterated)

1. Tavernini D., Velenis E., Longo S. Feedback Brake Distribution Control for Minimum Pitch. *Vehicle System Dynamics*, 2017. Vol. 55, issue 6. pp. 902–923.
2. Fujimoto H., Harada S. Model-based Range Expansion Control System for Electric Vehicles With Front and Rear Driving-Braking Force Distribution. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.

2015. Vol. 62, issue 5. pp. 3245–3254. doi: 10.1109/TIE.2015.2402634.
3. Gong X., Qian L., Ge W., Yan J. Research on Electronic Brake Force Distribution and Anti-Lock Brake of Vehicle Based on Direct Drive Electro Hydraulic Actuator. *International Journal of Automotive Engineering*. 2020. Vol. 11, no. 2. pp. 22–29. doi: 10.20485/jsaeijae.11.2.22.
  4. Tavernini D., Velenis E., Longo S. Model-Based Active Brake Force Distribution for Pitch Angle Minimization. *IEEE 54th Conference on Decision and Control (December 15–18, 2015, Osaka)*. Osaka, IEEE Publ., 2015. pp. 197–202. doi: 10.1109/CDC.2015.7402108.
  5. Nakamura E., Soga M., Sacai A., Otomo A., Kobayashi T. Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle. *SAE 2002 World Congress (March 4–7, 2002, Detroit)*. Detroit, SAE Publ., 2002. 6 p. doi: 10.4271/2002-01-0300.
  6. Park G., Choi S.B. Optimal Brake Distribution for Electronic Stability Control Using Weighted Least Square Allocation Method. *16th International Conference on Control "Automation and Systems" (October 16–19, 2016, Gyeongju)*. Gyeongju: IEEE Publ., 2016. pp. 1420–1425. doi: 10.1109/ICCAS.2016.7832492.
  7. Xinyu Wu. Control Strategy and Algorithm Study on Light Vehicle Electronic Mechanical Braking System. *5th International Conference on Education, Management, Information and Medicine (April 24–26, 2015, Shenyang)*. Shenyang, 2015. pp. 1453–1458. doi: 10.2991/emim-15.2015.282.
  8. Her H., Cho W., Yi K. Vehicle Stability Control Using Individual Break Force Based on Tire Force Information. *14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (October 5–7, 2011, Washington)*. Washington, IEEE Publ., 2011. pp. 22–29.
  9. Alexandrov Y., Alexandrova T., Morhun Y. Parametric Synthesis of the Electronic Control Unit of the Course Stability System of the Car. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6, no. 9 (102). pp. 39–45.
  10. Alexandrov Y., Alexandrova T., Kostianyk I., Morhun Y. Parametric Synthesis a Non-Stationary Automatic Control System of the Course Stability of the Car. *Suchasni Informatsiyni Systemy*. [Advanced Information Systems]. 2020. vol. 4, no. 2. pp. 51–59. doi: 10.20998/2522-9052.2020.2.10.
  11. Alexandrov Ye. Ye., Alexandrova T. Ye., Kostianyk I. V., Morhun Ya. Yu. Parametricheskii sintez tsifrovoy sistemy kursovoy ustoychivosti avtomobilya [Parametric synthesis of the digital system of course stability of the car]. *Avtomobil' i elektronika. Suchasni tekhnolohiyi* [Vehicle and electronics. The modern technologies]. 2020. no. 17. pp. 69–76.
  12. Kozhushko A. P., Hryhor'yev O. L. Matematychni modelyuvannya nyz'kochastotnykh kolyvan' v'yazkoyi ridyny v horyzontal'nyi yemnosti z vil'noyu poverkhneyu [Mathematical modeling of low-frequency oscillations of a viscous fluid in a horizontal container with a free surface]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Matematychni modelyuvannya v tekhnitsi ta tekhnolohiyakh* [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Thematic issue: Mathematical modeling in machinery and technologies]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018. no. 3 (1271). pp. 41–51.
  13. Aleksandrov Ye. Ye., Hryhor'yev O. L., Morhun Ya. Yu. Pro vplyv kolyvan' verkhnoyi poverkhni transportuyemoyi ridyny na kursovu stiykist' avtomobilya, shcho osnashcheny tsystemoyu z ridkym napovnyuvachem [On the influence of oscillations of the upper surface of the transported liquid on the course stability of a car equipped with a tank with liquid filler]. *Avtomobil' i elektronika. Suchasni tekhnolohiyi. Tezy dopovidey VII Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi Internet-konferentsiyi (23–24 lystopada 2020 r., Kharkiv)* [Vehicle and electronics. The modern technologies. Theses of VII International scientific and technical Internet conference (23–24 November 2020, Kharkiv)]. Kharkiv, KNAHU Publ., 2020. pp. 88–90.
  14. Vysockij M. S., Pleskachevskij Yu. M., Shimanovskij A. O., Kuznecova M. H. Obespechenie bezopasnosti dvizheniya avtotsistem na osnove optimizatsii konstruktivnykh kuzova [Ensuring the safety of road tankers based on optimization of the body structure]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms, and materials]. 2012. no. 3(20), no. 4(21). pp. 142–148.
  15. Shimanovskij A. O. Konstruktivnye resheniya, obespechivayushchie bezopasnost' dvizheniya tsistem (obzor) [Constructive solutions ensuring the safety of tank cars (overview)]. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii* [Mechanical engineering and automation problems]. 2009. no. 1. pp. 44–59.
  16. Aleksandrov Ye. Ye. *Osnovy avtomobil'noyi avtomatyky: navchal'no-metodychnyy posibnyk* [Fundamentals of automotive automation: a textbook]. Kharkiv: KNAHU Publ., 2010. 172 p.

Поступила (received) 03.04.2021

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

**Александров Євген Євгенович (Александров Евгений Евгеньевич, Aleksandrov Yevgen Yevgenovich)** – доктор технічних наук, професор, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри автомобілів ім. А. Б. Гредескула; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7525-6383>; e-mail: [aleksandrov.ye.ye@gmail.com](mailto:aleksandrov.ye.ye@gmail.com).

**Александрова Тетяна Євгенівна (Александрова Татьяна Евгеньевна, Aleksandrova Tetyana Yevhenivna)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9596-0669>; e-mail: [aleksandrova.t.ye@gmail.com](mailto:aleksandrova.t.ye@gmail.com).

**Григор'єв Олександр Львович (Григорьев Александр Львович, Grigoriev Alexander Lvovich)** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри вищої математики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0155-1694>; e-mail: [kpi.mmtt@gmail.com](mailto:kpi.mmtt@gmail.com).

**Моргун Ярослав Юрійович (Моргун Ярослав Юрьевич, Morhun Yaroslav Yuriiovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7399-4937>; e-mail: [yarki95@gmail.com](mailto:yarki95@gmail.com).

**В. И. ТОВАЖНЯНСКИЙ****АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРЫВИСТЫМ ТЕПЛОВЫМ РЕЖИМОМ ЗДАНИЙ**

Рассматривается актуальная задача синтеза оптимального закона управления режимом прерывистого отопления офисных зданий, заключающегося в программном снижении температуры помещений во внерабочее время. Проведенный анализ источников информации показал отсутствие в достаточной мере обоснованных методов решения задачи оптимизации тепловых процессов зданий, обеспечивающих комфортные условия функционирования персонала с одной стороны и экономии расходов на их поддержание, с другой стороны. Сформулирована постановка задачи оптимального управления тепловым состоянием здания, содержащая математическую модель процесса, цель управления, ограничения на управляющие воздействия и интегральный квадратичный критерий качества, включающий отклонения температуры помещения от заданной программы и расхода теплоты. Ограничение по управляющему воздействию учтено методом штрафных функций. В качестве математической модели оптимизируемого теплового процесса принята двумерная управляемая система дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, величины которых определяются на основе критериев подобия зданий, что позволяет решать задачу оптимизации в безразмерной форме. Модель включает управляющее воздействие – подводимый тепловой поток и возмущающее воздействие – температуру окружающей среды, изменяющуюся по заданному гармоничному закону. Численное решение задачи оптимального управления реализовано методом последовательных приближений Черноушко. Приведено описание интерфейса пользователя, а также примеры реализации оптимального управления тепловым состоянием. Предложенное программное обеспечение позволяет на этапе проектирования системы теплоснабжения получать экспресс-оценки различных тепловых режимов здания, а также может быть использовано в качестве компьютерного обеспечения автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов.

**Ключевые слова:** режим прерывистого отопления, оптимальное управление, математическая модель, критерий качества управления, ограничения на управление, штрафная функция, последовательные приближения, интерфейс программы, автоматизированный индивидуальный тепловой пункт.

**В. І. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ****АЛГОРИТМІЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ПЕРЕРИВЧАСТИМ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ БУДІВЕЛЬ**

Розглядається актуальна задача синтезу оптимального закону керування режимом переривчастого опалення офісних будівель, яка полягає в програмному зниженні температури приміщень у позаробочий час. Проведений аналіз джерел інформації показав відсутність в достатній мірі обґрунтованих методів розв'язання задачі оптимізації теплових процесів будівель, що забезпечують комфортні умови функціонування персоналу з одного боку і економію витрат на їх підтримку, з іншого боку. Сформульовано постановку задачі оптимального керування тепловим станом будівлі, яка містить математичну модель процесу, мету управління, обмеження на дії і інтегральний квадратичний критерій якості, що включає відхилення температури приміщення від заданої програми і витрати теплоти. Обмеження по керуючому впливу враховано методом штрафних функцій. В якості математичної моделі теплового процесу, що оптимізується, прийнята двовимірна керована система диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами, величини яких визначаються на основі критеріїв подібності будівель, що дозволяє вирішувати задачу оптимізації у безрозмірній формі. Модель включає управлінський вплив – теплової потік, що підводиться, і збурення – температуру навколишнього середовища, що змінюється по заданому гармонійному закону. Чисельне рішення задачі оптимального управління реалізовано методом послідовних наближень Черноушко. Наведено опис інтерфейсу користувача, а також приклади реалізації оптимального управління тепловим станом. Запропоноване програмне забезпечення дозволяє на етапі проектування системи теплопостачання отримувати експрес-оценки різних теплових режимів будівлі, а також може бути використано в якості комп'ютерного забезпечення автоматизованих індивідуальних теплових пунктів.

**Ключові слова:** режим переривчастого опалення, оптимальне управління, математична модель, критерій якості управління, обмеження на управління, штрафна функція, послідовні наближення, інтерфейс програми, автоматизований індивідуальний тепловий пункт.

**V. I. TOVAZHNYANSKYI****ALGORITHMS AND SOFTWARE OF BUILDINGS INTERMITTENT THERMAL CONDITIONS OPTIMAL CONTROL**

The actual problem of synthesizing the optimal control law for the intermittent heating mode of office buildings is considered, which consists in the programmed reduction of the room temperature during off-hours. The analysis of information sources showed the absence of sufficiently justified methods for solving the problem of optimizing the thermal processes of buildings, which provide comfortable conditions for the functioning of personnel, on the one hand, and save costs for buildings maintenance, on the other hand. The statement of the building thermal state optimal control problem is formulated, which contains a mathematical model of the process, a control goal, constraints on control actions and an integral quadratic quality criterion, including deviations of the room temperature from a given program and heat consumption. The limitation on the control action is taken into account by the method of penalty functions. As a mathematical model of the optimized thermal process, a two-dimensional controlled system of differential equations with constant coefficients is applied. The values of these coefficients are determined on the basis of building similarity criteria, which allows solving the optimization problem in a dimensionless form. The model includes a control action - the supplied heat flux, and a disturbing action - the ambient temperature, changing according to a given harmonious law. The numerical solution of the optimal control problem is implemented by the Chernous'ko method of successive approximations. A description of the user interface is given, as well as examples of the implementation of the thermal state optimal control. The proposed software allows on the stage of designing the heating system to obtain express assessments of various thermal modes of the building, and can also be used as computer support for automated individual heating points.

**Keywords:** intermittent heating mode, optimal control, mathematical model, control quality criterion, control constraints, penalty function, successive approximations, program interface, automated individual heating point.

**Введение.** Эффективное теплоснабжение жилых, производственных и офисных помещений является одной из основных проблем Украины имеющей

первостепенное социальное, экономическое и политическое значение. Эффективность теплоснабжения можно оценить двумя компромиссными критериями:

© В. И. ТОВАЖНЯНСКИЙ, 2021

расходом тепловой энергии и температурным режимом помещений. Противоречие заключается в том, что экономия тепловой энергии приводит к снижению температуры внутри помещений, т. е. нарушению условий, обеспечивающих комфортное существование человека. Данное противоречие в условиях централизованной системы теплоснабжения с качественным регулированием отпуска теплоты по температурному графику приводит к дисбалансу в количестве потребляемой тепловой энергии и условий комфортности внутри помещений различных зданий, и времени суток.

Одним из путей комплексного решения указанной проблемы, является локальная децентрализация теплоснабжения на основе оснащения многоэтажных строений автоматизированными индивидуальными тепловыми пунктами (АИТП). На АИТП возлагается функция поддержания заданной температуры внутри помещения в зависимости от конструктивных параметров здания внешних погодных условий и параметров теплоносителя, генерируемого центральной котельной установкой.

Для большинства офисных и производственных зданий, театров, школ и т. д. с целью экономии расходов теплоты в течение части суток допускается некоторое снижение температуры помещений ниже нормативного значения. Такой режим «прерывистого» отопления позволяет экономить расходы теплоты при выполнении требований по комфортности в заданных интервалах суток.

Таким образом, возникает задача управления теплоподводом к зданию, обеспечивающего близкое к программному изменение температуры помещения при минимальных затратах тепловой энергии. Решение этой актуальной задачи и составляет цель настоящего исследования.

**Обзор и анализ источников информации.** Одним из эффективных методов, направленным на экономию тепловой энергии, является снижение или полное отключение подачи теплоносителя в производственные или офисные здания в нерабочее время, и восстановление к моменту начала рабочего дня комфортного температурного режима помещений восстанавливается. Анализ источников информации [1–4] дает основание предполагать, что режим прерывистого отопления (РПО) позволяет экономить тепловую энергию до 35% в год. Очевидно, что РПО может быть реализован только на АИТП, поскольку здания имеют различные статические и динамические характеристики.

В работах [2–9] рассмотрены некоторые подходы к реализации РПО, а также оценке его энергоэффективности, основанные на математическом и компьютерном моделировании процессов теплоснабжения зданий. Несмотря на высокий научный уровень этих исследований им, как и любым другим научным исследованиям, присущ ряд допущений и недостатков. Так в основополагающей работе [2] при рассмотрении процесса разогрева здания или натопа не учитываются динамические характеристики ограждений и внутренних аккумулирующих элементов (перегородок,

мебели, оборудования и пр.). В то же время, нетрудно убедиться в том, что постоянная времени процесса нагревания внутреннего воздуха пренебрежимо мала по сравнению с постоянными времени тепловых процессов ограждений и внутренних аккумуляторов теплоты. Таким образом, быстродействие процесса натопа определяется не нагреванием воздуха, а нагревом конструктивных элементов здания. Этот недостаток также отмечается авторами [3], которые попытались сформулировать алгоритм прерывистого отопления, как задачу оптимального управления по критерию экономии тепловой мощности на заданном временном интервале. Следует отметить ряд неточностей в [3] при постановке задачи оптимального управления. Так минимальная мощность системы отопления в процессе управления определяется как мощность обеспечивающая температуру внутреннего воздуха на уровне 12°C. В то же время, выполнение этого условия осуществляется при различных мощностях системы отопления в зависимости от внешних условий. Кроме того, совершенно необоснованным выглядит утверждение о равенстве интервалов минимальной и максимальной мощностей системы отопления. На интуитивном уровне режим прерывистого управления, соответствующий основным положениям теории оптимального управления, описан в работе [4]. Из всех работ в этом направлении можно выделить исследование [5], в котором наиболее удачно отражены основные ключевые моменты постановки задачи оптимального управления РПО. Так в [5] в качестве математической модели процесса рассматривается конечномерная модель теплопроводности через многослойное ограждение, а также сосредоточенные динамические модели внутреннего воздуха и перегородок здания. Несколько неточным представляется выбор минимизируемого функционала, включающего квадратичную штрафную функцию на правом конце от температуры внутреннего воздуха. Дело в том, что требуемая температура воздуха может быть достигнута и тогда, когда все остальные температуры, определяющие полный вектор состояния системы будут иметь значения, отличные от номинальных значений, что приведет к последующему изменению температуры воздуха в помещении. Кроме того применение прямых методов оптимизации вряд ли следует признать оправданным, поскольку приводит к нахождению локального экстремума. Это привело к ошибочному результату, в то время как принцип максимума для данной постановки задачи дает очевидное решение на границах области допустимых управлений [6].

В работе [6] на основе упрощенной математической модели тепловых процессов зданий, полученной в предположении больших различий в постоянных времени нагрева (охлаждения) внешнего ограждения, внутреннего заполнения и внутреннего воздуха на основе принципа максимума получены оптимальные законы управления тепловой мощностью системы отопления, позволяющие оптимизировать тепловую эффективность режима прерывистого отопления. Полученные результаты по экономии

теплоты на множестве параметров, характеризующих РПО, подтвердили снижение расходов теплоты на 1,5–20% по сравнению с соответствующим стационарным режимом. Т. е. экономия теплоты в период снижения уровня тепловой мощности выше чем ее расход в период последующего выхода на стационарный режим. Существенным недостатком работы [6] можно считать пренебрежение аккумулялирующими качествами внутренних перегородок, а также предположении об отсутствии суточного изменения температуры окружающего воздуха.

Таким образом, целью настоящей работы является синтез оптимального закона управления тепловой мощностью с учетом приведенных выше недостатков.

**Постановка задачи исследования.** Будем характеризовать РПО здания программной функцией переключения (ПФП), предоставляющей собой желаемый температурный график изменения температуры помещения  $T_b^*(t)$ .

ПФП имеет структуру периодической функции, состоящей из последовательности прямоугольных импульсов с заданными максимальным  $\bar{T}_b$  и минимальным  $\underline{T}_b$  уровнями температуры воздуха помещения.

$$T_b^*(t) = \begin{cases} \bar{T}_b & \text{при } \varphi(t) = 1, \\ \underline{T}_b & \text{при } \varphi(t) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\varphi(t)$  – временная функция переключений режимов прерывания отопления

$$\varphi(t) = \begin{cases} 1 & \text{для } \forall t \in (T_b^*(t) = \bar{T}_b), \\ 0 & \text{для } \forall t \in (T_b^*(t) = \underline{T}_b). \end{cases} \quad (2)$$

В качестве математической модели теплового процесса здания будем рассматривать модель в безразмерных параметрах подобия и времени [10], имеющей вид:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\vartheta} &= -bT + \rho T_a + q + cT_{oc}, \\ \frac{dT_a}{d\vartheta} &= \zeta T - \zeta dT_a + \zeta q + \zeta \omega T_{oc}, \\ T_b &= a(q + T + \rho T_a + \omega T_{oc}), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $T$ ,  $T_a$ ,  $T_b$  и  $T_{oc}$  – температуры внешнего ограждения, внутренних перегородок, внутреннего воздуха и окружающей среды соответственно.

Коэффициенты в системе уравнений (3) вычисляются в виде

$$\begin{aligned} a &= (1 + \rho + \omega), \quad b = 1 + 2(\rho + \omega), \\ c &= 1 + \rho + 2\omega, \quad d = 1 + \omega. \end{aligned} \quad (4)$$

$\vartheta = t/\tau/(1 + \rho + \omega)$  – безразмерное время,  $\tau$  – постоянная времени внешнего ограждения,  $\rho$  – отношение тепловых сопротивлений ограждения и внутренних перегородок,  $\omega$  – отношение тепловых сопротивлений ограждения и остекления,  $\zeta$  – отношение постоянных времени ограждения и перегородок,  $q$  – тепловой поток отопительных приборов, выраженный в перепаде температур на тепловом сопротивлении внешнего ограждения.

Как видно из (3) и (4), математическая модель исследуемого теплового процесса представляет собой линейную стационарную систему дифференциальных уравнений 2-го порядка, со скалярными управлением  $q(t)$  и возмущением  $T_{oc}(t)$ .

Критерий качества управляемого процесса выберем в виде

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_1} [(T_b - T_b^*)^2 + \mu q^2] dt, \quad (5)$$

где  $\mu$  – весовой коэффициент.

Критерий (5) учитывает два первичных критерия: точность выполнения заданной программы  $T_b^*$  по температуре воздуха в помещении, и затраты тепловой энергии на ее выполнение.

Изменение температуры окружающей среды в первом приближении будем предполагать гармоническим:

$$T_{oc}(\vartheta) = \bar{T}_{oc} + \Delta T \sin \Omega \vartheta \quad (6)$$

где круговая частота  $\Omega$  определяется соотношением между реальным  $t$  и безразмерным  $\vartheta$  временем

$$\Omega = 2\pi l,$$

где  $l$  – количество суток в интервале, соответствующем единице безразмерного времени  $\vartheta$ .

В качестве ограничений будем рассматривать ограничение на максимальную тепловую мощность

$$0 \leq q \leq q_{\max}. \quad (7)$$

Таким образом, необходимо найти закон управления  $q(t)$ , удовлетворяющий ограничению (7) и минимизирующий критерий (5).

**Синтез оптимального закона управления.** Для решения поставленной задачи воспользуемся стандартной процедурой принципа максимума [11]. Представление задачи оптимизации как задачи со свободным правым концом позволяет воспользоваться одним из самых эффективных методов численного решения задачи оптимизации управления методом Черноусько [12]. Ограничение на управление (7) учитывалось методом штрафных функций. В качестве штрафной функции была выбрана функция вида

$$\Phi(q) = \left( \frac{2q - q_{\max}}{q_{\max}} \right)^{2M}, \quad (8)$$

где  $M$  – большое положительное целое число.

Включение дифференцируемой штрафной функции (8) в критерий качества (5) позволило решать задачу максимизации гамильтониана простыми аналитическими методами отыскания безусловного экстремума.

Начальные условия для интегрирования системы (3) в прямом времени выбирались исходя из статической модели

$$\begin{aligned} T(t_0) &= \frac{1}{2}(T_b^*(t_0) - T_{oc}(t_0)), \\ T_a(t_0) &= T_b^*(t_0), \end{aligned}$$

с последующим итерационным уточнением по соответствию начальных и конечных значений

$T(t_0) = T(t_1)$ ,  $T_a(t_0) = T_a(t_1)$  в силу периодичности программной функции  $T_B^*(t)$  и возмущающего воздействия  $T_{oc}(t)$ .

**Программное обеспечение.** Для решения задач оптимизации прерывистого режима процесса отопления разработано и реализовано программное обеспечение, основанное на итерационном методе последовательных приближений. Программа позволяет решать задачу оптимизации для произвольного набора параметров подобия здания, требований к суточной программе изменения температуры, к параметрам закона изменения температуры окружающей среды, а также максимально допустимой величине тепловой мощности. Основной интерфейс программы представлен на рис. 1

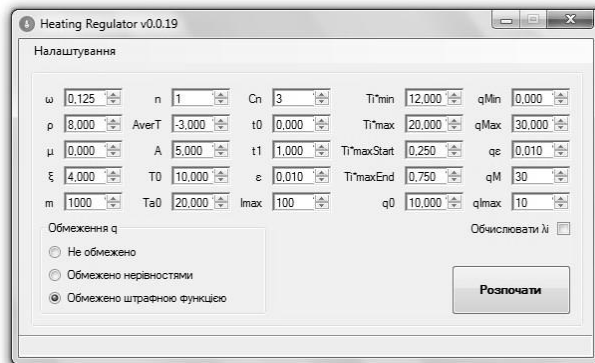


Рис. 1. Основной интерфейс

Кроме перечисленных параметров расчетного РПО необходимо ввести ряд параметров, регулирующих сходимость процесса оптимизации таких как степень штрафной функции  $M$ , стартовые значения температур охлаждения и перегородок, точность замыкания цикла РПО по начальным и конечным значениям температур, шаг интегрирования и ряд других параметров.

Программа имеет режим настроек, позволяющий выводить на экран необходимые графики, выбирать язык интерфейса, а также размеры графиков.

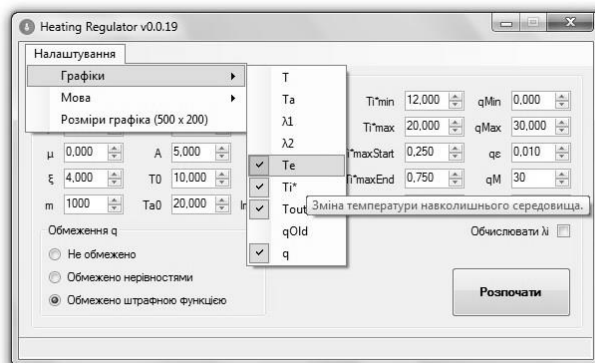


Рис. 2. Меню настроек программы

Результаты вычислений заносятся в электронную таблицу рис. 3, а также представлены в виде графиков рис. 4–7.

Microsoft Excel - Книга1

Файл Правка Вид Вставка Формат Сервис Данные Окно Справка

Аrial Cyr 10 Ж К У

G29 13,1765522504943

|    | A        | B        | C  | D  | E        | F  | G          | H        |
|----|----------|----------|----|----|----------|----|------------|----------|
| 1  | Назва    | Значення |    |    |          |    |            |          |
| 2  | q1       | 12,2713  |    |    |          |    |            |          |
| 3  |          |          |    |    |          |    |            |          |
| 4  | T        | Ta       | λ1 | λ2 | Te       | T* | Tout       | qOld     |
| 5  | 5,392594 | 15,30059 | 0  | 0  | -3       |    | 12,1402423 | 0,548772 |
| 6  | 5,394775 | 15,254   | 0  | 0  | -2,90576 |    | 12,1398543 | 0,553511 |
| 7  | 5,397422 | 15,2077  | 0  | 0  | -2,81155 |    | 12,1394694 | 0,558303 |
| 8  | 5,40053  | 15,16168 | 0  | 0  | -2,71741 |    | 12,1390876 | 0,563151 |
| 9  | 5,404091 | 15,11595 | 0  | 0  | -2,62337 |    | 12,1387088 | 0,568054 |
| 10 | 5,4081   | 15,0705  | 0  | 0  | -2,52946 |    | 12,1383331 | 0,573016 |
| 11 | 5,41255  | 15,02535 | 0  | 0  | -2,43572 |    | 12,1379604 | 0,578037 |

Итого: Итерация 49

Готово

Рис. 3. Меню настроек программы

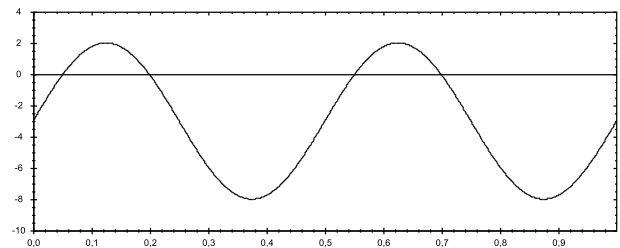


Рис. 4. График изменения температуры окружающей среды

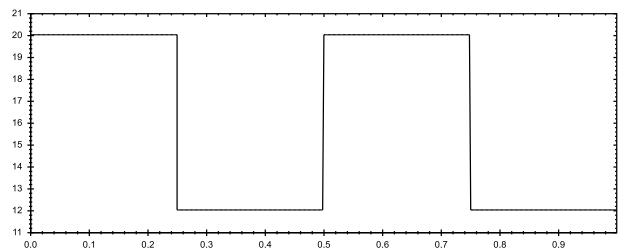


Рис. 5. Температурная программа РПО

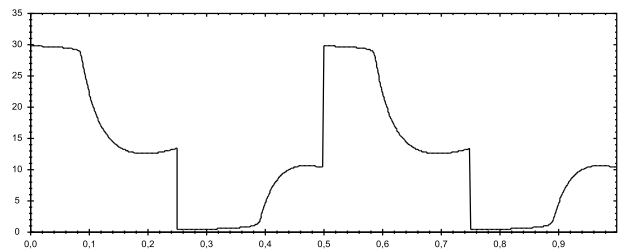


Рис. 6. Оптимальный режим изменения тепловой мощности при РПО

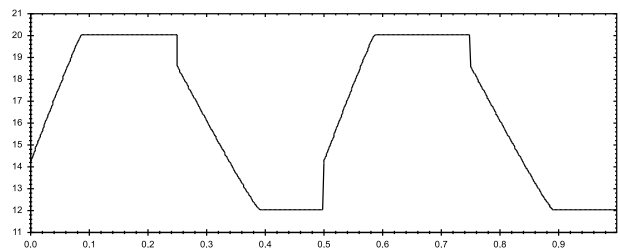


Рис. 7. График изменения температуры помещений

**Заключение.** Предложенное в работе программное обеспечение позволяет получать экспресс-оценки эффективности РПО. Высокая скорость вычислений, а

также наглядный интерфейс с широкими возможностями представления результирующей информации позволяют пользоваться настоящей программой на этапе предельного выбора параметров конструируемого помещения, обеспечивающего наилучшие сочетания параметров подобия здания по критериям комфортности и энергоэффективности. Полученные результаты компьютерного моделирования ориентированы на использование в автоматизированных индивидуальных пунктах.

#### Список літератури

1. Чекинато Л., Гастальделло А., Скибуола Л. Современная система управления температурным режимом отапливаемых помещений. *Энергосбережение*. 2007. № 6. С. 74–78.
2. Табунщиков Ю. А., Бродач М. М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. Москва: АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.
3. Панферов В. И., Анисимова Е. Ю. Анализ возможности экономии тепловой энергии при прерывистом режиме отопления. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2008. Вып. 6, № 12. С. 30–37.
4. Гершкович В. Ф. О возможности практической реализации регулирования теплоснабжения зданий методом периодического прерывания потока теплоносителя. *Новости теплоснабжения*. 2000. № 10. С. 16–23.
5. Васильев Г. П., Личман В. А., Песков Н. В. Численный метод оптимизации прерывистого режима отопления. *Математическое моделирование*. 2010. Том 22, № 11. С. 123–130.
6. Куценко А. С., Коваленко С. В., Товажнянский В. И. Анализ энергоэффективности прерывистого режима отопления здания. *Ползуновский вестник*. Барнаул: Из-во Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. 2014. № 1. С. 75–82.
7. Анисимова Е. Ю. Энергоэффективность теплового режима здания при использовании оптимального режима прерывистого отопления. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура»*. 2017. Вып. 15. С. 55–59.
8. Дацок Т. А., Ивлеву Ю. П., Пухкал В. А. Моделирование теплового режима жилых помещений при прерывистом отоплении. *Современные проблемы науки и образования*. 2017. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14698> (дата обращения: 10.04.2021)
9. Мишин М. А. Тепловой режим зданий. *Ползуновский вестник*. Барнаул: Из-во Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова. 2011. № 1. С. 104–115.
10. Куценко А. С., Товажнянский В. И. Комбинированная система автоматического управления тепловым состоянием здания с прогнозирующей моделью. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ» : зб. наук. пр. Сер.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 51(1272). С. 3–7.
11. Болтянский В. Г. *Математические методы оптимального управления*. Москва: Наука, 1966. 308 с.
12. Черноусько Ф. Л. *Вариационные задачи механики и управления*. Москва: Наука, 1973. 238 с.

#### References (transliterated)

1. Ceckinato L., Gastaldello A., Skibuola L. Sovremennaya sistema upravleniya temperaturym rezhimom otaplivaemykh pomeshchenii

[Modern control system for the temperature mode of heated rooms]. *Energoberezhnie* [Energy saving], 2007, no. 6, pp. 74–78 p.

2. Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M. *Matematicheskoe modelirovaniye i optimizatsiya teplovoi effektivnosti zdaniy* [Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings]. Moskva : AVOK-PRESS Publ., 2002. 194 p.
3. Panferov V. I., Anisimova E. Yu. Analiz vozmozhnosti ekonomii teplovoi energii pri preryvistom rezhime otopeniya [Analysis of the possibility of saving thermal energy with intermittent heating]. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Stroitel'stvo i arkhitektura"* [Bulletin of SUSU. Series "Construction and Architecture"], 2008, issue 6, no 12, pp. 30–37.
4. Gerskhovich V. F. O vozmozhnosti prakticheskoi realizatsii regulirovaniya teplopotrebleniya zdaniy metodom periodicheskogo preryvaniya potoka teplonositelya [On the possibility of practical implementation of the regulation of heat consumption in buildings by the method of periodic interruption of the heat carrier flow.]. *Novosti teplosnabzheniya* [Heat supply news], 2000, no 10, pp. 16–23.
5. Vasil'ev G. P., Lichman V. A., Peskov N. V. Chislennyi metod optimizatsii preryvistogo rezhima otopeniya [Numerical optimization method for intermittent heating]. *Matematicheskoe modelirovaniye* [Mathematical modeling], 2010, issue 22, no 11, pp. 123–130.
6. Kutsenko A. S., Kovalenko S. V., Tovazhnyanskyy V. I. Analiz energoeffektivnosti preryvistogo rezhima otopeniya zdaniya [Energy efficiency analysis of intermittent heating of a building]. *Polzunovskii vestnik* [Polzunovsky Bulletin]. Barnaul: Polzunov Altai State Technical University Publ., 2014, no 1. pp. 75–82.
7. Anisimova E. Yu. Energoeffektivnost' teplovogo rezhima zdaniya pri ispol'zovaniya optimal'nogo rezhima preryvistogo otopeniya [Energy efficiency of the thermal regime of the building using the optimal intermittent heating regime]. *Vestnik YuUrGU. Seriya "Stroitel'stvo i arkhitektura"* [Bulletin of SUSU. Series "Construction and Architecture"], 2017, no. 15, pp. 55–59.
8. Datsyuk T. A., Ivlev Yu. P., Pukhkal V. A. Modelirovaniye teplovogo rezhima zhilykh pomeshchenii pri preryvistom otopenii [Modeling the thermal mode of residential buildings with intermittent heating]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education]. 2017, no 5. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=14698> (accessed 10.04.2021).
9. Mishin M. A. Teplovoi rezhim zdaniy [Thermal mode of buildings]. *Polzunovskii vestnik* [Polzunovsky Bulletin]. Barnaul: Polzunov Altai State Technical University Publ., 2011, no 1. pp. 104–115.
10. Kutsenko A. S., Tovazhnyanskyy V. I. Kombinirovannaya sistema avtomaticheskogo upravleniya teplovym sostoyaniem zdaniya s prognoziruyushchei model'yu [Combined system of automatic control of the thermal state of a building with a predictive model]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2017, no. 51 (1272), pp. 3–7.
11. Boltyanskii V. G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya* [Optimal control mathematical methods]. Moscow: Nauka Publ., 1966. 308 p.
12. Chernous'ko F. L. *Variatsionnye zadachi mekhaniki i upravleniya* [Variational problems of mechanics and control]. Moscow: Nauka Publ., 1973. 238 p.

Поступила (received) 22.04.2021

#### Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

**Товажнянський Володимир Ігорович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8293-4047; e-mail: vtovazhnianskyi@gmail.com.

**Товажнянский Владимир Игоревич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант; г. Харьков, Украина; ORCID: 0000-0002-8293-4047; e-mail: vtovazhnianskyi@gmail.com.

**Tovazhnyanskyy Vladimir Igorovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", graduate student; Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8293-4047; e-mail: vtovazhnianskyi@gmail.com

# УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ОРГАНИЗАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

### MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS

УДК 004.272.34

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.01.07

**Ю. Л. ПРОНЧАКОВ**

#### МОДЕЛЮВАННЯ РОЗТАШУВАННЯ ВІРТУАЛЬНОГО РОЗПОДІЛЕНОГО ВИРОБНИЦТВА В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ РОЗВИТКУ ПІДПРИЄМСТВА

Ставиться та вирішується задача дослідження підприємств при розміщенні їх на нових площах. Актуальність задачі пов'язана з моральним та фізичним старінням виробничих систем, що призводить до необхідності їх модернізації та реінжинірингу. Для розвитку підприємства потрібні нові площі для розміщення сучасного технологічного обладнання. Через диверсифікацію діяльності підприємства і появи нових замовлень доцільно на нових площах розміщувати сучасні виробничі лінії з високим ступенем автоматизації. Вимоги щодо організації нових виробництв, з урахуванням концепції Industry 4.0, призвели до створення підприємств у вигляді віртуальних виробництв, які орієнтовані на створення нових інноваційних виробів. Ціллю роботи є розробка моделей раціонального розміщення віртуального виробництва на нових площах в умовах обмежених можливостей підприємства. З-за складності задачі, що вирішується, дослідження проводиться у три етапи: оптимізація розміщення на земній поверхні; формування комунікаційної інфраструктури віртуального виробництва; моделювання виробничого циклу віртуального підприємства. Раціональне розміщення віртуального виробництва проводиться з використанням як локальної, так і багатокритеріальної оптимізації. Для формування комунікаційної інфраструктури віртуального підприємства здійснюється вибір оптимальної траси прокладки магістралі. Моделювання виробничого циклу здійснюється з урахуванням часових затримок та черг при виконанні технологічних операцій. Новим науковим результатом є рішення задачі розміщення віртуальної виробничої системи на земній поверхні з урахуванням запропонованих показників та обмежень, які включають вартість оренди (придбання) земельних ділянок, а також витрати, пов'язані з проведенням земельних та будівельних робіт. Використані математичні методи: цілочисельна оптимізація, імітаційне моделювання, агентне моделювання.

**Ключові слова:** віртуальне підприємство, оптимізація розміщення технологічних об'єктів, комунікаційна інфраструктура підприємства, імітаційне моделювання, агентне моделювання.

**Ю. Л. ПРОНЧАКОВ**

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗВИТИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ

Ставится и решается задача исследования предприятий при размещении их на новых площадях. Актуальность задачи связана с моральным и физическим старением производственных систем, что приводит к необходимости их модернизации и реинжиниринга. Для развития предприятия требуются новые площади для размещения современного технологического оборудования. Из-за диверсификации деятельности предприятия и появления новых заказов целесообразно на новых площадях размещать современные производственные линии с высокой степенью автоматизации. Требования по организации новых производств, с учетом концепции Industry 4.0, привели к созданию предприятий в виде виртуальных производств, ориентированных на создание новых инновационных изделий. Целью работы является разработка моделей рационального размещения виртуального производства на новых площадях в условиях ограниченности возможностей предприятия. Из-за сложности решаемой задачи, исследование проводится в три этапа: оптимизация размещения на земной поверхности; формирование коммуникационной инфраструктуры виртуального производства; моделирование производственного цикла виртуального предприятия. Рациональное размещение виртуального производства проводится с использованием как локальной, так и многокритериальной оптимизации. Для формирования коммуникационной инфраструктуры виртуального предприятия осуществляется выбор оптимальной трассы прокладки магистрали. Моделирование производственного цикла осуществляется с учетом временных задержек и очередей при выполнении технологических операций. Новым научным результатом является решение задачи размещения виртуальной производственной системы на земной поверхности с учетом предложенных показателей и ограничений, которые включают стоимость аренды (приобретения) земельных участков, а также расходы, связанные с проведением земельных и строительных работ. Используются математические методы: целочисленная оптимизация, имитационное моделирование, агентное моделирование.

**Ключевые слова:** виртуальное предприятие, оптимизация размещения технологических объектов, коммуникационная инфраструктура предприятия, имитационное моделирование, агентное моделирование.

**Yu. L. PRONCHAKOV**

#### SIMULATION OF VIRTUAL DISTRIBUTED PRODUCTION LOCATION UNDER CONDITIONS OF LIMITED POSSIBILITIES OF ENTERPRISE DEVELOPMENT

The task to research the enterprises when locating them in the new areas is posed and solved. The relevance of the problem is related to both moral and physical aging of production systems, which leads to the need for their modernization and reengineering. For the development of the enterprise, new areas are required to accommodate modern technological equipment. Due to the diversification of the company's activities and the appearance of new

orders, it is advisable to place modern production lines with a high degree of automation in new areas. The requirements for the organization of new industries, taking into account the concept of Industry 4.0, have led to the creation of enterprises in the form of virtual industries focused on the creation of new innovative products. The aim of the work is to develop models for the rational location of virtual production in the new areas in conditions of limited enterprise capabilities. Due to the complexity of the problem being solved, the study is carried out in three stages: optimization of location on the earth's surface; creation of the communication infrastructure for virtual production; simulation of the virtual enterprise production cycle. The efficient location of virtual production is carried out using both local and multicriteria optimization. In order to create the communication infrastructure of the virtual enterprise the selection of the optimal route for highway laying is carried out. Simulation of the production cycle is carried out considering time delays and queues when performing technological operations. The new scientific result is the solution of the problem of virtual production system locating on the earth's surface, taking into account the proposed indicators and restrictions, which include the cost of land plots renting (acquiring), as well as the costs associated with earth and construction works. Mathematical methods were used: integer optimization, simulation modeling, agent-based modeling.

**Keywords:** virtual enterprise, optimization of technological objects location, communication infrastructure of the enterprise, simulation modeling, agent-based modeling.

**Вступ.** Віртуальна виробнича система (ВВС) повинна відповідати вимогам концепції Industry 4.0, для чого необхідно для її реалізації рішення цілого ряду проблем [1, 2]. Одна з проблем пов'язана з раціональним розміщенням нових виробничих та технологічних об'єктів, які входять до складу ВВС [3, 4]. Актуальність проблеми, що розглядається, пов'язана з необхідністю впровадження інноваційних рішень за новими технологічними процесами у вигляді технологічних об'єктів з роботизованими лініями з інтелектуальним інформаційним управлінням [5]. Найчастіше, економічно недоцільно робити модернізацію старих, морально та фізично застарілих виробничих та технологічних об'єктів [6]. Тому актуальна тема пропонованої публікації який ставиться та вирішується задача раціонального розташування об'єктів віртуальній виробничій розподіленій системи на нових площах з урахування обмежених можливостей підприємства, що розвивається.

**Постановка та ціль задачі дослідження.** Ціллю роботи є дослідження раціонального розташування виробничих та технологічних об'єктів віртуальної виробничої системи на нових площах виходячи з потреб розвитку підприємства, які виникають при прогнозуванні та формуванні нових портфелів замовлень [7].

При розміщенні нових виробничих та технологічних об'єктів ВВС, необхідно враховувати використання дорогого земельного ресурсу, який, у подальшому, необхідно орендувати (придбати) для проведення робіт пов'язаних з підготовкою земельних ділянок для організації виробництва. З-за складності запропонованої задачі для проведення розташування ВВС необхідно враховувати особливості земельних ділянок, складність технологічного обладнання, а також необхідність проведення інженерних робіт, пов'язаних зі створенням комунікаційної інфраструктури віртуального виробництва [8, 9].

Поставлена задача вирішується у три етапу.

1. Оптимізація розміщення виробничих та технологічних об'єктів на відокремлених площах для формування віртуальної виробничої системи.

2. Формування комунікаційних зв'язків між розміщеними виробничими та технологічними об'єктами віртуальної виробничої системи.

3. Моделювання виробничого циклу у віртуальній виробничій системі.

Оптимізація розміщення виробничих та технологічних об'єктів на відокремлених площах для формування віртуальної виробничої системи. Для вирішення задачі розміщення виробничих та технологічних об'єктів (ВТО) будемо використовувати наступні показники [10]:

- витрати на оренду (придбання) земельних ділянок для використання ВВС –  $Z$ ;
- витрати на проведення земельних та будівельних робіт, пов'язаних з підготовкою до розміщення ВТО –  $P$ ;
- витрати на розміщення та монтаж ВТО –  $W$ ;
- час витрачений на прив'язку та розміщення ВТО у новій ВВС –  $T$ ;
- ризики пов'язані з розташуванням ВВС на земельній поверхні (у тому числі екологічні) –  $R$ .

Для раціонального розміщення ВТО на земельних ділянках, скористаємося методом цілочисельного лінійного програмування з використанням булевих змінних [11]. Для вибору  $j$ -ї земельної ділянки (ЗД) для розміщення  $i$ -го ВТО булева змінна буде мати наступний вигляд:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо для } i - \text{го технологічного об'єкту} \\ \text{обрана } j - \text{та земельна ділянка;} \\ 0 - \text{в іншому випадку,} \end{cases}$$

При цьому

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1,$$

що значить обов'язковий вибір однієї ділянки під розміщення  $i$ -го ВТО, де  $m_i$  – кількість можливих земельних ділянок для розміщення  $i$ -го ВТО.

З урахуванням булевих змінних  $x_{ij}$  показники для вибору варіанту розміщення ВВС на земній поверхні будуть представлені у вигляді:

$$Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} z_{ij},$$

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} p_{ij},$$

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} w_{ij}, \quad (1)$$

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} t_{ij},$$

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} r_{ij},$$

де  $n$  – множина можливих ділянок для розміщення усіх ВТО, які входять до складу ВВС.

Для вирішення поставленої задачі необхідно провести оптимізацію як за окремими (локальними) показниками, так і за комплексним критерієм, до якого входять окремі показники. В якості прикладу локальної оптимізації розглянемо задачу мінімізації витрат, пов'язаних з орендою (придбанням) земельних ділянок для розміщення ВВС на земній поверхні.

Необхідно:

$$\min Z, Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} z_{ij},$$

з урахуванням вимог, пов'язаних з обмеженими можливостями підприємства, що розвивається:

$$P \leq P', P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} p_{ij},$$

$$W \leq W', W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} w_{ij},$$

$$T \leq T', T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} t_{ij}, \quad (2)$$

$$R \leq R', R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} r_{ij},$$

де  $Z', P', W', T', R'$  – максимально допустимі значення показників  $Z, P, W, T, R$ .

У результаті мінімізації локальних показників отримаємо оптимальні значення у вигляді  $Z^*, P^*, W^*, T^*, R^*$ .

Для вирішення багатокритеріальної задачі оптимізації у вигляді пошуку компромісного рішення за розміщення ВВС на земній поверхні з урахуванням допустимих значень усіх показників  $Z', P', W', T', R'$ , необхідно задати, з допомогою експертів (фахівців у галузі організації нових виробництв), «ваги»

(значимість) окремих показників  $\alpha_Z, \alpha_P, \alpha_W, \alpha_T, \alpha_R$ . При цьому:

$$\alpha_Z + \alpha_P + \alpha_W + \alpha_T + \alpha_R = 1. \quad (3)$$

Для пошуку компромісного рішення будемо використовувати найпростіше представлення комплексного показнику у вигляді згортки локальних показників (зважене адитивне представлення):

$$K = \alpha_Z \hat{Z} + \alpha_P \hat{P} + \alpha_W \hat{W} + \alpha_T \hat{T} + \alpha_R \hat{R} = 1, \quad (4)$$

де  $\hat{Z}, \hat{P}, \hat{W}, \hat{T}, \hat{R}$  – пронормовані значення показників (0...1) з урахуванням проведеної оптимізації за всіма локальними показниками  $Z, P, W, T, R$ :

$$\hat{Z} = \frac{Z - Z^*}{Z' - Z^*}, \hat{P} = \frac{P - P^*}{P' - P^*}, \hat{W} = \frac{W - W^*}{W' - W^*}, \quad (5)$$

$$\hat{T} = \frac{T - T^*}{T' - T^*}, \hat{R} = \frac{R - R^*}{R' - R^*}.$$

Необхідно знайти мінімальне значення комплексного показника:

$$\min K, K = \alpha_Z \hat{Z} + \alpha_P \hat{P} + \alpha_W \hat{W} + \alpha_T \hat{T} + \alpha_R \hat{R}, \quad (6)$$

з урахуванням вимог та обмежень:

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} = 1,$$

для усіх  $i=1 \dots n, Z \leq Z', P \leq P', W \leq W', T \leq T', R \leq R'$ .

**Формування комунікаційних зв'язків між розміщеними виробничими та технологічними об'єктами віртуальної виробничої системи.** Для формування комунікацій між окремими ВТО необхідно враховувати витрати, пов'язані з формуванням магістральних каналів, які зв'язують ВТО у єдину структуру ВВС. Ці витрати залежать від довжин магістралі  $v_{ije}$ , які зв'язують  $i$ -й та  $j$ -й ВТО по  $e$ -й трасі прокладки. Зв'язки між  $i$ -м та  $j$ -м ВТО представимо у вигляді матриці  $M$ , у якій на перетині  $i$ -ї строки та  $j$ -го стовбця стоїть 1, або 0, що вказує на наявність зв'язку виходу  $i$ -го ВТО зі входом  $j$ -го ВТО,  $i \neq j, i, j=1 \dots n$ , де  $n$  – кількість ВТО, які входять до складу ВВС.

Введемо булеву змінну  $u_{ije}$ :

$$u_{ije} = \begin{cases} 1 - \text{якщо для зв'язку } i \text{ та } j\text{-го ВТО} \\ \text{обрано } e\text{-й варіант траси,} \\ \text{який поєднує } i\text{-й та } j\text{-й вузли;} \\ 0 - \text{в іншому випадку,} \end{cases}$$

Тоді витрати на прокладку трас для комунікацій у вигляді магістралей, як поєднують між собою ВТО для забезпечення завдань управління та інформаційному обміну у віртуальному виробництві, будуть мати наступний вигляд:

$$Q = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{e=1}^{m_i} y_{ije} v_{ije} l_e, \quad (7)$$

де  $l_e$  – вартість прокладки 1 км траси для  $e$ -го варіанту траси прокладки.

Необхідно мінімізувати витрати  $Q$ , пов'язані з прокладкою траси для магістралей:

$$\min Q = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n y_{ije} v_{ije} l_e, \quad (8)$$

з урахуванням обмежень за строками виконання робіт, пов'язаних з організацією комунікаційних взаємодій між ВТО у ВВС:

$$S \leq S', S = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n y_{ije} S_{ije}, \quad (9)$$

де  $S_{ije}$  – час прокладки магістрального каналу по  $e$ -ій трасі прокладки, яка поєднує  $i$ -й та  $j$ -й вузол ВВС.

Після вирішення першої та другої задачі дослідження буде сформована архітектура ВВС (множина ВТО з комунікаційними зв'язками між ними), з урахування прив'язки об'єктів до земельних ділянок та можливими трасами для поєднання окремих ВТО за допомогою магістральних каналів.

**Моделювання виробничого циклу у віртуальній виробничій системі.** Для моделювання виробничого циклу ВВС будемо використовувати агентне імітаційне моделювання на платформі JADE [12]. Відокремимо наступні агенти у моделі:

1 – агент «генератор замовлень» ВВС;

2 – агент «технологічний маршрут», який відповідає за виконання замовлень щодо ВВС у вигляді послідовності ВТО, на яких виконуються основні технологічні операції;

3 – агент «часова затримка технологічних операцій (ТО)», який відповідає за час виконання основних технологічних операцій в окремих ВТО;

4 – агент «часова затримка транспортування вантажів (ТВ)», який відповідає за час транспортування вантажів між окремими ВТО при виконанні замовлення;

5 – агент «черга» відповідає за формування черг при обслуговуванні замовлень на окремих ВТО;

6 – агент «результати моделювання» (завантаження ВТО, простоювання ВТО, розмір черг, кількість виконаних замовлень, середній час виконання замовлення тощо);

7 – агент «монітор» відповідає за планування та реалізацію подій, пов'язаних з виконанням замовлень, керує системним часом у моделювання;

8 – агент «архітектура ВВС» відповідає за формування множини ВТО та зв'язків між ними.

На рис. 1 представлена структура агентної моделі.



Рис. 1. Структура агентної моделі

### Висновки, шляхи подальших досліджень.

Запропонований підхід доцільно використовувати на початкових етапах, пов'язаних з формуванням нових виробничих та технологічних об'єктів у вигляді віртуального виробництва, коли необхідно оцінити витрати, пов'язані з орендою (придбанням) земельних ділянок і їх підготовкою шляхом проведення земельних та будівних робіт для розміщення нових виробничих об'єктів, витрати пов'язані з формуванням комунікаційних зв'язків між виробничими та технологічними об'єктами віртуального виробництва, планувати строки виконання підготовчих робіт, оцінювати можливі ризики, пов'язані з розміщенням віртуальної виробничої системи на земній поверхні.

Подальші дослідження будуть присвячені завданню моделювання управлінських дій у віртуальній виробничій системі, логістичним взаємодіям між окремими підприємствами віртуальної системи, ризикам пов'язаним з довгими логістичними ланцюжками поставальників, ризиками, які виникають з-за можливих загроз та вразливостей у розподіленому віртуальному виробництві при виконанні нових замовлень.

### Список літератури

1. Lindgren M., Bandhold H. *Scenario Planning The link between future and strategy*. Palgrave Macmillan UK, 2002. 180 p. DOI: <https://doi.org/10.1057/9780230511620>.
2. Uskenbayeva R. K., Kurmangaliyeva B. K., Yedilkhan D. Situational Management for Process Implementation of Working Operations of the Business Process. *54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*. Hangzhou; China, 2015. P. 292–297. DOI: <https://doi.org/10.1109/SICE.2015.7285573>.
3. Paulsen S., Boens J. Summary of the Workshop on information and communication technologies supply chain risk management. *National Institute of Standards and Technology*, 2012. 21 p.
4. Fedorovich O., Uruskiy O., Pronchakov Yu., Lukhanin M. Method and information technology to research the component architecture of products to justify investments of high-tech enterprise. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2021. № 1 (97). С. 150–157. DOI: <https://doi.org/10.32620/rebs.2021.1.13>.
5. Xu X. et al. Transportation network redundancy: Complementary measures and computational methods. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018. Vol. 114. P. 68–85.
6. Федорович О. С. Прончаков Ю. Л. Метод формування логістичних транспортних взаємодій для нового портфелю замовлень розподіленого віртуального виробництва. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2020. № 2 (94). С. 102–108. DOI: <https://doi.org/10.32620/rebs.2020.2.09>.

7. Pawluczuk Ju. K проблеме управления производственными ресурсами предприятия. *Zarządzanie: Teoria i praktyka*. 2011. No. 1(3). P. 17–26.
8. Roszak M. T. Zarządzanie jakością w praktyce inżynierskiej. *Open Access Library*. 2014. Vol. 1 (31). 150 p.
9. Наконечний О. Аналіз умов та факторів, що впливають на ефективність функціонування системи логістики сил оборони держави. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2019. Т. 3, №. 55. С. 48–57.
10. Костина Л. П. Метод решения задачи оптимального распределения ресурсов на стохастических сетях со сложной пространственно-временной структурой. *Вестник Санкт-Петербургского университета*. 1992. Вып. 3 (№ 15). С. 36–43.
11. *Исследование операций. Т. 2.* / под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби. Москва: Мир, 1981. 677 с.
12. Кравец Р. О. Динамічна координація стратегій мультиагентних систем. *Бюлетень Національного університету «Львівська політехніка»*. 2011. № 699. С. 134–144.
- computer systems. 2021, vol. 1 (79), pp. 150–157. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2021.1.13>
5. Xu X. et al. Transportation network redundancy: Complementary measures and computational methods. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2018, vol. 114, pp. 68–85.
6. Fedorovich O. E., Pronchakov Yu. L. Metod formuvannya lohistychnykh transportnykh vza-yemodiy dlya novoho portfelyu zamovlen' rozpodileno-ho virtual'noho vyrobnytstva [Method of formation of logistic transport interactions for a new portfolio of orders of distributed virtual production]. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy - Radio electronic and computer systems*. 2020, no. 2, pp. 102–108
7. Pawluczuk Ju. K probleme upravleniya proizvodstvennymi resursami predpriyatiya [Problemy zarzadzania zasobami produkcyjnymi przedsiebiorstwa]. *Zarządzanie: Teoria i praktyka*, 2011, no. 1 (3), pp. 17–26.
8. Roszak M. T. Zarządzanie jakością w praktyce inżynierskiej. *Open Access Library*. 2014, vol. 1 (31). 150 p.
9. Nakonechny O. Analiz umov ta faktoriv, shcho vplyvayut' na efektyvnist' funktsionuvannya systemy lohistyky syl oborony derzhavy [Analysis of conditions and factors influencing the efficiency of the logistics system of the state defense forces]. *Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zvyazku. Zbirnyk naukovykh prats'*. 2019, vol. 3, no. 55, pp. 48–57.
10. Kostina L. P. Metod resheniya zadachi optimal'nogo raspredeleniya resursov na stokhasticheskikh setyakh so slozhnoy prostanstvenno-vremennoy strukturoy [Method for solving the problem of optimal resource allocation on stochastic networks with a complex space-time structure]. *Vestnik Sankt-Peterburskogo universiteta*. 1992, iss. 3, no. 15, pp. 36–43.
11. Mouders J., Elmagrabi S. ed. *Issledovaniye operatsiy. Vol. 2.* [Operations Research]. Moscow, Mir Publ., 1981. 677 p.
12. Kravets P. O. Dynamichna koordynatsiya stratehiy mul'tyahentnykh system [Dynamic coordination of multi-agent systems strategies]. *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"* / 2011, no. 699, pp. 134–144.

#### References (transliterated)

1. Lindgren M., Bandhold H. *Scenario Planning The link between future and strategy*. Palgrave Macmillan UK, 2002. 180 p. DOI: <https://doi.org/10.1057/9780230511620>.
2. Uskenbayeva R. K., Kurmangaliyeva B. K., Yedilkhan D. Situational Management for Process Implementation of Working Operations of the Business Process. *54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Hangzhou, China, 2015, pp. 292–297. DOI: <https://doi.org/10.1109/SICE.2015.7285573>.
3. Paulsen S., Boens J. Summary of the Workshop on information and communication technologies supply chain risk management. National Institute of Standards and Technology, 2012. 21 p.
4. Fedorovich O., Uruskiy O., Pronchakov Yu., Lukhanin M. Method and information technology to research the component architecture of products to justify investments of high-tech enterprise. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy - Radio electronic and*

Надійшло (received) 29.04.2021

#### Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

**Прончаков Юрій Леонідович** – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету програмної інженерії та бізнесу, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна, +380955773857, +380506378768, e-mail: [pronchakov@gmail.com](mailto:pronchakov@gmail.com).

**Прончаков Юрий Леонидович** – кандидат технических наук, доцент, декан факультета программной инженерии и бизнеса, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, +380955773857, +380506378768, e-mail: [pronchakov@gmail.com](mailto:pronchakov@gmail.com).

**Pronchakov Yuri Leonidovich**, – Candidate of Technical Sciences PhD, Associate Professor, Dean of the Software Engineering and Business Faculty, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”; Kharkiv, Ukraine, +380955773857, +380506378768, e-mail: [pronchakov@gmail.com](mailto:pronchakov@gmail.com).

## МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

## MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

UDC 004.9

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.01.08

S. V. OREKHOV, H. V. MALYHON

## MODELLING SEMANTIC KERNEL OF WEB RESOURCE

The article presents an attempt to describe mathematically the effect of the semantic kernel of a web resource on the Internet. In accordance with the theory of marketing, the product that we want to sell on the network is characterized by the following basic properties: price, time and place. In other words, a potential buyer wants to receive a given product in the right place at a given time. To satisfy this need, it is necessary to use the classic component of marketing, product promotion. However, this component is now becoming a fully virtual instrument. This tool functions in a hypertext, video and image environment. Therefore, the user analyzes the meaning of these elements in order to get the desired product. The results of web projects carried out in this area indicate the emergence of a new phenomenon, which reflects the main meaning of virtual promotion – this is the semantic core. The core is a short annotation of the main properties of the product, its location and time of appearance. Therefore, the purpose of this article is both a presentation of a new object of research and a mathematical description. It is assumed that the semantic core is formed on the basis of natural language terms. In other words, the semantic core is a set of keywords that are grouped by meaning. We propose to use data mining approaches for clustering to group terms. The classic clustering method at the moment is *k*-means. The article presents a model of the semantic core based on this method. This method and its distance function are considered as the second stage of web content processing. At the first stage, web content is converted into a semantic web. However, the *k*-means technique has significant drawbacks when modeling the semantic core. Therefore, in the development of this idea, the work shows an alternative way to modeling the kernel. As an alternative approach, the construction of clusters based on the concept of maximum flow is considered. This approach has the significant advantage that the type of links in the semantic network overlaps with the type of distance function in this method. As a result, on a real web project, the effect of the connection between the semantic core model and the level of new users of the web resource was demonstrated over the past five years.

**Keywords:** semantic kernel, keyword, *k*-means, max flow.

С. В. ОРЕХОВ, Г. В. МАЛИГОН

## МОДЕЛЮВАННЯ СЕМАНТИЧНОГО ЯДРА ВЕБ РЕСУРСУ

У статті представлена спроба описати математично ефект семантичного ядра веб ресурсу в середовищі Інтернет. Відповідно до теорії маркетингу продукт, який ми бажаємо продати в мережі, характеризуються такими основними властивостями: ціна, час і місце. Іншими словами потенційний покупець бажає отримати заданий товар в потрібному місці в заданий час. Щоб задовольнити цю потребу, треба використовувати класичну компоненту маркетингу просування товару. Однак зараз ця компонента стає повністю віртуальним інструментом. Цей інструмент функціонує в середовищі гіпертекстів, відео та зображень. Тому користувач аналізує зміст даних елементів, щоб отримати бажаний товар. Результати виконаних в цій області веб проектів свідчать про появу нового явища, яке відображає основний зміст віртуального просування – це семантичне ядро. Ядро являє собою коротку анотацію основних властивостей товару, його місце розташування і час появи. Тому метою даної статті є як презентація нового об'єкта дослідження, так і математичний опис. Передбачається, що семантичне ядро формується на основі термінів природної мови. Іншими словами семантичне ядро – це безліч ключових слів, які згруповані за змістом. Ми пропонуємо використовувати для угруповання термінів підходи технології Data mining по кластеризації. Класичним методом кластеризації на даний момент є *k*-середніх. У статті представлена модель семантичного ядра на основі даного методу. Цей метод і його функції дистанції розглядаються як другий етап обробки веб контенту. На першому етапі веб контент конвертується в семантичну мережу. Однак методика *k*-середніх має суттєві недоліки при моделюванні семантичного ядра. Тому в розвитку даної ідеї в роботі показаний альтернативний шлях до моделювання ядра. В якості альтернативного підходу розглядається побудови кластерів на основі концепції максимального потоку. Цей підхід має істотну перевагу, яке полягає в тому, що тип зв'язків в семантичній мережі перекується з типом функції дистанції в даному методі. В результаті на реальному веб проект продемонстрований ефект зв'язку між моделлю семантичного ядра і рівнем нових користувачів веб ресурсу протягом останніх п'яти років.

**Ключові слова:** семантичне ядро, ключове слово, метод *k*-середніх, максимальний потік.

С. В. ОРЕХОВ, Г. В. МАЛЫГОН

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО ЯДРА ВЕБ РЕСУРСА

В статье представлена попытка описать математически эффект семантического ядра веб ресурса в среде Интернет. В соответствии с теорией маркетинга продукт, который мы желаем продать в сети, характеризуются следующими основными свойствами: цена, время и место. Другими словами, потенциальный покупатель желает получить заданный товар в нужном месте в заданное время. Чтобы удовлетворить данную потребность, надо использовать классическую компоненту маркетинга продвижение товара. Однако сейчас эта компонента становится полностью виртуальным инструментом. Этот инструмент функционирует в среде гипертекстов, видео и изображений. Поэтому пользователь анализирует смысл данных элементов, чтобы получить желаемый товар. Результаты выполненных в этой области веб проектов свидетельствуют о появлении нового явления, которое отражает основной смысл виртуального продвижения – это семантическое ядро. Ядро

© S. V. Orekhov, H. V. Malyhon, 2021

представляет собой краткую аннотацию основных свойств товара, его местоположение и время появления. Поэтому целью данной статьи является как презентация нового объекта исследования, так и математическое описание. Предполагается, что семантическое ядро формируется на основе терминов естественного языка. Другими словами, семантическое ядро – это множество ключевых слов, которые сгруппированы по смыслу. Мы предлагаем использовать для группировки терминов подходы технологии Data mining по кластеризации. Классическим методом кластеризации на данный момент является  $k$ -средних. В статье представлена модель семантического ядра на основе данного метода. Этот метод и его функции дистанции рассматриваются как второй этап обработки веб контента. На первом этапе веб контент конвертируется в семантическую сеть. Однако методика  $k$ -средних имеет существенные недостатки при моделировании семантического ядра. Поэтому в развитии данной идеи в работе показан альтернативный путь к моделированию ядра. В качестве альтернативного подхода рассматривается построения кластеров на основе концепции максимального потока. Этот подход имеет существенное преимущество, которое заключается в том, что тип связей в семантической сети переключается с типом функции дистанции в данном методе. В результате на реальном веб проекте продемонстрирован эффект связи между моделью семантического ядра и уровнем новых пользователей веб ресурса на протяжении последних пяти лет.

**Ключевые слова:** семантическое ядро, ключевое слово, метод  $k$ -средних, максимальный поток.

**Introduction.** The semantic kernel is a new concept based on the assumption that the modern Internet environment is a semantic global network [1–2]. We assume that every web resource on the web is a particle or book in a global virtual library. The challenge is to find knowledge in such a library. But there is another problem, in what place and how to place our knowledge, for example, about a product or service, so that this knowledge is found, read and accepted by potential customers.

Our scientific work is based on the assumption that since the Internet is a semantic network, and in terms of artificial intelligence, it is a kind of knowledge base. Together with the search server, the Internet can then be regarded as a kind of expert system. Therefore, for this system to function, it must be trained.

According to the classics, the learning process takes place in a mode with a teacher and without him [3]. The second option is the most acceptable in this situation, since we kind of directly invest knowledge into the system, which actually happens when a programmer creates and places a web resource on the network.

To train an expert system, three elements are required: a training method, a stopping criterion, and a training sample. We propose to consider the semantic core of the web resource as a training sample for our global semantic network.

We will assume that the semantic kernel of a web resource is a short annotation in the form of a set of keywords. These words define the main meaning of the web content of the web resource in question.

Then there is an urgent problem of automatic formation of such a semantic kernel. To solve it, it is required to propose a method for modeling the semantic core in mathematical or algorithmic form.

**Problem statement.** Let's assume that web content contains several semantic cores. Why? The fact is that, as a rule, a web resource is created with the aim of promoting one or more goods or services. In addition, if the current core does not provide a sufficient level of sales, then they try to either replace it or change it. Therefore, the content management system of a web resource contains several versions of web content. This is a typical situation for many content management systems: Wordpress, Opencart, Drupal, ModX, and others.

Thus, we believe that the semantic core is a certain cluster that combines keywords according to some marketing sales strategy. Then the problem of constructing a semantic core is formulated as the problem of identifying an unknown number of clusters or a clustering problem

when the finite number of clusters is unknown. In addition, we do not know the shape of the clusters, that is, semantic cores can contain a different number of keywords, and it is also possible to overlap.

Let us consider the  $k$ -means method as the basic algorithm for the formation of the semantic core. This approach meets almost all of the above requirements at the moment. In addition, it is convenient to consider it as the first attempt to solve the clustering problem. It is also convenient for software implementation.

Let it be  $X = \{x_i\}$  a set of keywords from web content.  $C = \{c_i\}$  is a set of cluster centers (semantic kernels). Then the measure of error:

$$E(X, C) = \sum_{i=1}^n \|x_i - c_i\|. \quad (1)$$

where  $c_i$  – closest to  $x_i$  cluster center.

In this case, the algorithm itself will include the following actions. The first step is to initialize the cluster centers  $C = \{c_i\}$ . We will assume that the centers of the clusters are those keywords (terms) that reflect either the names of goods and services, or related goods.

Until the belonging of the terms stops changing, we perform one of two actions. Determine the belonging of the term to the cluster by the formula (2). Next, determine the new center of the cluster by formula (3).

$$cluster_i = \arg \min_{c \in C} f(x_i, c). \quad (2)$$

where  $f(x_i, c)$  – distance function to cluster center.

$$c = \frac{\sum_{j=1}^{cluster_i=c} \hat{f}_j(x_i)}{\sum_{j=1}^{cluster_i=c} 1}. \quad (3)$$

where  $\hat{f}$  – the function of term definition as cluster center.

The main disadvantage of such an algorithm for constructing a semantic core is that the number of clusters must be known. However, this condition is not always feasible.

To fulfill this condition, we can use at the first stage the algorithm for constructing a semantic kernel proposed in [1]. As centers of clusters, we will take only those terms that have the maximum frequency of occurrence in the text, or that have the maximum number of links with other terms. There are two ways to define a function  $\hat{f}$ .

The function of the distance between the terms is also proposed to be selected on the basis of the semantic

network representing the web content. In this case, both the weight of the link and the number of edges between terms in the network can be taken into account. This will be the way to define the function  $f(x_i, c)$ .

**Proposed approach.** An alternative approach to constructing clusters of terms and, accordingly, semantic kernels will be the clustering technique based on the search for the maximum flow [4]. This approach does not require knowing the number of clusters in advance. In addition, the semantic network obtained at the first stage is a graph indicating, in essence, the weight of an edge. Therefore, it is proposed to use the following assumptions.

Let the semantic network  $SN = \{V_s, E_s\}$  obtained using the algorithm [1] be given.  $V_s$  – the set of vertices of the network, and  $E_s$  accordingly the set of its edges. We will understand the distance  $d(i, j)$  between two vertices  $i$  and  $j$ , as the weight of the edge that connects them. If there is no edge between the vertices, then the distance is infinite. Then the bandwidth of the edge  $(i, j)$  is represented as:

$$c(i, j) = \frac{1}{d(i, j)}. \quad (4)$$

We will consider a group of vertices with a beginning at the top  $s$  and end at the top  $t$  as the semantic kernel. This group of vertices is characterized by the maximum flow  $v$ . Stream this function, defined as follows:

$$f: E \rightarrow R^+. \quad (5)$$

The function (5) is being satisfied the conditions:

$$f(i, j) \leq c(i, j). \quad (6)$$

$$\sum_{A(i)} f(i, j) - \sum_{B(i)} f(j, i) = \begin{cases} v, i = s \\ 0, i \notin \{s, t\} \\ -v, i = t \end{cases} \quad (7)$$

$$A(i) = \{j \in V: (i, j) \in E\}. \quad (8)$$

$$B(i) = \{j \in V: (j, i) \in E\}. \quad (9)$$

To obtain the maximum flow, it is required to maximize the value under constraints (6)–(7). Then we will assume that the semantic kernel is a sub-network of the semantic network obtained by the algorithm [1], with the maximum flow in the sense of (5). In our case, the maximum flow should be interpreted as the maximum number of connections of the “isa” type. In other words, the maximum number of rules that bind terms in our semantic kernel [4].

The MaxFlow algorithm that implements this approach was presented in [4]. The paper proposes to apply this algorithm to the construction of a semantic kernel by clustering terms.

**Future work.** A significant drawback of the proposed approach to the construction of a semantic core is the insufficient consideration of the semantics of words and possible plot lines [5]. The advantage of the proposed approach is to take into account the relationship between

the terms by applying the algorithm [1]. The resulting semantic network is further processed.

As a continuation of the research, one should focus on the application of the genetic algorithm [6–8] and the presentation of the process of constructing a kernel based on the methods of hierarchical clustering [9–12].

The fact is that the semantic network obtained at the initial stage contains edges with different types of links: “isa”, “kindof” and “part of”. These links can be interpreted as rules between terms corresponding to different types of distance function: single link, full link and medium link [9–12].

**Summary.** The above approach was applied to the analysis of the semantic kernel of one of the sites of the project for the presentation of a psychological portrait of a personality. To do this, the data from the Google Analytics service was compared with the constructed semantic kernels. It turned out that in this project, the semantic kernel was created once, and then changed in 2017–2018 (figure 1).

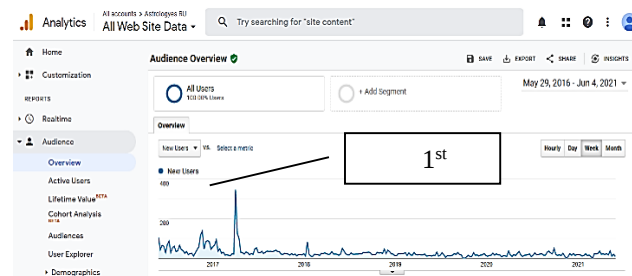


Fig. 1. Semantic kernel changes

As can be seen from the data in Figure 1, changing the kernel leads to a surge of interest in the web resource from new users. That is, the creation of a new version of the semantic kernel leads to the coverage of a certain group of users. Thus, the kernel reflects the interest of a given user group in this web content. Or in other words, this semantic kernel reflects the knowledge, wishes or preferences of a certain group of Internet users.

Consequently, this example confirms the assumption that the semantic kernel is a so-called training sample according to the assumption that in order to promote a product or service, we need to train the virtual space to recognize our web resource on the Internet.

Our research also shows how much the traffic of a web resource depends on such an effect as the aging of the semantic kernel [2].

## References

- Godlevsky M., Orekhov S., Orekhova E. Theoretical Fundamentals of Search Engine Optimization Based on Machine Learning. *CEUR–WS. CIIA*, 2017. № 1844, C. 23–32.
- Orekhov S., Malyhon H., Stratienco N., Goncharenko T. Software Development for Semantic Kernel Forming. *CEUR–WS. CIIA*, 2021. № 2870, C. 1312–1322.
- Amit K. *Artificial Intelligence and Soft Computing. Behavioral and Cognitive Modeling of the Human Brain*. CIIA: CRC Press LLC, 2000. 788 c.
- Коннов И. В., Кашина О. А., Гильманова Э. И. *Решение задачи кластеризации методами оптимизации на графах. Ученые записи Казанского университета. Сер. Физ.-матем. науки. Казань: Казанский университет. 2019. Т. 161, кн. 3. С. 423–437.*

5. Cherenkov I, Orekhov S. Approach for extracting events from news stream. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. Т. 1, № 4 (61), С. 62–64.
6. Preisach C., Burkhardt H., Schmidt-Thieme L., Decker R. *Data Analysis, Machine Learning and Applications*. Германия: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 703 с.
7. Han J., Kamber M., Pei J. *Data Mining Concepts and Techniques*. США: Morgan Kaufmann, 2012. 740 с.
8. Шумейко А. А., Сотник С. Л. *Интеллектуальный анализ данных. Введение в Data Mining*. Днепр: Белая Е. А., 2015. 223 с.
9. Уиллиамс У. Т., Ланс Д. Н. *Методы иерархической классификации. Статистические методы для ЭВМ*. Москва: Наука, 1986. С. 269–301.
10. Venugopal K. R., Srinivasa K. G. and Patnaik L. M. *Soft Computing for Data Mining Applications*. Германия: Springer, 2009. 354 с.
11. Witten Ian H., Frank E. *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques*. США: Morgan Kaufmann, 2009. 558 с.
12. Дюрбан Б. *Кластерный анализ*. Москва: Статистика, 1977. 128 с.
13. Замятин А. В. *Интеллектуальный анализ данных: учебное пособие*. Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2016. 120 с.
4. Konnov I. V., Kashina O. A., Gilmanova E. I. Reshenie zadachi klasterizatsii metodami optimizatsii na grafov [Solution of clusterization problem by graph optimization methods]. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki* [Scientific bulletin of Kazan University. Physical and Mathematical Series]. Kazan, Kazan University Publ., 2019, issue 161, no. 3, pp. 423–437.
5. Cherenkov I, Orekhov S. Approach for extracting events from news stream. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. vol. 1, no. 4 (61), pp. 62–64.
6. Preisach C., Burkhardt H., Schmidt-Thieme L., Decker R. *Data Analysis, Machine Learning and Applications*. Germany: Springer-Verlag Publ., 2008. 703 p.
7. Han J., Kamber M., Pei J. *Data Mining Concepts and Techniques*. USA: Morgan Kaufmann Publ., 2012. 740 p.
8. Shumeyko A.A., Sotnik S.L. *Intellektualnyy analiz dannuh. Vvedeniye v Data Mining* [Intelligent data analysis. Introduction in Data Mining]. Dnep: Belaya Publ., 2015. 223 p.
9. Willams U. T., Lans D. N. Metodu ierarhicheskoy klassifikatsii [Methods of hierarchical classification]. *Statistical methods of computer machine*. Moscow: Nauka Publ., 1986. pp. 269–301.
10. Venugopal K.R., Srinivasa K.G. and Patnaik L.M. *Soft Computing for Data Mining Applications*. Germany: Springer Publ., 2009. 354 p.
11. Witten Ian H., Frank E. *Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques*. USA: Morgan Kaufmann Publ., 2009. 558 p.
12. Duran B. *Klasternyy analiz* [Cluster analysis]. Moscow: Statistika Publ., 1977. 128 p.
13. Zamyatin A. V. *Intellektualnyy analiz dannuh. Uchebnoye posobie* [Intelligent data analysis: tutorial]. Tomsk: Tomsk state university Publ., 2016. 120 p.

## References (transliterated)

1. Godlevsky M., Orekhov S., Orekhova E. Theoretical Fundamentals of Search Engine Optimization Based on Machine Learning. *CEUR WS. USA*, 2017. vol. 1844, pp. 23–32.
2. Orekhov S., Malyhon H., Stratienco N., Goncharenko T. Software Development for Semantic Kernel Forming. *CEUR WS. USA*, 2021. vol. 2870, pp. 1312–1322.
3. Amit K. *Artificial Intelligence and Soft Computing. Behavioral and Cognitive Modeling of the Human Brain*. USA: CRC Press LLC Publ., 2000. 788 p.

Received 11.05.2021

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

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

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

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

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

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

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

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

### **МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЕС ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ**

Розроблені математичні моделі теплових процесів у формі Коші в просторі стану з відносними змінними парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку атомної електричної станції з ядерним реактором ВВЕР-1000 для використання моделей в інформаційній технології оптимізації управління парогенератором. Розглянуто робочі теплові процеси в парогенераторі ПГВ-1000, які пов'язані з підведенням до нього живильної води від системи водяної підготовки і теплоносія від ядерного реактора та відведенням пари у головний паровий колектор. Представлена розрахункова схема парогенератора, яка відображає робочі процеси в ньому під дзеркалом випаровування і над ним. На основі диференціальних рівнянь теплового балансу теплоносія в парогенераторі та в металевих теплообмінних трубках виконане моделювання теплопередачі від теплоносія до живильної води в парогенераторі. Розроблена модель теплопередачі у вигляді лінійної системи диференціальних рівнянь у відносних змінних стану. Розглянуті процеси пароутворення при нагріванні живильної води поверхню теплопередачі. Складені диференціальні рівняння і теплового балансу динамічних процесів пароутворення в парогенераторі, які не є рівняннями у формі Коші. Виконані перетворення диференціальних рівнянь матеріального і теплового балансу в парогенераторі до форми Коші. Отримана нелінійна система диференціальних рівнянь балансу пароутворення у відносних змінних стану. Обчислені значення постійних параметрів моделей для парогенератора ПГВ-1000. Математична модель теплових процесів в парогенераторі ПГВ-1000, яка представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь і включає процеси теплопередачі та пароутворення, за допомогою інформаційної технології оптимізації дозволить виконати ідентифікацію та оптимізацію системи управління парогенератором.

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

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

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ**

Разработаны математические модели тепловых процессов в форме Коши в пространстве состояния с относительными переменными парогенератора ПГВ-1000 энергоблока атомной электростанции с ядерным реактором ВВЭР-1000 для использования моделей в информационной технологии оптимизации управления парогенератором. Рассмотрены рабочие тепловые процессы в парогенераторе ПГВ-1000, связанные с подведением к нему питательной воды от системы водяной подготовки и теплоносителя от ядерного реактора и отводом пара в главный паровой коллектор. Представлена расчетная схема парогенератора, которая отражает рабочие процессы в нем под зеркалом испарения и над ним. На основе дифференциальных уравнений теплового баланса теплоносителя в парогенераторе и в металлических теплообменных трубках выполнено моделирование теплопередачи от теплоносителя к питательной воде в парогенераторе. Разработана модель теплопередачи в виде линейной системы дифференциальных уравнений в относительных переменных состоянии. Рассмотрены процессы парообразования при нагревании питательной воды поверхностью теплопередачи. Составлены дифференциальные уравнения материального и теплового балансов динамических процессов парообразования в парогенераторе, которые не являются уравнениями в форме Коши. Выполнены преобразования дифференциальных уравнений материального и теплового балансов в парогенераторе к форме Коши. Получена нелинейная система дифференциальных уравнений баланса парообразования в относительных переменных состоянии. Вычислены значения постоянных параметров моделей для парогенератора ПГВ-1000. Математическая модель тепловых процессов в парогенераторе ПГВ-1000, которая представлена в виде системы дифференциальных уравнений и включает процессы теплопередачи и парообразования, с помощью информационной технологии оптимизации позволит выполнить идентификацию и оптимизацию системы управления парогенератором.

**Ключевые слова:** атомная электростанция, парогенератор, тепловые процессы, математическая модель, дифференциальные уравнения, оптимизация, управление, информационная технология.

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

### **SIMULATION OF THERMAL PROCESSES OF A NPP STEAM GENERATOR FOR INFORMATION TECHNOLOGY OPTIMIZED CONTROL**

Mathematical models of thermal processes in the form of Cauchy in the state space with relative variables of the steam generator PGV-1000 of the power unit of a nuclear power plant with a nuclear reactor VVER-1000 have been developed for the using of models in information technology for optimizing the control of a steam generator. The working thermal processes in the PGV-1000 steam generator associated with the supply of feed water to it from the water treatment system and the coolant from the nuclear reactor and the removal of vapors to the main steam header are considered. The design diagram of the steam generator is presented, which reflects the working processes in it under the evaporation mirror and above it. On the basis of differential equations of the heat balance of the heat carrier in the steam generator and in the metal heat exchange tubes, the simulation of heat transfer from the heat carrier to the feed water in the steam generator is carried out. The heat transfer model in the form of a linear system of differential equations in relative state variables is developed. The processes of vaporization during heating of feed water by the heat transfer surface are considered. Differential equations of material and heat balances of dynamic processes of vaporization in a steam generator are compiled, which are not equations in the Cauchy form. Transformations of the differential equations of material and heat balances in the steam generator to the Cauchy form are carried out. A nonlinear system of differential equations for the balance of vaporization in relative state variables is obtained. The values of the constant parameters of the models for the steam generator PGV-1000 are calculated. The mathematical model of thermal processes in the PGV-1000 steam generator, which is presented in the form of a system of differential equations and includes the processes of heat transfer and steam generation, will make it possible to identify and optimize the steam generator control system with the help of information optimization technology.

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

**Вступ.** Енергоблоки атомних електричних станцій з ядерними реакторами ВВЕР-1000 експлуатуються на протязі десятиріч і потребують модернізації [1–5]. Парогенератор (ПГ) ПГВ-1000 є одним з найважливіших елементів енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000, у якому протікають складні теплові процеси, що можуть спричинити аварійні ситуації [6–9]. Тому моделювання теплових процесів парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку АЕС як об'єкта управління є актуальною задачею. Для можливості використання математичних моделей в інформаційній технології оптимізації управління моделі повинні бути в просторі стану відносних змінних у формі Коші, що дозволить розв'язати задачі ідентифікації та оптимізації параметрів моделей [10–12].

Мета даної статті полягає в розробці математичних моделей у формі Коші в просторі стану відносних змінних теплових процесів парогенератора ПГВ-1000 для використання моделей в інформаційній технології оптимізації управління.

Для досягнення поставленої мети розглянуто робочі процеси в парогенераторі ПГВ-1000 та представлена їх розрахункова схема, розглядаються теплові процеси в парогенераторі та виконується моделювання теплопередачі від теплоносія до живильної води в парогенераторі у вигляді системи диференціальних рівнянь (СДР), виконується перетворення рівнянь матеріального і теплового балансів пароутворення та будується нелінійна система диференціальних рівнянь балансу пароутворення у формі Коші в просторі стану відносних змінних.

**Розрахункова схема для моделювання парогенератора.** Робочий процес парогенератора ПГВ-1000 пов'язаний з підведенням до нього живильної води і теплоносія та відведенням пари [6]. Парогенератор як об'єкт управління поділяється на водяний і паровий акумулятори. Робоче середовище – живильна вода надходить у водяний акумулятор, де змінює свій агрегатний стан за рахунок тепла, яке передається поверхнею трубок теплоносія. Оскільки процес пароутворення відбувається по всьому об'єму трубних пучків, то під дзеркалом випаровування (ДВ) міститься пароводяна суміш, тобто паровий акумулятор частково знаходиться всередині водяного акумулятора. Іншу частину парового акумулятора утворює паровий простір над ДВ. Наявність пари у водяному акумуляторі ПГ обумовлює рух робочого середовища в циркуляційному контурі, який в свою чергу викликає перехід пари з парового акумулятора під ДВ в паровий акумулятор над ДВ [3, 6].

Розрахункова схема для моделювання парогенератора, що описує робочий процес, який в ньому відбувається, представлена на рис. 1 і включає рухомий в теплообмінних пучках теплоносії (ТН), метал теплообмінної поверхні, колектор подачі живильної води (ЖВ), водяний акумулятор ПГ, ДВ, паровий акумулятор під ДВ, паровий акумулятор над ДВ, вихід пари до головного парового колектора. Теплоносії – вода маси  $M_t$ , об'єму  $V_t$ , щільності  $\rho_t$  і середньою температурою  $t_t$  передає теплову потужність  $Q$  металу трубних пучків. Цей метал із загальною масою  $M_m$ ,

об'ємом  $V_m$ , густиною  $\rho_m$  та середньою температурою  $t_m$  передає теплову потужність  $Q_m$  через поверхню теплообміну площі  $F_m$  живильній воді, яка надходить в ПГ через колектор ЖВ і має масову витрату  $G_w$  та ентальпію  $j_w$ . При нагріванні маси води  $M_w$  об'єму  $V_w$  з щільністю  $\rho_w$ , середньою температурою  $t_w$  і ентальпією  $i_w$  частина води випаровується й у вигляді пари надходить з масовою витратою  $G_b$  в паровий акумулятор під ДВ, що має масу  $M_b$ , об'єм  $V_b$ , щільність  $\rho_s$  і ентальпію  $i_s$ . В результаті циркуляції пароводяної суміші під ДВ відбувається через ДВ площі  $F_c$  перехід пари з парового акумулятора під ДВ з масовою витратою  $G_a$  в паровий акумулятор над ДВ, що має масу  $M_a$ , об'єм  $V_a$ , щільність  $\rho_s$  і ентальпію  $i_s$ . Рівень ДВ характеризується абсолютною координатою рівня ДВ  $H_c$  і визначається об'ємом  $V_c$  пароводяної суміші під ДВ. Після виходу з ПГ насичена пара з масовою витратою  $G_s$  надходить в головний паровий колектор, а потім подається в парову турбіну.

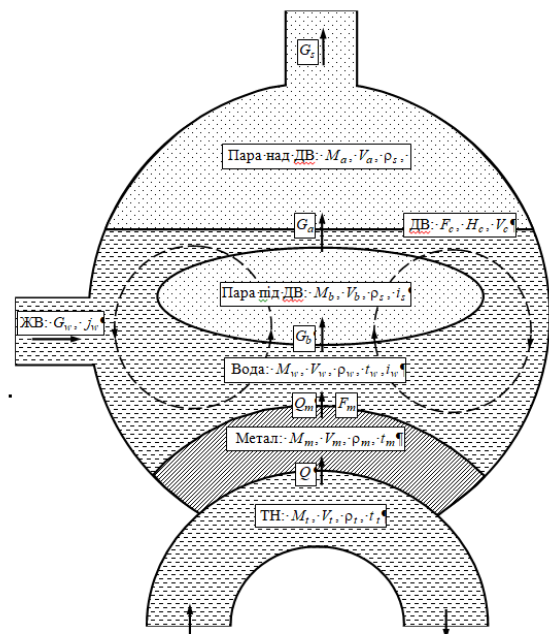


Рис. 1. Розрахункова схема парогенератора

**Моделювання теплопередачі від теплоносія до живильної води.** За розрахунковою схемою ПГ, представлена на рис. 1, розглянемо процес теплопередачі від теплоносія, що поступає від ядерного реактора, до живильної води в ПГ та складемо диференціальні рівняння теплового балансу, на підставі яких розробимо математичну модель процесу теплопередачі.

Всі трубки теплообмінного пучка ПГ представимо однією еквівалентною трубкою, яка представляється об'єктом з зосередженими параметрами – одним суцільним об'ємом теплоносія, оточеним металевою оболонкою. Маса теплоносія в еквівалентній трубці  $M_t$  дорівнює сумарній масі теплоносія у всіх трубках, її об'єм –  $V_t$ , щільність –  $\rho_t$ , середня температура –  $t_t$ . Маса металевої оболонки теплоносія  $M_m$  дорівнює

сумарній масі всіх металевих трубок, її об'єм –  $V_w$ , щільність –  $\rho_m$ , середня температура –  $t_m$  (рис. 1).

Приймемо допущення, що процеси передачі теплоти від теплоносія до металу еквівалентної трубки і від металу до живильної води в ПГ відбуваються без втрат, тому в статистиці  $Q_m = Q$  (рис. 1). Рух теплоносія в теплообмінних трубках турбулентний. Площі металевої поверхні з боку теплоносія і з боку живильної води в ПГ однакові й рівні  $F_m$ . При розгляді теплових процесів питомі теплоємності теплоносія  $c_t$  і металу  $c_m$  постійні. Також постійні коефіцієнти теплопровідності та коефіцієнти тепловіддачі [11]. Градієнтами температури за об'ємом теплоносія і товщиною металевих теплообмінних трубок нехтуємо. Теплові характеристики і щільності теплоносія та металу однорідні й не залежать від просторових координат.

Запишемо диференціальні рівняння (ДР) теплопередачі від теплоносія до живильної води. Замінюючи всі трубки протікання теплоносія в ПГ однією еквівалентною трубкою і вважаючи її об'єктом з зосередженими параметрами, запишемо рівняння теплового балансу теплоносія (рис. 1):

$$c_t M_t dt_t/d\tau = Q - \alpha_{tm} F_m (t_t - t_m), \quad (1)$$

де  $\alpha_{tm}$  – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до трубки. Нехтуючи градієнтом температури за товщиною трубки, запишемо рівняння теплового балансу еквівалентної трубки (рис. 1):

$$c_m M_m dt_m/d\tau = \alpha_{tm} F_m (t_t - t_m) - \alpha_w F_m (t_m - t_w), \quad (2)$$

де  $\alpha_w$  – коефіцієнт тепловіддачі від трубки до живильної води в ПГ.

Модель теплопередачі у відносних змінних. Перейдемо до відносних змінних:

$$\tau = t/t_b, \quad q = Q/Q_b, \quad \theta_t = t_t/T_b, \quad \theta_m = t_m/T_b, \quad \theta_w = t_w/T_b, \quad (3)$$

де  $t_b$ ,  $Q_b$  і  $T_b$  – базові значення часу, теплової потужності та температури. Прирівнюючи в ДР (1) і (2) похідні до нуля, отримаємо статичні залежності:

$$Q = \alpha_{tm} F_m (t_t - t_m), \quad \alpha_{tm} F_m (t_t - t_m) = \alpha_w F_m (t_m - t_w).$$

З цих залежностей маємо:

$$t_m = t_w + Q/(\alpha_w F_m), \quad t_t = t_m + Q/(\alpha_{tm} F_m). \quad (4)$$

У номінальному режимі середні температури металу трубки і теплоносія за формулами (4) приймають значення:

$$t_{0m} = t_{0w} + Q_0/(\alpha_w F_m), \quad t_{0t} = t_{0m} + Q_0/(\alpha_{tm} F_m).$$

При цьому

$$Q_0 = \alpha_{tm} F_m (t_{0t} - t_{0m}), \quad \alpha_{tm} F_m (t_{0t} - t_{0m}) = \alpha_w F_m (t_{0m} - t_{0w}).$$

З виразів (3) представимо температури через відносні змінні:

$$t = t_b \tau, \quad Q = Q_b q, \quad t_t = T_b \theta_t, \quad t_m = T_b \theta_m, \\ t_w = T_b \theta_w$$

Підставимо ці вирази в рівняння (1) і (2):

$$c_t M_t \frac{T_b d\theta_t}{t_b d\tau} = Q_b q - \alpha_{tm} F_m T_b (\theta_t - \theta_m),$$

$$c_m M_m \frac{T_b d\theta_m}{t_b d\tau} = \alpha_{tm} F_m T_b (\theta_t - \theta_m) - \alpha_w F_m T_b (\theta_m - \theta_w).$$

Розділимо обидва рівняння на коефіцієнти перед похідними лівих частин і позначимо постійні узагальнені параметри:

$$a_{tm} = \alpha_{tm} F_m t_b / c_t M_t, \quad b_{tq} = Q_b t_b / c_t M_t T_b, \quad (5)$$

$$a_{mt} = \alpha_{tm} F_m t_b / c_m M_m, \quad a_{mw} = \alpha_w F_m t_b / c_m M_m. \quad (6)$$

З цими параметрами отримаємо динамічну модель теплопередачі в відносних змінних у вигляді Коші:

$$d\theta_t/d\tau = b_{tq} q - a_{tm} (\theta_t - \theta_m), \quad (7)$$

$$d\theta_m/d\tau = a_{mt} (\theta_t - \theta_m) - a_{mw} (\theta_m - \theta_w). \quad (8)$$

Ця модель теплопередачі представляє лінійну СДР. Для номінального режиму початкові умови СДР нульові. Вхідною величиною служить зміна теплової потужності теплоносія, вихідною величиною – відносне значення середньої температури води. У табл. 1 представлені значення вихідних параметрів моделі теплопередачі (7) і (8), обчислених за формулами (5) і (6) на основі конструктивних і технологічних параметрів ПГВ-1000 [4–9].

Таблиця 1 – Параметри СДР теплопередачі

| Параметр | Значення | Параметр | Значення |
|----------|----------|----------|----------|
| $b_{tq}$ | 0,12     | $a_{tm}$ | 0,78     |
| $a_{mt}$ | 1,34     | $a_{mw}$ | 2,70     |

**Рівняння балансу робочого середовища.** Розглянемо процеси пароутворення при нагріванні живильної води поверхнею теплопередачі. Для цього складемо ДР матеріального і теплового балансів. На підставі цих рівнянь розробимо математичну модель процесу пароутворення.

Температура двофазної суміші в ПГ дорівнює температурі насичення і змінюється при зміні тиску. В ПГ швидкості робочого тіла, а отже, і перепади тиску, викликані гідравлічними опорами, відносно невеликі, тому вважаємо, що значення тиску  $p$  у всіх точках

робочого тіла всередині об'єму ПГ однакове. Крім того, вважаємо, що вся вода і вся пара в ПГ мають температуру, рівну температурі насичення  $t_w$  і залежну від тиску [3, 6].

Ентальпія  $i_w$  води в ПГ практично дорівнює ентальпії кипіння води при тиску  $p$  і температурі  $t_w$  на лінії насичення. Оскільки в ПГ живильна вода надходить з ентальпією  $j_w$ , відповідній великому недогріву до кипіння, вважаємо, що живильна вода доводиться до кипіння в ПГ за рахунок підігріву її теплом, поширюваним по металу трубок, і за рахунок змішування її з парою і водою під ДВ.

Кількісно пароутворення і рух пароводяної суміші в трубних пучках відбуваються по-різному по рядах трубок і по трубках одного ряду. Ці явища усереднимо, тобто замінімо трубні пучки однією трубою, еквівалентною всім пучкам за швидкостями руху робочого середовища і за об'ємом. Вважаючи, що функції зануреного дірчастого листа (ЗДЛ) по вирівнюванню навантаження ДВ і функції пристроїв сепарації пара частково виконуються усередненням значень параметрів ПГ, впливом ЗДЛ і пристроїв сепарації на динаміку ПГ нехтуємо.

Теплові характеристики та щільності частин води і пари однорідні та не залежать від просторових координат. У парових акумуляторах під і над ДВ щільність пари  $\rho_s$  і його ентальпія  $i_s$  однакові. Щільності води  $\rho_w$  і пари  $\rho_s$ , а також їх ентальпії  $i_w$  і  $i_s$  залежать тільки від тиску  $p$  на лінії насичення [3, 6].

Процеси продувки в ПГ та іншими втратами води і пари в ПГ нехтуємо, тому в статичних режимах виконується рівність масових витрат води і пари:  $G_w = G_b = G_a = G_s$ .

На зміну рівня в динамічних режимах впливають тільки гідравлічні і теплові процеси всередині ПГ, а також зміна теплової потужності теплоносія  $Q$  і масових витрат живильної води  $G_w$  і свіжої пари  $G_s$ . Стан ПГ повністю визначається середніми температурами теплоносія  $t_t$  і металу  $t_m$ , тиском  $p$  пароводяної суміші, об'ємами води  $V_w$  і пароводяної суміші  $V_c$ , а також витратою пари  $G_a$  через ДВ (рис. 1).

Рівень ДВ в ПГ, а також витрати живильної води і свіжої пари вимірюються датчиками без статичних і динамічних похибок. Статичні характеристики регулюючих клапанів лінійні.

Для моделювання динаміки ПГ використаємо рівняння маси, енергії та об'єму. Рівняння збереження маси речовини в ПГ [3, 6]

$$d(M_w + M_s)/dt = G_w - G_s - G_p, \quad (9)$$

де  $M_s$  – маса пари в ПГ;  $G_p$  – масова витрата на продувку.

Рівняння збереження енергії [3, 6]

$$d(M_w i_w + M_s i_s)/dt = Q_m + G_w j_w - G_s i_s - G_p i_w. \quad (10)$$

Оскільки сумарний об'єм води і пари в ПГ  $V$  постійний і  $V_m + V_m = V$ , то

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{M_w}{\rho_w} + \frac{M_s}{\rho_s} \right) = 0. \quad (11)$$

Величини  $i_w$ ,  $i_s$ ,  $\rho_w$ ,  $\rho_s$  є функціями тиску  $p$ . Після диференціювання лівих частин ДР (9)–(11) як складних функцій та після перетворень цих рівнянь отримаємо ДР:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K_{Gw}G_w - K_{Gp}G_p - K_{Gs}G_s + K_{Qm}Q_m}{K_{Vw}V_w + K_{Vs}V_s}, \quad (12)$$

$$dV_w/dt = (G_w - G_g - G_p - \rho_{sp}p_t V_w)/\rho_w, \quad (13)$$

$$dV_s/dt = (G_g - G_s - \rho_{sp}p_t V_s)/\rho_s, \quad (14)$$

$$G_g = \left[ Q_m - (i_{wp}\rho_w V_w + i_{sp}\rho_s V_s) p_t - G_w \Delta i_{ww} \right] / r_s, \quad (15)$$

$$dV_c/dt = [\rho_p p_t (V - V_s) - G_a - G_s] / \rho_s, \quad (16)$$

де  $K_{Gw}$ ,  $K_{Gp}$ ,  $K_{Gs}$ ,  $K_{Qm}$ ,  $K_{Vw}$ ,  $K_{Vs}$ ,  $\rho_{sp}$ ,  $i_{wp}$ ,  $i_{sp}$ ,  $r_s$  – постійні параметри, які обчислюються за параметрами рівнянь (9)–(11).

Отримано чотири ДР (12)–(14) та (16) для чотирьох невідомих функцій часу – тиску  $p(t)$ , об'єму води у водяному акумуляторі  $V_w(t)$ , об'єму пари в ПГ  $V_s(t)$  і об'єму пароводяної суміші під ДВ  $V_c(t)$ .

Рівняння балансу робочого середовища у відносних змінних. Введемо відносні змінні:

$$\pi_p = p/p_0, \quad \xi_w = V_w/V_{0w}, \quad \xi_s = V_s/V_{0s}, \quad \xi_c = \Delta h_c/h_{0c} \quad (17)$$

$$g_w = G_w/G_0, \quad g_s = G_s/G_0, \quad g_g = G_g/G_0, \quad g_a = G_a/G_0, \quad q_m = Q_m/Q_0, \quad (18)$$

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

В результаті перетворень рівнянь матеріального і теплового балансів ПГ (12)–(16) з позначеннями (17) і (18) отримані рівняння у відносних змінних:

$$\begin{cases} \pi_{pt} = \frac{b_{pw}g_w + b_{ps}g_s + q_m}{a_{pw}\xi_w + a_{ps}\xi_s}, & \frac{d\pi_p}{d\tau} = \pi_{pt}, \\ g_g = b_{gq}q_m - (a_{gw}\xi_w + a_{gs}\xi_s)\pi_{pt} - b_{gg}g_w, \\ d\xi_w/d\tau = b_{wg}(g_w - g_g) - a_{wp}\xi_w\pi_{pt}, \\ d\xi_s/d\tau = b_{sg}(g_g - g_s) - a_{sp}\xi_s\pi_{pt}, \\ d\xi_c/d\tau = (c_c - a_{cc}\xi_c)\pi_{pt} + b_{cg}(g_s - g_a). \end{cases} \quad (19)$$

Цій СДР відповідають початкові умови номінального режиму:

$$\pi_p(0) = 1, \quad \xi_w(0) = 1, \quad \xi_s(0) = 1, \quad \xi_c(0) = 0. \quad (20)$$

У табл. 2 представлені значення вихідних параметрів ПГ для рівнянь балансу (19), обчислених за формулами (5) і (6) на основі конструктивних і технологічних параметрів ПГВ-1000 [4–9].

Таблиця 2 – Параметри СДР балансу

| Параметр | Значення | Параметр | Значення |
|----------|----------|----------|----------|
| $b_{pw}$ | –0,119   | $a_{wp}$ | 0,048    |
| $b_{ps}$ | –0,881   | $b_{sg}$ | 0,125    |
| $a_{pw}$ | 19,080   | $a_{sp}$ | 1,120    |
| $a_{ps}$ | 7,540    | $c_c$    | 11,990   |
| $b_{gq}$ | 1,187    | $a_{cc}$ | 1,120    |
| $a_{gw}$ | 23,370   | $b_{cg}$ | 2,550    |
| $a_{gs}$ | –0,380   | $b_{gg}$ | 0,187    |
| $b_{wg}$ | 0,010    | –        | –        |

Отримані рівняння балансу (21) містять невідому відносно змінну витрати пари через ДВ  $g_a$ . Для її визначення потрібно розглянути процес циркуляції пароводяної суміші під ДВ.

**Висновки.** Дана стаття присвячена розробці математичних моделей теплових процесів у формі Коші в просторі стану відносних змінних парогенератора ПГВ-1000 для використання моделей в інформаційній технології оптимізації управління парогенератором. Результати проведених досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Розглянуто робочі процеси в парогенераторі ПГВ-1000, пов'язані з підведенням до нього живильної води і теплоносія та відведенням пари. Представлена розрахункова схема парогенератора, що відображає робочі процеси, що в ньому відбуваються.

2. На основі рівнянь теплового балансу теплоносія всередині парогенератора та металевих теплообмінних трубок виконане моделювання теплопередачі від теплоносія до живильної води в парогенераторі. Розроблено модель теплопередачі парогенератора у вигляді лінійної системи диференціальних рівнянь у відносних змінних стану та обчислені значення параметрів моделі теплопередачі для парогенератора ПГВ-1000.

3. Виконані перетворення диференціальних рівнянь матеріального і теплового балансів динамічних процесів пароутворення в парогенераторі. Отримана нелінійна система диференціальних рівнянь балансу пароутворення у відносних змінних стану та обчислені значення постійних параметрів цієї системи для парогенератора ПГВ-1000.

#### Список літератури

1. Иванов В. А. *Регулирование энергоблоков*. Ленинград: Машиностроение, 1982. 311 с.
2. Иванов В. А. *Эксплуатация АЭС: учебник для вузов*. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1994. 384 с.
3. Демченко В. А. *Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС*. Одесса: Астропринт, 2001. 305 с.

4. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. *Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций*. Москва: ИздАТ, 2002. 480 с.
5. Андрущенко С. А., Васильев Б. Ю., Генералов В. Н. и др. *АЭС с реакторами ВВЭР-1000*. Москва: Логос, 2010. 604 с.
6. Демченко В. А., Тодорцев Ю. К., Ложечников В. Ф. Математическая модель участка питания парогенератора ПГВ-1000. *Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сер.: Системный анализ, управление и информационные технологии*. Харьков: ХГПУ, 1999. Вып. 73. С. 133–138.
7. Ефимов А. В., Гончаренко Л. В., Потанина Т. В. и др. *Совершенствование и оптимизация моделей, процессов, конструкций и режимов работы энергетического оборудования АЭС, ТЭС и отопительных котельных*. Харьков: Підручник НТУ «ХПІ», 2013. 376 с.
8. Ефимов А. В., Пелипенко Н. Н. *Конструкции, материалы, процессы и расчеты реакторов и парогенераторов АЭС*. Харьков: Підручник НТУ «ХПІ», 2010. 307 с.
9. Ефимов А. В., Каверцев В. Л., Потанина Т. В., Гаркуша Т. А., Есипенко Т. А. Математическая модель горизонтального парогенератора типа ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вып.: Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2014. № 13(1056). С. 92–102.
10. Северин В. П., Никулина Е. Н., Трубочанова Н. В. Идентификация параметров системы управления производительностью парогенератора энергоблока АЭС. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Сер.: Автоматика та приладобудування*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2016. № 15 (1187). С. 38–44.
11. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вып.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2018. № 21 (1297). С. 8–13.
12. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В. Розробка інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вып.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 63–69.

#### References (transliterated)

1. Ivanov V. A. *Regulirovaniye energoblokov* [Regulation of power units]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 311 p.
2. Ivanov V. A. *Ekspluatatsiya AES: uchebnik dlya vuzov* [Operation of NPP: a textbook for universities]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1994. 384 p.
3. Demchenko V. A. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye texnologicheskikh processov AES i TES* [Automation and modeling of technological processes of NPP and TPP]. Odessa, Astroprint Publ., 2001. 305 p.
4. Denisov V. P., Dragunov Yu. G. *Reaktornyye ustanovki VVER dlya atomnykh elektrostantsiy* [Reactor installations of WWER for nuclear power plants]. Moscow, IzdAT Publ., 2002. 480 p.
5. Andrushechko S. A., Vasil'yev B. Yu., Generalov V. N. et al. *AES s reaktorami tipa VVER-1000* [NPPs with WWER-1000 reactors]. Moscow, Logos Publ., 2010. 604 p.
6. Demchenko V. A., Todorcev Yu. K., Lozhechnikov V. F. Matematicheskaya model' uchastka pitaniya parogeneratora PGV-1000 [Mathematical model of power supply section of steam generator PGV-1000]. *Vestnik Kharkovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravleniye i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University. Thematic issue: System analysis, control and information technology]. Kharkov, KhGPU Publ., 1999, issue 73, pp. 133–138.
7. Efimov A. V., Goncharenko L. V., Potanina T. V. et al. *Sovershenstvovaniye i optimizatsiya modeley, processov, konstruktсий i rezhimov raboty energeticheskogo oborudovaniya AES, TES i otopitel'nykh kotel'nykh* [Perfection and optimization of models, processes, designs and operating modes of power equipment of NPP,

- TPP and heating boilers]. Kharkiv, Pidruchnyk NTU "KhPI" Publ., 2013. 376 p.
8. Efimov A. V., Pelipenko N. N. *Konstruktzii, materialy, protsessy i raschety reaktorov i parogeneratorov AES* [Constructions, materials, processes and calculations of reactors and steam generators of NPP]. Kharkiv, Pidruchnyk NTU "KhPI" Publ., 2010. 307 p.
  9. Efimov A. V., Kavertsev V. L., Potanina T. V., Garkusha T. A., Esipenko T. A. *Matematicheskaya model' gorizontalnogo parogeneratora tipa PGV-1000 energobloka AES s VVER* [Mathematical model of a horizontal steam generator of the PGV-1000 type of the power unit of NPP with WWER]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Energetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustakuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Power and heat engineering processes and equipment]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 13 (1056), pp. 92–111.
  10. Severin V. P., Nikulina E. N., Trubchanova N. V. *Identifikatsiya parametrov sistemy upravleniya proizvoditel'nost'yu parogeneratora energobloka AES* [Identification of parameters of the control system of productivity of steam generator of the nuclear power]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Avtomatyka ta prykladobuduvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Automation and instrumentation]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 15 (1187), pp. 38–44.
  11. Nikulina E. N., Severin V. P., Kotsiuba N. V. *Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity* *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 21 (1297), pp. 8–13.
  12. Nikulina E. N., Severin V. P., Kotsiuba N. V. *Rozrobka informatsiynoi tekhnologii optymizatsii upravlinnya skladnymy dynamichnymy systemamy* [Development of information technology for optimizing the control of complex dynamic systems]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 63–69.

Надійшла (received) 20.04.2021

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

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

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

**Коцюба Ніна Вікторівна** – асистент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: [kotsuba.nv@gmail.com](mailto:kotsuba.nv@gmail.com)

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

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

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

**Коцюба Нина Викторовна** – асистент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: [kotsuba.nv@gmail.com](mailto:kotsuba.nv@gmail.com)

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

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

**Severin Valerii Petrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department System Analysis and Information-Analytical Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: [severinvp@gmail.com](mailto:severinvp@gmail.com)

**Kotsiuba Nina Viktorivna** – Assistant of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: [kotsuba.nv@gmail.com](mailto:kotsuba.nv@gmail.com)

**Bubnov Anton Ihorovich** – student of Department Computer mathematics and data analysis National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: [Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua](mailto:Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua)

*А. С. МАЗМАНИШВИЛИ, Н. Г. РЕШЕТНЯК***ПРОДОЛЬНАЯ ЛОВУШКА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ МАГНИТНОГО СОЛЕНОИДАЛЬНОГО ПОЛЯ**

Рассмотрено цилиндрическое магнитное поле двухмодового вида, потенциал которого имеет минимум. Объектом данной работы является изучение параметров электронного пучка при его движении в соленоидальном поле с продольной ловушкой, образованной магнитным полем, и построение вычислительной модели движения электронного потока. Поставлена задача об устойчивости движения электронов в таком соленоидальном магнитном поле. Изучена возможность получения колебательных режимов движения частиц. Получено, что для колебаний частиц с энергией в десятки килоэлектронвольт в потенциальной яме необходимо поле амплитудой в десятки тысяч Эрстед. Для соленоидального магнитного поля соленоида изучено формирование пучка электронов с энергией 55 кэВ в продольном и радиальном направлениях при его транспортировке. В качестве физического объекта использована секция магнетронной пушки. Одним из возможных направлений является комбинация двух согласованных магнитных систем пушки для создания потенциальной ямы магнитного поля. Показано, что для выбранных условий движению электронов можно сопоставить модель трехмерных осцилляций. В работе на основе гамильтонова формализма движения электронов в магнитном поле и алгоритма численного нахождения решений дифференциальных уравнений динамики построено программное средство, позволяющее получать массивы значений траекторий частиц в объеме. Использование программного средства дало возможность промоделировать основные зависимости движения электронного пучка в заданном двухмодовом соленоидальном магнитном поле. Представлены результаты численного моделирования траекторий электронов в градиентном магнитном поле с точечным вторичноэмиссионным катодом, расположенным в середине системы. Рассмотрено формирование пучка с энергией 55 кэВ в радиальном и продольном направлениях при его транспортировке в соленоидальном магнитном поле с большим градиентом. Для значительных временных интервалов показана возможность трехмерных колебаний и получены режимы работы магнитной системы, при которых частица испытывает устойчивые трехмерные осцилляции. Изучено влияние начальных условий при эмиссии на возникновение возвратно-колебательного эффекта. Показано, что при заданной энергии электрона и фиксированном магнитном поле параметром, определяющим отражение частицы, является полярный угол влета относительно оси цилиндрического магнитного поля. Исследована зависимость формирования итогового распределения частиц от амплитуды и градиента магнитного поля вдоль оси системы. Приводятся результаты численного моделирования по движению электронного потока. На основе модели движения электронного потока рассмотрены характеристики результирующего электронного пучка. Полученные результаты моделирования показывают на возможность в условиях эксперимента установить явление колебательно-возвратного продольного движения.

**Ключевые слова:** электронный пучок, магнетронная пушка, трехмерные колебания, динамика электронов, градиентное магнитное поле, математическое моделирование.

*О. С. МАЗМАНИШВИЛИ, М. Г. РЕШЕТНЯК***ПОЗДОВЖНЯ ПАСТКА ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПОТЕНЦІЙНІЙ ЯМІ МАГНІТНОГО СОЛЕНОІДАЛЬНОГО ПОЛЯ**

Розглянуто циліндричний магнітне поле двомодового виду, потенціал якого має мінімум. Об'єктом даної роботи є вивчення параметрів електронного пучка при його русі в соленоїдальному полі з поздовжньою пасткою, утвореної магнітним полем, і побудова обчислювальної моделі руху електронного потоку. Поставлено завдання про стійкість руху електронів в такому соленоїдальному магнітному полі. Вивчено можливість одержання коливальних режимів руху частинок. Отримано, що для коливальних частинок з енергією в десятки кілоелектронвольт в потенційній ямі необхідно поле амплітудою в десятки тисяч Ерстед. Для соленоїдального магнітного поля соленоида вивчено формування пучка електронів з енергією 55 кеВ в поздовжньому і радіальному напрямках при його транспортуванні. Як фізичний об'єкт використана секція магнетронної гармати. Одним з можливих напрямків є комбінація двох узгоджених магнітних систем гармати для створення потенційної ями магнітного поля. Показано, що для обраних умов руху електронів можна зіставити модель тривимірних осциляцій. У роботі на основі гамильтонового формалізму руху електронів в магнітному полі та алгоритму чисельного знаходження розв'язків диференціальних рівнянь динаміки побудовано програмний засіб, що дозволяє отримувати масиви значень траєкторій частинок в обсязі. Використання програмного засобу дало можливість промоделивати основні залежності руху електронного пучка в заданому двомодовому соленоїдальному магнітному полі. Представлені результати чисельного моделювання траєкторій електронів в градієнтному магнітному полі з точковим вторинноемісійним катодом, розташованим в середині системи. Розглянуто формування пучка з енергією 55 кеВ в радіальному і поздовжньому напрямках при його транспортуванні в соленоїдальному магнітному полі з великим градієнтом. Для значних часових інтервалів показана можливість тривимірних коливань і отримані режими роботи магнітної системи, при яких частка відчуває стійкі тривимірні осциляції. Вивчено вплив початкових умов при емісії на виникнення зворотно-коливального ефекту. Показано, що при заданій енергії електрона і фіксованому магнітному полі параметром, що визначає відображення частки, є полярний кут вльоту щодо осі циліндричного магнітного поля. Досліджено залежність формування підсумкового розподілу часток від амплітуди і градієнта магнітного поля уздовж осі системи. Наводяться результати чисельного моделювання по руху електронного потоку. На основі моделі руху електронного потоку розглянуті характеристики результирующего електронного пучка. Отримані результати моделювання показують на можливість в умовах експерименту встановити явище коливально-поворотного поздовжнього руху.

**Ключові слова:** електронний пучок, магнетрон гармата, тривимірні коливання, динаміка електронів, градієнтне магнітне поле, математичне моделювання.

*O. S. MAZMANISHVILI, M. G. RESHETNYAK***LONGITUDINAL TRAP OF ELECTRON BEAM IN POTENTIAL PIT MAGNETIC SOLENOIDAL FIELD**

A two-mode cylindrical magnetic field is considered, the potential of which has a minimum. The object of this work is the study of the parameters of an electron beam when it moves in a solenoid field with the longitudinal trap formed by the magnetic field, and the construction of the computational model of the motion of an electron beam. The problem is posed of the stability of the motion of electrons in such solenoid magnetic field. The possibility of obtaining oscillatory modes of particle motion has been studied. It was found that for oscillations of particles with an energy of tens of kiloelectronvolts in the potential well in a well, the field with the amplitude of tens of thousands of Oersteds is required. For the solenoid magnetic field of the solenoid, the formation of electron beam with an energy of 55 keV in the longitudinal and radial directions during its transportation is studied. A section of a

magnetron gun was used as the physical object. One possible direction is to combine the two matched magnetic systems of the gun to create the potential magnetic field well. It is shown that, for the chosen conditions, the motion of electrons can be associated with the model of three-dimensional oscillations. In this work, on the basis of the Hamiltonian formalism of the motion of electrons in a magnetic field and an algorithm for numerically finding solutions to the differential equations of dynamics, a software tool is constructed that allows one to obtain arrays of values of particle trajectories in the volume. The use of the software made it possible to simulate the main dependences of the motion of the electron beam in a given two-mode solenoid magnetic field. The results of numerical simulation of electron trajectories in the gradient magnetic field with the point secondary emission cathode located in the middle of the system are presented. The formation of the beam with energy of 55 keV in the radial and longitudinal directions during its transportation in a solenoid magnetic field with a large gradient is considered. For significant time intervals, the possibility of three-dimensional oscillations is shown and the operating modes of the magnetic system are obtained, in which the particle undergoes stable three-dimensional oscillations. The influence of the initial conditions during emission on the occurrence of the reciprocating oscillatory effect has been studied. It is shown that for a given electron energy and fixed magnetic field, the parameter that determines the reflection of a particle, is the polar angle of entry relative to the axis of the cylindrical magnetic field. The dependence of the formation of the final distribution of particles on the amplitude and gradient of the magnetic field along the axis of the system is investigated. The results of numerical simulation on the motion of the electron flow are presented. The characteristics of the resulting electron beam are considered on the basis of a model of electron flow motion. The obtained simulation results show that it is possible to establish the phenomenon of oscillatory-return longitudinal motion under experimental conditions.

**Keywords:** electron beam, magnetron gun, three-dimensional oscillations, electron dynamics, gradient magnetic field, mathematical modeling.

**Введение.** Электронные магнетронные пушки с холодными вторичноэмиссионными катодами перспективны для использования их при создании мощных СВЧ-приборов, в ускорительной технике в связи со стабильностью эмиссии катодов, высокой плотностью тока и т.д. [1, 2]. На основе магнетронной пушки был создан ускоритель электронов, который использует осевой электронный пучок для облучения металлических мишеней [3]. Как объект для проведения исследований магнетронная пушка имеет то преимущество, что, с одной стороны, она может быть модифицирована для проведения экспериментов различного типа, с другой стороны, несмотря на сложность выполнения аналитического исследования, – для получения количественных зависимостей является возможным использование вычислительных методов и сравнения числовых результатов с данными эксперимента. Одним из возможных направлений является комбинация двух согласованных магнитных систем пушки для создания потенциальной ямы магнитного поля [4, 5]. При выбранной глубине такой ямы движение помещенной в неё частицы будет устойчивым [6].

**Объектом** данной работы является изучение параметров электронного пучка при его движении в соленоидальном поле с продольной ловушкой, образованной магнитным полем, и построение модели движения электронного потока.

**Целью** исследования было создание модели движения электронного пучка с энергией в десятки кэВ в градиентном магнитном поле, изучение формирования траекторий электронов, зависимости динамики частиц от начальных условий и распределения магнитного поля вдоль оси системы. Приводятся результаты моделирования по движению электронного потока. Полученные результаты моделирования показывают на возможность в условиях эксперимента установить явление колебательно-возвратного продольного движения.

## 1. Методика исследований.

Усовершенствование магнетронной пушки, заключающееся в применении интенсивных магнитных полей с повышенным градиентом их напряженности, дает возможность рассмотреть новые явления в пространственной картине эволюции электронных пучков.

Ранее в ходе численных экспериментов [7] был обнаружен эффект обратного движения электронов в градиентном магнитном поле магнетронной пушки.

Распределение продольного магнитного поля  $H(z)$  вдоль оси системы и канала транспортировки которое использовалось при проведении численного моделирования, приведено на рис. 1. Источник электронов помещен в центре ( $z = 0$ ), при этом частицам сообщается энергия, равная 55 кэВ.

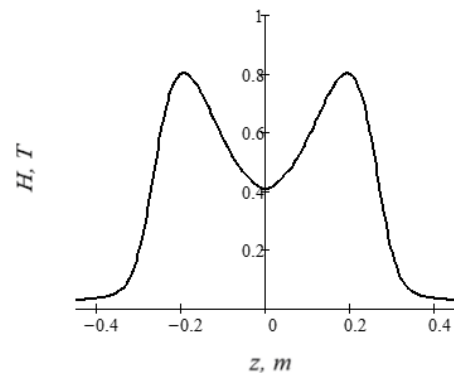


Рис. 1. Магнитное поле  $H$

На основе гамильтонова формализма движения электронов в магнитном поле построено программное средство, позволяющее провести численное моделирование динамики электронных потоков в градиентном магнитном поле. [7, 8].

## 2. Математическая модель.

Для построения математической модели решения воспользуемся аксиальной симметрией задачи. В полярной системе координат  $(r, z, \theta)$  используем гамильтониан электрона в магнитном поле в цилиндрической системе координат [9, 10]

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

где  $e_0$ ,  $m$  – заряд и масса покоя электрона,  $p_r$ ,  $p_z$ ,  $p_\theta$  – канонические импульсы,  $A$  – магнитный потенциал. Его с учетом азимутальной симметрии пока запишем в виде  $A(r, z) = Brf(z)$ , где  $f(z)$  – функция продольной координаты, которой распредимся ниже,

$B$  – напряженность магнитного поля в рассматриваемой точке. Уравнения движения для координат и импульсов имеют общий вид.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{r} = \frac{p_r}{m}, \\ \dot{z} = \frac{p_z}{m}, \\ \dot{\vartheta} = \frac{1}{m} \left( \frac{p_{\vartheta}}{r} - e_0 B r f(z) \right) \frac{1}{r}, \\ \dot{p}_r = \frac{1}{m} \left( \frac{p_{\vartheta}}{r} - e_0 B r f(z) \right) \left( \frac{p_{\vartheta}}{r} + e_0 B r f(z) \right), \\ \dot{p}_z = \frac{1}{m} \left( \frac{p_{\vartheta}}{r} - e_0 B r f(z) \right) \left( e_0 B r \frac{\partial}{\partial z} f(z) \right), \\ \dot{p}_{\vartheta} = 0. \end{array} \right. \quad (2)$$

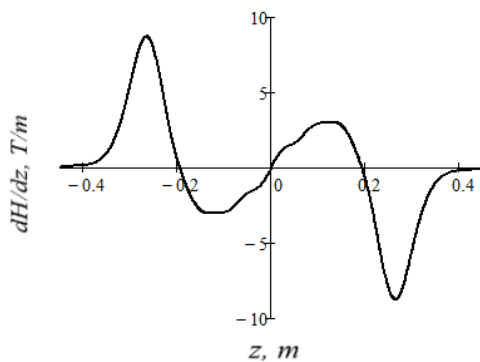


Рис. 2. Производная  $dH/dz$  магнитного поля  $H$

Как видно из уравнений (2), на формирование траектории частицы влияет как распределение магнитного поля  $H$  вдоль оси  $z$ , так и его производная  $dH/dz$  (рис. 2).

В системе (2) из 6 уравнений перейдем, используя скорость света  $c$ , от текущего времени  $t$  к переменной  $S = ct$  (длина пути, который прошла частица), производную по ней будем обозначать штрихом. Для канонических импульсов осуществим замену  $p_r = e_0 B q_r$ ,  $p_z = e_0 B q_z$ ,  $p_{\vartheta} = e_0 B q_{\vartheta}$ , тогда приходим к системе уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} r' = \mu q_r, \\ z' = \mu q_z, \\ \vartheta' = \mu \left( \frac{q_{\vartheta}}{r^2} - f(z) \right), \\ q_r' = \mu r \left( \frac{q_{\vartheta}}{r^2} - f(z) \right) \left( \frac{q_{\vartheta}}{r^2} + f(z) \right), \\ q_z' = \mu r^2 \left( \frac{q_{\vartheta}}{r^2} - f(z) \right) \frac{df(z)}{dz}, \\ q_{\vartheta}' = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

В уравнениях (3)  $\mu = e_0 B / mc$ ,  $Bf(z)$  – функция, описывающая напряженность магнитного поля вдоль оси  $z$ . Амплитуду  $B$  выбираем так, чтобы можно было пользоваться функцией  $Bf(z)$  на всем интервале

возможных значений  $z$ . К уравнениям (3) необходимо присоединить начальные условия для  $r_0$ ,  $z_0$ ,  $\vartheta_0$ , а также для  $q_{r0}$ ,  $q_{z0}$ ,  $q_{\vartheta0}$ . Устойчивость алгоритма решения связана с шагом  $\Delta s$  решения и параметром  $\mu$ . Тогда условие  $\mu \Delta s \ll 1$  будет выполняться, если  $\Delta s \ll 0.0001$  м. Итак, с вычислительной точки зрения задача может быть сформулирована как задача нахождения на заданном интервале решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с фиксированными начальными условиями. Это обеспечило возможность получения решений системы (3) в виде 6-мерных массивов, описывающих траектории.

### 3. Численное моделирование.

На рис. 3–5 приведены результаты численного моделирования траекторий электрона с энергией  $E = 55$  кэВ в градиентном соленоидальном магнитном поле, выполненные при начальных условиях  $z_0 = 0$  мм,  $r_0 = 21$  мм,  $\vartheta_0 = 0$  для полярного угла влета  $r_0' = -0.015$  в систему транспортировки. Далее

$$q_z|_0 = \frac{1}{\mu} \sqrt{\frac{2E}{E_0}}, \quad q_{\vartheta}|_0 = r_0^2 f(z_0) \quad (4)$$

( $E_0 = 511$  кэВ – энергия покоя). Результаты расчетов на этих рисунках приводятся для трех длин траектории электрона  $S = 0.0, 0.5, 1.0$  м.

На рис. 3–5: слева – траектория в объеме, посередине – зависимость продольной координаты  $z$  от пройденного пути  $S$ , справа – фазовая карта  $(z, r)$ .

Из рис. 3–5 видно, что с увеличением времени пролета (длины траектории) частица колеблется в объеме и удерживается. Трехмерные устойчивые осцилляции электрона осуществляются в районе минимума магнитного поля  $H(z)$ . В этом районе распределение поля вдоль оси может приближенно представлено параболической зависимостью по  $z$ . Продольные колебания электрона в дальнейшем многократно повторяются, что было проверено выполнением специальных расчетов при  $S = 30$  м.

При других выбранных углах  $r_0'$ , близких к  $r_0' = -0.015$ , их форма видоизменяется, но тип колебаний и их устойчивость остаются неизменными. Приведенным траекториям электронов можно сопоставить модель прохождения световых лучей в среде с градиентным коэффициентом преломления, зависящим от радиуса [5, 6, 11, 12].

**Выводы.** Из результатов моделирования следует, что при выбранных начальных условиях частиц регуляция начальных условий, в частности угла влета электронов, при заданной конфигурации градиентного магнитного поля с потенциальной ямой влияет на общие свойства движения пучка. Итак, при движении в канале транспортировки электрон испытывает устойчивые трехмерные колебания. Таким образом, показана возможность удержания частицы в яме, образованной магнитным соленоидальном поле с продольной ловушкой.

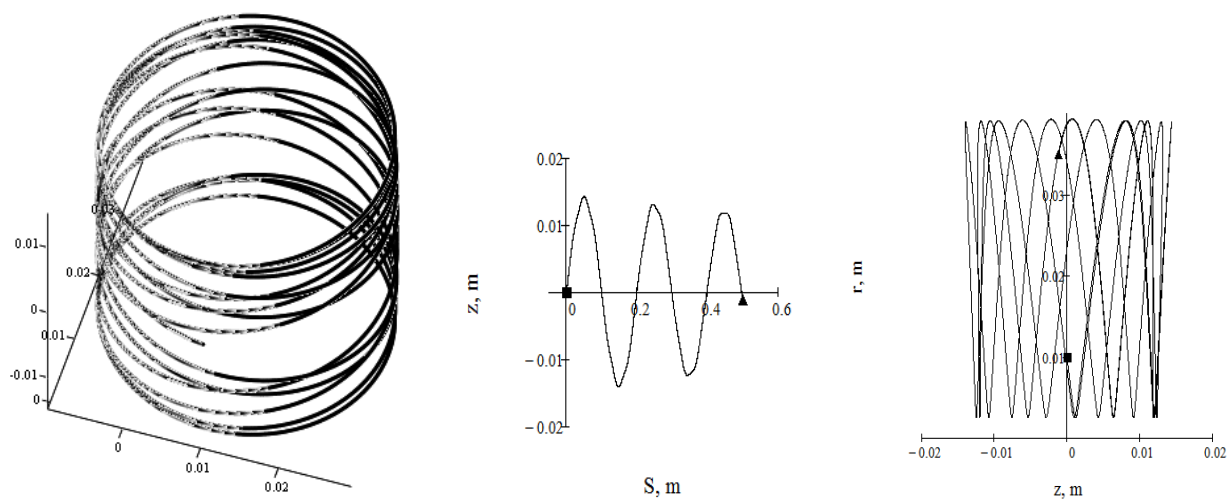


Рис. 3. Траектория электрона в градиентном магнитном поле; длина траектории  $S = 0.5$  м

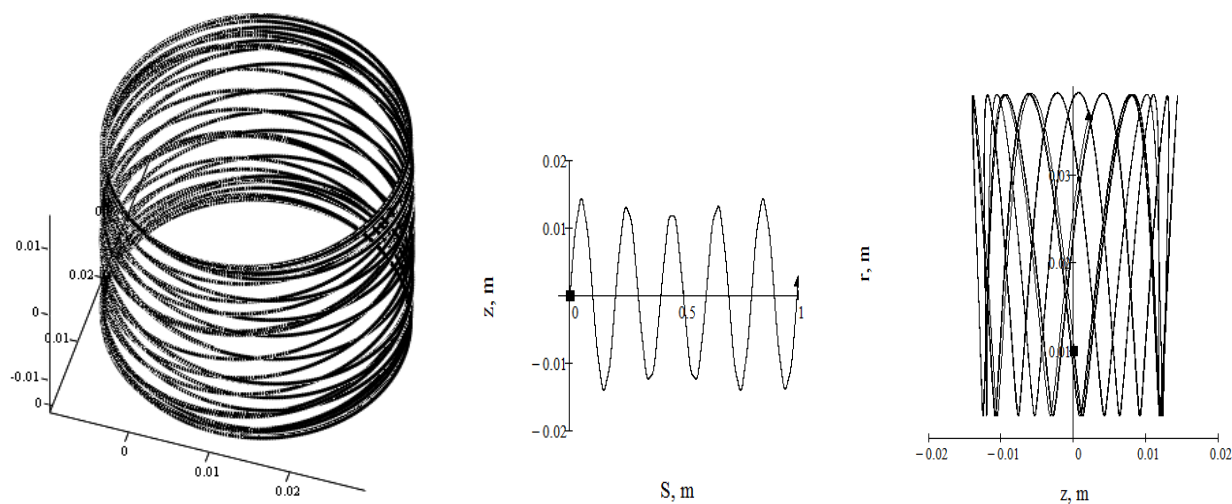


Рис. 4. Траектория электрона в градиентном магнитном поле; длина траектории  $S = 1.0$  м

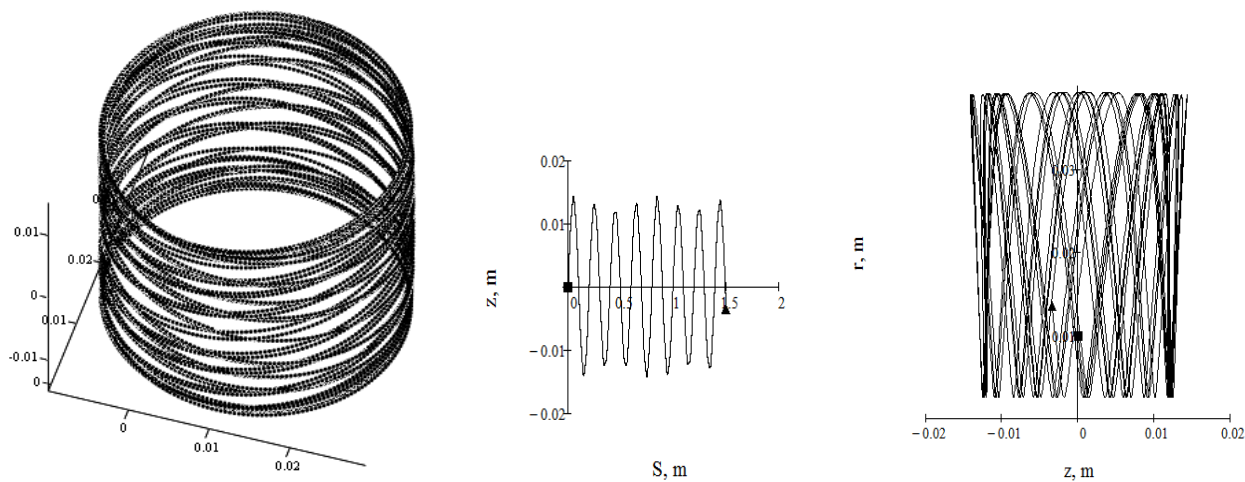


Рис. 5. Траектория электрона в градиентном магнитном поле; длина траектории  $S = 1.5$  м

## Список литературы

1. Ayzatsky M. I., Dovbnya A. N., Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Romas'ko V. P., Chertishchev I. A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016, issue 66, no. 3(103), pp. 11–16.
2. Dovbnya A.N., Dovbnya N.A., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Longitudinal-radial motion of an electron beam in the solenoidal field of the secondary-emission magnetron gun. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2017, issue 69, no. 6 (112), pp. 96–100.
3. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Electron beam transversion management on exit of magnetic gun by gradient magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2019, issue 72, no. 6 (124), pp. 106–113.
4. Арцимович Л.А. *Управляемые термоядерные реакции*. Москва: Физматгиз, 1963. 496 с.
5. Трубников Б.А. *Теория плазмы*. М.: Энергоатомиздат, 1996. 462 с.
6. Миямото К. *Основы физики плазмы и управляемого синтеза*. Москва: Физматлит, 2007. 424 с.
7. Мазманишвили А.С., Решетняк Н.Г., Шовкопляс О.А. Пучковый и секторный режимы электронных потоков в цилиндрической магнитном поле магнетронной пушки. *Журнал Нано- и Электронной Физики*. 2020. Т. 12, № 3. С. 03001(5cc).
8. Мазманишвили А.С., Решетняк Н.Г. Преобразование массива данных цилиндрического магнитного поля магнетронной пушки и задача радиального движения электронов. *Прикладные Проблемы Математического Моделирования*. 2020. Т. 3, № 1. С. 108–116.
9. Пирс Дж. Р. *Теория и расчет электронных потоков*. Москва: Сов. Радио, 1956. 254 с.
10. Алямовский И. В. *Электронные пучки и электронные пушки*. Москва: Сов. Радио, 1966. 454 с.
11. Vorogushin M. F., Glukhikh V. A., Manukyan G. Sh., Karpov D. A., Svin'in M. P., Ehngel'ko V. I., Yatsenko B. P. Beam and ion-plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series "Physics of radiation effects and radiation materials science"*. 2002, no. 3, pp. 101–109.
12. Хемминг Р.В. *Численные методы*. Москва: Наука, 1972. 303 с.
13. magnetron gun with a secondary emission cathode. *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"*. 2016, issue 66, no. 3(103), pp. 11–16.
14. Dovbnya A.N., Dovbnya N.A., Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Longitudinal-radial motion of an electron beam in the solenoidal field of the secondary-emission magnetron gun. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2017, issue 69, no. 6 (112), pp. 96–100.
15. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Electron beam transversion management on exit of magnetic gun by gradient magnetic field. *Problems of Atomic Science and Technology, series "Nuclear Physics Investigations"*. 2019, issue 72, no. 6 (124), pp. 106–113.
16. Artsimovich L.A. *Upravlyayemye termoyadernye reakcyi* [Controlled thermonuclear reactions]. Moscow, Fizmatgiz, 1963. 496 p.
17. Trubnikov B.A. *Teoriya plazmy* [Plasma theory]. Moscow, Energoatomizdat, 1996. 462 p.
18. Miyamoto K. *Osnovy fiziki plazmy i upravlyayemogo signala* [Fundamentals of Plasma Physics and Controlled Fusion]. Moscow, Fizmatlit, 2007. 424 p.
19. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G., Shovkoplyas O.A. Puchkovyy i sektornyy rezhimy elektronnykh potokov v zylindricheskom magnitnom pole magnetronnoy pushki [Beam and sector modes of electron flows in a cylindrical magnetic field of a magnetron gun]. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2020, vol. 12, no. 3, 03001 (5cc).
20. Mazmanishvili A.S., Reshetnyak N.G. Preobrazovanie massiva dannykh zylindricheskogo magnitnogo polya magnetronnoy pushki i zadacha radial'nogo dvizheniya elektronov [Transformation of the data array of the cylindrical magnetic field of the magnetron gun and the problem of the radial motion of electrons]. *Applied Problems of Mathematical Modeling*. 2020, vol. 3, no. 1, pp. 108–116.
21. Pirs Jh. P. *Teoriya i raschet elektronnykh potokov* [Theory and calculation of electron currents]. Moscow, Sov. Radio, 1956. 254 p.
22. Alyamovskiy S. V. *Elektronnye puchki i elektronnye pushki* [Electron beams and electron guns]. Moscow, Sov. Radio, 1966. 454 p.
23. Vorogushin M. F., Glukhikh V. A., Manukyan G. Sh., Karpov D. A., Svin'in M. P., Ehngel'ko V. I., Yatsenko B. P. Beam and ion-plasma technologies. *Problems of atomic science and technology. Series "Physics of radiation effects and radiation materials science"*. 2002, no. 3, pp. 101–109.
24. Hemming R. V. *Chyslennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Nauka, 1972. 303 p.

## References (transliterated)

1. Ayzatsky M. I., Dovbnya A. N., Mazmanishvili A. S., Reshetnyak N. G., Romas'ko V. P., Chertishchev I. A. Studies on formation of the radially-directed electron beam generated by the

Поступила (received) 05.05.2021

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

**Мазманишвілі Олександр Сергійович** – доктор фізико-математичних наук, професор, старший науковий співробітник Національного наукового центру Харківського фізико-технічного інституту, м. Харків; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: [mazmanishvili@gmail.com](mailto:mazmanishvili@gmail.com)

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

**Мазманишвили Александр Сергеевич** – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник Национального научного центра Харьковского физико-технического института, г. Харьков; Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0373-0626>; e-mail: [mazmanishvili@gmail.com](mailto:mazmanishvili@gmail.com)

**Решетняк Николай Григорьевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального научного центра Харьковского физико-технического института, г. Харьков; Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2345-6789>; e-mail: [nreshetnyak@kipt.kharkov.ua](mailto:nreshetnyak@kipt.kharkov.ua)

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

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

**І. А. МАРИНИЧ, О. Ю. СЕРДЮК**

## **МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ НАТЯГУ В ЧОРНОВІЙ ГРУПІ КЛІТЕЙ НЕПЕРЕРВНОГО СОРТОВОГО СТАНУ**

Предметом дослідження є особливості моделювання системи автоматичного керування режимом натягу чорнової групи клітей, яка враховує зміни швидкості прокатки на виході попередньої кліті і вході в наступну кліть. Системи управління швидкісним режимом прокатки на сортових станах, є найбільш відповідальними системами, так як від їх роботи в більшій мірі залежить безаварійна робота прокатного стану. Під управлінням швидкісним режимом прокатки розуміють регулювання натягу в чорновій групі клітей і стабілізацію петлі прокату в чистових групах. Вплив таких технологічних факторів як нерівномірність нагріву заготовок, зміна режиму обтіску в клітях і т. п. призводить до виникнення сил натягу або підпора, відхилення петлі прокату від заданих значень. Прокатка з натягом на відміну від прокатки з петлею є стійким режимом прокатки. Однак, (при значних величинах натягу в прокаті) такий режим прокатки призводить до різної товщини готової продукції. Режим прокатки з петлею є нестійким режимом і не можливий без систем автоматичного керування. Як при режимі прокатки з натягом, так і при режимі вільної прокатки з петлею необхідно дослідження систем автоматичного керування з метою визначення можливостей компенсації збурюючих впливів і отримання прокату заданої точності. Тому основним завданням системи автоматичного керування є підтримання режиму прокатки з мінімально можливим натягом. Для досягнення поставленої мети безпосередній контроль натягу смуги прокату сучасними технічними засобами досить ускладнений, і робота систем керування натягом ґрунтується на непрямих методах його вимірювання, а дослідження ефективності роботи системи зводиться до моделювання самого процесу. Розроблена модель складається з трьох клітей та двох міжклітєвих проміжків, тому що вона враховує зміни швидкості прокатки на виході попередньої кліті і вході в наступну кліть. Саме завдяки цьому одержано адекватні результати моделювання наближенні до реального процесу прокатки.

**Ключові слова:** автоматизація, валки, кліть, міжклітєвий проміжок, моделювання, натяг петлі, прокатний стан, чорнова група.

**И. А. МАРИНИЧ, О. Ю. СЕРДЮК**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕЖИМА НАТЯЖЕНИЯ В ЧЕРНОВОЙ ГРУППЕ КЛЕТЕЙ НЕПРЕРВНОГО СОРТОВОГО СТАНА**

Предметом исследования являются особенности моделирования системы автоматического управления режимом натяжения черновой группы клетей, которая учитывает изменения скорости прокатки на выходе предыдущей клетки и входе в следующую клеть. Системы управления скоростным режимом прокатки на сортовых станах, является наиболее ответственными системами, так как от их работы в большей степени зависит безаварийная работа прокатного стана. Под управлением скоростным режимом прокатки понимают регулирования натяжения в черновой группе клетей и стабилизации петли проката в чистовых группах. Влияние таких технологических факторов как неравномерность нагрева заготовок, изменение режима обжима в клетях и т. п. приводит к возникновению сил натяжения или подпора, отклонение петли проката от заданных значений. Прокатка с натяжением в отличие от прокатки с петлей является устойчивым режимом прокатки. Однако, (при значительных величинах натяжения в прокате) такой режим прокатки приводит к различной толщине готовой продукции. Режим прокатки с петлей является неустойчивым режимом и невозможен без систем автоматического управления. Как при режиме прокатки с натяжением, так и при режиме свободной прокатки с петлей необходимо исследование систем автоматического управления с целью определения возможностей компенсации возмущающих воздействий и получения проката заданной точности. Поэтому основной задачей системы автоматического управления является поддержание режима прокатки с минимально возможным натяжением. Для достижения поставленной цели непосредственный контроль натяжения полосы проката современными техническими средствами достаточно затруднен, и работа систем управления натяжением основывается на косвенных методах его измерения, а исследования эффективности работы системы сводится к моделированию самого процесса. Разработанная модель состоит из трех клетей и двух межклетевых промежутков, так как она учитывает изменения скорости прокатки на выходе предыдущей клетки и входе в следующую клеть. Именно благодаря этому получены адекватные результаты моделирования приближенные к реальному процессу прокатки.

**Ключевые слова:** автоматизация, валки, клеть, межклетевых промежутков, моделирование, натяжение петли, прокатный стан, черновая группа

**I. A. MARYNYCH, O. Y. SERDIUK**

## **MODELING OF A SYSTEM FOR AUTOMATIC REGULATION OF THE TENSION MODE IN THE ROUGHING GROUP OF STANDS OF A CONTINUOUS SECTION MIL**

The subject of the research is automatic control system modeling features for tensioning of stands roughing group, which takes into account changes in the rolling speed at exit of the previous stand and entrance to the next stand. Control systems for high-speed rolling on section mills are the most critical systems, since the trouble-free operation of rolling mill largely depends on their work. Rolling speed control is understood to mean tension regulation in the roughing group of stands and stabilization of the rolling loop in the finishing groups. The influence of such technological factors as uneven heating of blanks, change in the crimping mode in stands, etc. leads to the appearance of tension or back-up forces, deviation of rolled loop from the specified values. Tension rolling, in contrast to loop rolling, is a stable rolling mode. However, (at significant values of tension in the rolled products) such a rolling mode leads to different thicknesses of the finished product. The loop rolling mode is an unstable mode and is impossible without automatic control systems. Both in the tension rolling mode and in the free rolling mode with a loop, it is necessary to study automatic control systems in order to determine the possibilities of compensating for disturbing influences and obtaining rolled products of the given accuracy. Therefore, the main task of the automatic control system is to maintain the rolling mode with the lowest possible tension. To achieve this goal, direct control of the tension of the rolled strip with modern technical means is rather difficult, and the operation of tension control systems is based on indirect methods of measuring it, and the study of the system efficiency is reduced to modeling the process itself. The developed model consists of three stands and two inter-stand spaces, since it takes into account changes in rolling speed at the exit of previous stand and the entrance to the next stand. It is due to this that adequate simulation results are obtained that are close to the real rolling process.

**Keywords:** automation, rolls, stand, inter-stand spacing, modeling, loop tension, rolling mill, roughing group

**Вступ.** Сучасний розвиток сортопрокатного безперервних процесів, високими швидкостями виробництва характеризується впровадженням прокатки і зростанням вимог до точності готової

продукції. Завдання підвищення точності прокату можуть бути вирішені як за рахунок поліпшення технології прокатки, так і при автоматизації технологічних процесів. Успішна розробка і впровадження систем керування технологічними процесами з використанням сучасних засобів обчислювальної техніки може бути здійснена тільки на базі якісного інформаційного забезпечення. Отримання різноманітної інформації про процес, аналіз її за допомогою ЕОМ дає можливість синтезувати ефективні алгоритми управління прокатним станом.

Системи керування швидкісним режимом прокатки на сортових станах, є найбільш відповідальними системами, так як від їх роботи в більшій мірі залежить безаварійна робота стану. Під керуванням швидкісним режимом прокатки розуміють регулювання натягу в чорновій групі клітей і стабілізацію петлі прокату в чистових групах. Вплив таких технологічних факторів як нерівномірність нагріву заготовок, зміна режиму обтиску в клітях і т. п. призводить до виникнення сил натягу або підпору, відхилення петлі прокату від заданих значень. Основним завданням системи автоматичного керування є підтримання режиму прокатки з мінімально можливим натягом. Безпосередній контроль натягу смуги сучасними технічними засобами здійснити важко, тому робота системи автоматичного керування режиму натягу ґрунтується на непрямих методах та моделюванні [1].

Моделювання такої системи найкраще проводити у пакеті у пакеті Simulink, що входить до складу пакету MATLAB.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розміри по ширині залежать головним чином від величини розширення металу при прокатці, на процес розкату якого визначальний вплив мають міжклітві зусилля. Тому, не випадково, на сортових станах засоби вимірювання і управління міжклітвіми зусиллями займають важливе місце в заходах спрямованих на підвищення точності виробленого прокату. Одним з основних режимів, що виключає виникнення натягу між клітями дрібносортових станів, є прокатка з петлями в міжклітвих проміжках. Існує велика різноманітність конструкцій перетворювачів, основним призначенням яких є утворення і стабілізація заданої величини петлі

У роботах [2–4] розглянуті варіанти існуючих систем автоматичного регулювання натягу у чорнових та чистових групах клітей, а також система стабілізації натягу зі статичним петлетримачем і датчиком натягу. Але налаштування цих систем ґрунтується на непрямих методах вимірювання натягу петлі, а наприклад у роботі [3] у якості опорної кліті береться середня кліть безперервної групи (наприклад, для групи з семи клітей опорною є четверта). Тому аналіз ефективності роботи тієї або іншої системи все одно зводиться до моделювання процесу.

**Метою цієї статті** є побудова моделі, яка буде складатися з трьох клітей та двох міжклітвих проміжків для одержання адекватних результатів

моделювання наближених до реального процесу прокатки. Сформована таким чином модель надає різні можливості для аналізу роботи системи керування режимом натягу, а саме регулювання довжини петлі прокату, можливість зміни натягу в міжвалкових відстанях і стабілізацію геометричних розмірів перерізу прокату.

**Методика оцінки міжклітвого натягу.** Стабільність технологічного процесу прокатки в більшій мірі залежить від напруженого стану металу між валками суміжних клітей.

З цієї точки зору будемо розрізняти три швидкісних режими прокатки:

- режим вільної прокатки;
- режим натягу;
- режим стиснення (підпору).

Той чи інший режим прокатки встановлюється при певному співвідношенні швидкостей металу, а відповідно і частот обертання двигунів валків.

Для процесу прокатки на безперервних дрібносортових станах в чорновій групі можливий режим прокатки з натягом і з підпором прокату. У проміжній і чистовій групах клітей характерний режим вільної прокатки.

У перших клітях чорнової групи сучасних сортових станів, через великі коливання розмірів перетину заготовок пов'язаних із зачищенням їх поверхні має місце порушення сталості секундних обсягів, що призводить до значних змін міжклітвих зусиль. У свою чергу, зміна поздовжніх зусиль в перших клітях через випередження металу призводить до порушення налаштувань швидкісного режиму всього стану [5]. Тому важливість безпосереднього регулювання міжклітвих зусиль в перших клітях чорнової групи очевидна. В інших же міжклітвих проміжках немає необхідності контролювати зусилля на всій довжині розкату, так як в протилежному випадку необхідна кількість технічних засобів значно зростає і проблеми, пов'язані з обслуговуванням, виступають на передній план.

Зменшення коливань розмірів заготовок за останньою чорною кліттю здійснюється шляхом стабілізації витяжки в першій кліті чистової групи, для чого проводиться коригування міжклітвих зусиль в останніх проміжках чорнової групи [3]. Величину витяжки прокату, що характеризує її коефіцієнт можна отримати, визначаючи площу поперечного перерізу заготовки до і після обтиску в прокатній кліті. Однак, в даний час через технічні складності цей метод неможливий. Розглянемо роботу пристрою непрямого визначення коефіцієнта витяжки, робота якого полягає в наступному.

Приріст довжини петлі розкату визначається наступною залежністю [7]:

$$\Delta l_i = \int_0^t (V_{1,i} - V_{0,i+1}) dt, \quad (1)$$

де  $\Delta l_i$  – приріст довжини петлі розкату;  
 $V_{1,i}$  – швидкість розкату на виході з  $i$ -ї кліті;

$V_{0,i+1}$  – швидкість розкату на вході у  $(i+1)$ -ту кліть.

Виразивши швидкість розкату через частоту обертання приводів, робочі радіуси і випередження отримаємо [7]:

$$\Delta l_i = \frac{R_i(1+S_i)}{\eta_i} \int_0^t \omega_i dt - \frac{R_{i+1}(1+S_{i+1})}{\eta_{i+1}\mu_{i+1}} \int_0^t \omega_{i+1} dt, \quad (2)$$

де  $R_i, R_{i+1}$  – робочий радіус  $i$ -ї і  $(i+1)$ -ї клітей;

$S_i, S_{i+1}$  – випередження  $i$ -ї і  $(i+1)$ -ї клітей;

$\omega_i, \omega_{i+1}$  – частота обертання приводів  $i$ -ї і  $(i+1)$ -ї клітей;

$\eta_i, \eta_{i+1}$  – коефіцієнт передачі редуктору  $i$ -ї і  $(i+1)$ -ї клітей;

$\mu_{i+1}$  – коефіцієнт подовження розкату у  $(i+1)$ -й кліті.

Розглянутий метод передбачає однаковість випереджень в  $i$ -й і  $(i+1)$ -й клітях. Більш точно можна визначити величину витяжки в першій по ходу прокатки кліті, у якій в суміжних міжкліткових проміжках прокатки ведеться з петлеутворювачем.

У міру наростання натягу швидкість виходу металу  $V_1$  з валків попередньої кліті 1 буде зростати, прагнучи до величини швидкості  $V_{0,2}$  входу металу у валки подальшої кліті 2, яка зменшується при збільшенні заданого натягу [8].

Крім ефекту зміни швидкості прокатки на виході кліті 1 і входу в кліть 2 за рахунок пружного подовження прокату натяг впливає також на зміну випередження прокату і його відставання.

Математичний опис відноситься до випадку прокатки прямокутної смуги в циліндричних валках. Тому обчислення і інші геометричні параметри рекомендується розраховувати за методом наведеної смуги.

В умовах прокатки в калібрах звичайні показники деформації стають змінними по ширині калібру. Для розрахунку розширення і середньої витяжки виникає необхідність у визначенні середнього абсолютного і відносного обтиску в калібрах. На практиці використовується поняття наведеної прямокутної смуги, тобто профіль прямокутного поперечного перерізу ширина якого дорівнює ширині заготовки [9].

Блок-схема двох суміжних міжкліткових проміжків контурів регулювання петлі наведена на рис. 1.

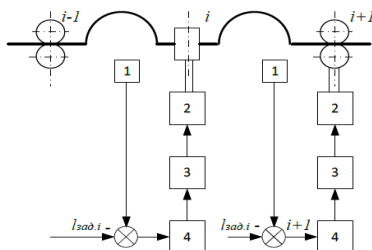


Рис. 1. Блок-схема контурів системи стабілізації петлі у двох проміжках: 1 – давач петлі; 2 – двигун прокатної кліті;

3 – система регулювання швидкості двигуна прокатних валків; 4 – регулятор петлі

На рис. 2 наведено структурну схему, яка відповідає блок-схемі наведеній на рис. 1. Пробні впливи подаються в ланцюг завдання приводу  $i$ -ї кліті. Це викликає зміну довжини петлі металу в обох прилеглих міжкліткових проміжках.

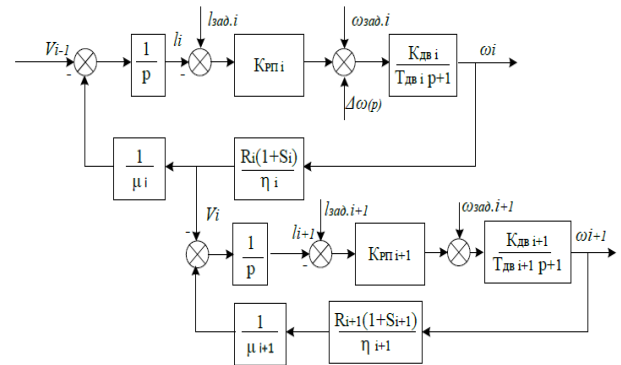


Рис. 2. Структурна схема контурів системи стабілізації петлі у двох проміжках

Суттєвим є те, що величина виділених змінних складових залежить від параметрів прокатки тільки в даній кліті  $i$ , таким чином, вплив змін швидкості металу при виході з попередньої і входу в наступну кліть на точність вимірювання витяжки усувається.

Витяжка визначається як відношення змінних складових довжини петлі, взята за абсолютною величиною [5]:

$$\mu_{i+1} = \left| \frac{\Delta l_{i+1}}{\Delta l_i} \right|. \quad (3)$$

Таким чином, зміна величини петлі в проміжках чистової групи пов'язана з нерівномірністю геометричних параметрів, що викликаються застосуванням натягу при прокатці в чорнових групах клітей. При регулюванні довжини петлі вихідний сигнал регулятора петлі може побічно служити показником якості налаштувань режиму натягу в міжкліткових проміжках. Регулюючи довжину петлі змінюючи натяг прокату в міжвалкових проміжках можна тим самим стабілізувати і геометричні розміри перерізу прокату.

**Моделювання режиму натягу.** При моделюванні режиму натягу необхідно враховувати зміни швидкості прокатки на виході попередньої кліті і входу в наступну кліть, за рахунок пружного подовження прокату і його відставання [6]. Якщо натяг прокату в міжклітковому проміжку збільшується, наприклад, через підвищення швидкості обертання валків, наступної кліті, то одночасно з цим зростає відставання металу в цій кліті, а також зростає випередження в валках попередньої кліті. Збільшення випередження призведе до зростання швидкості прокату на виході з попередньої кліті, а збільшення відставання – до зменшення швидкості прокату на вході в наступну кліть. Внаслідок цього дійсне збільшення натягу відбудеться в меншій мірі,

ніж це б мало місце при незмінній величині випередження і відставання. Таким чином, випередження сприяє самовирівнюванню натягу.

Модель прокатної кліті (рис. 3) виконана за відповідними математичними залежностями і включає в себе блоки розрахунку випередження з урахуванням натягу, розрахунку швидкості прокату на вході і виході в кліть, моменту прокатки при прокатці з натягом і розширенням.

- Вхід 1 – частота обертання валків  $i$ -ї кліті;
- Вхід 2 – задній натяг смуги  $i$ -ї кліті;
- Вхід 3 – передній натяг смуги  $i$ -ї кліті;
- Вихід 1 – швидкість смуги на виході з  $i$ -ї кліті;
- Вихід 2 – швидкість смуги на вході в  $i$ -ту кліть;
- Вихід 3 – момент прокатки  $i$ -ї кліті;
- Вихід 4 – ширина смуги на виході з  $i$ -ї кліті.

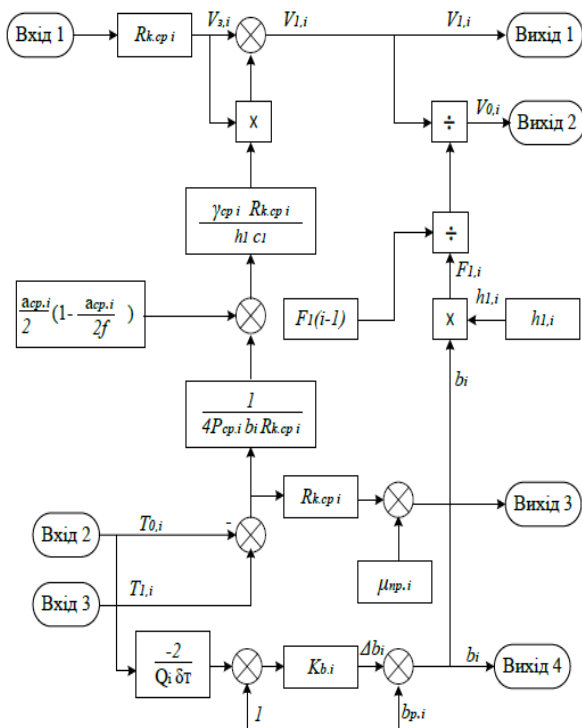


Рис. 3. Модель прокатної кліті

Моделювання проводилось у пакеті Simulink, що входить до складу пакету MATLAB [12]. У зв'язку з тим, що постійні часу зміни натягу склали приблизно 0,02 с і модель досить складна введений масштабуючий коефіцієнт постійних часу. Також були прийняті спрощення умов прокатки, для отримання більш прийнятних залежностей.

Кліть і міжклітєвий проміжок для дослідження перехідних процесів представлені в абсолютних одиницях. Тому в місцях стикування структурних схем в відносних і абсолютних одиницях необхідні коефіцієнти переведення відносної частоти обертання валу двигуна в абсолютне значення і абсолютне значення моменту двигуна в статичний струм якоря [10].

Для числових розрахунків при моделюванні системи керування натягом прокату прийнята система

витажних калібрів овал – квадрат. Така система калібрів застосовується на сортових станах для послідовного зменшення площі поперечного перерізу заготовки. Основні параметри першого, другого та третього квадратних і овальних калібрів неперервного сортового стану, що визначають геометричні розміри прокату [11] були використані при побудові моделі.

Так як модель вийшла досить громіздка, то вона була реалізована за допомогою блоків Subsystem. Так наприклад на рис. 4. наведено зображення моделі кліті №3, а на рис. 5 її повне зображення.

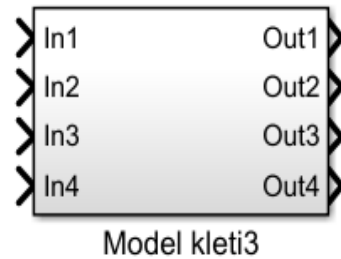


Рис. 4. Блок Subsystem кліті №3

Для отримання адекватних результатів, модель повинна містити два міжклітєвих проміжки і відповідно три кліті, а також блоки розрахунку випередження з урахуванням натягу, розрахунку швидкості прокату на вході і виході в кліть, моменту прокатки при прокатці з натягом і розширенням.

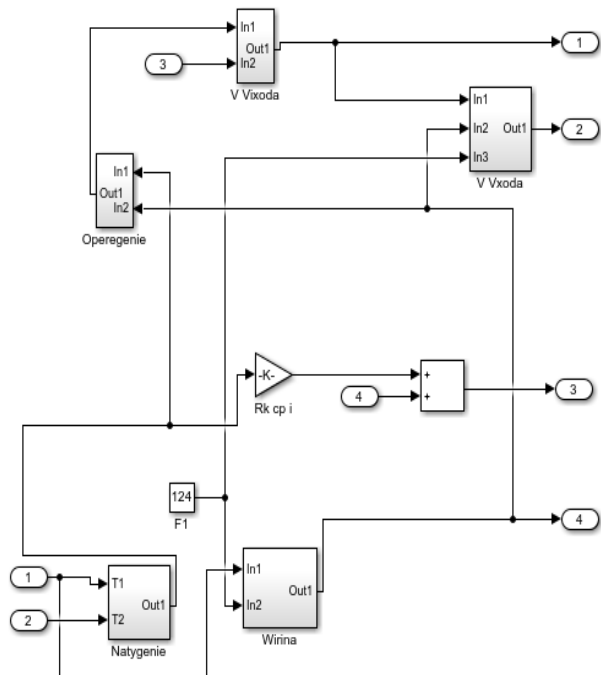


Рис. 5. Модель кліті № 3

На рис. 6 наведену повну модель системи, яка складається з трьох клітей та двох міжклітєвих проміжків. Вона включає в себе блоки розрахунку випередження з урахуванням натягу, розрахунку швидкості прокату на вході і виході в кліть, моменту прокатки при прокатці з натягом і розширенням.

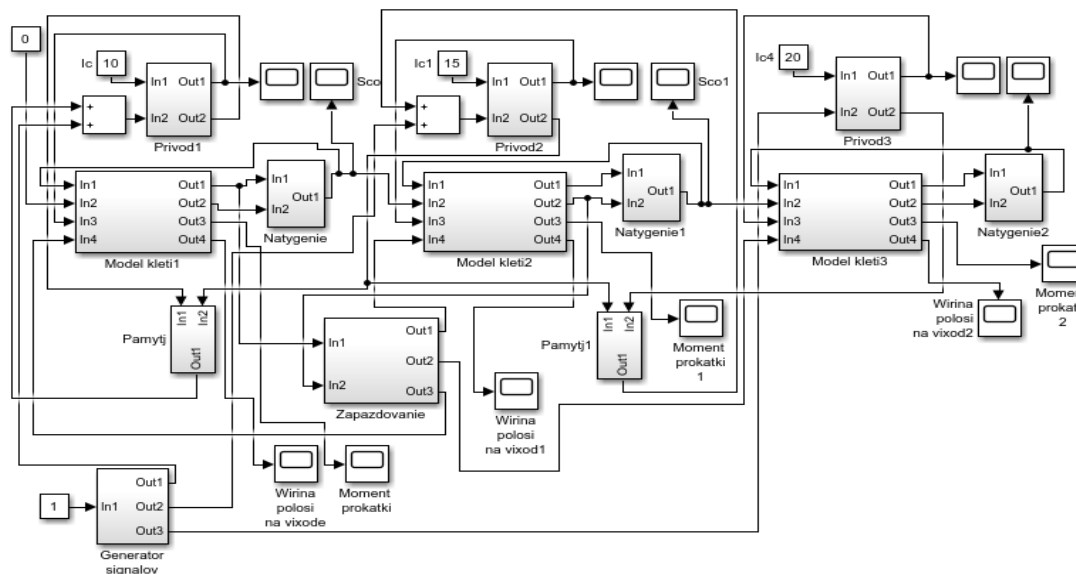


Рис. 6. Повна модель системи

При дослідженні системи моделювалося два можливих проміжки і відповідно три кліті.

У зв'язку з тим, що постійні часу зміни натягу склали приблизно 0,02 с. і модель досить складна введений масштабуючий коефіцієнт постійних часу, наведений графік показує роботу привода при установці початкових зазорів і захоплення металу валками без натягу. Так як регулятор швидкості виконується у вигляді пропорційної ланки спостерігається невелика просадка частоти обертання (див. рис. 7).

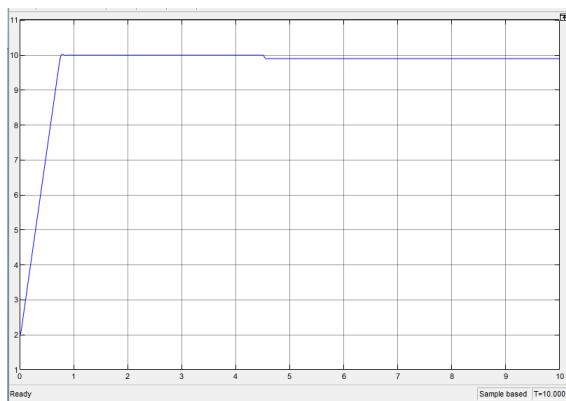


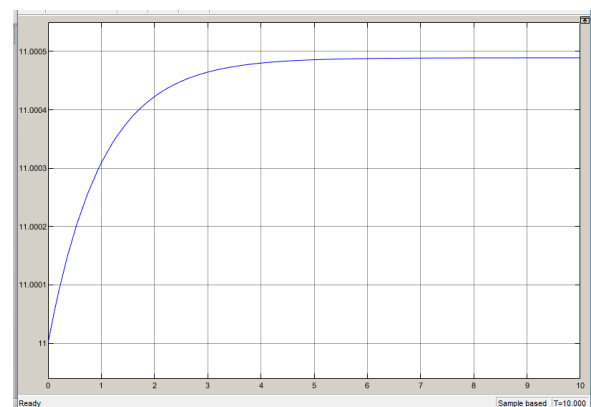
Рис. 7. Графік перехідного процесу по швидкості без натягу

Наведені струмові діаграми на ділянках установки початкових зазорів, захоплення металу. Так як встановлено режим близький до вільної прокатки, то при захопленні металу валками струми двигунів 1, 2 і 3 практично не змінювалися. При встановленому режимі близькому до вільної прокатки зміна завдання швидкості другого привода проводилася за допомогою генератора гармонійних сигналів.

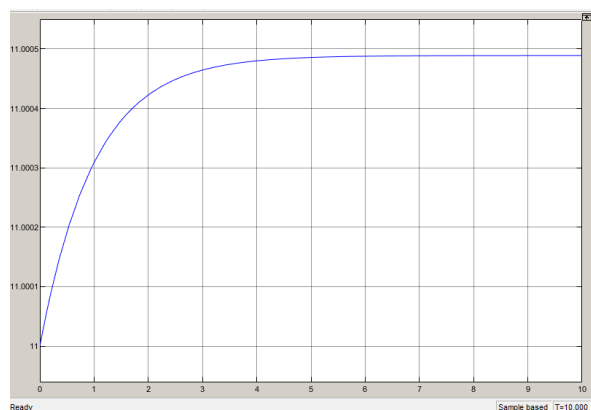
При таких пробних впливах розширення прокатки в другій кліті (рис. 8, б) змінилося на 0,03 мм., що цілком допустимо в умовах реальної прокатки.

При захопленні валками прокату при заповненні чорнової групи клітей, по перепаду струмів якірного

ланцюга двигуна оцінюється настройка швидкісного режиму прокатки. В разі невірної встановлення початкових частот обертання валків клітей швидкісний режим прокатки коригується.



а



б

Рис. 8. Перехідний процес, що характеризує розширення смуги прокату: а – на виході першої кліті, б – на виході другої кліті

Режим натягу прокату позначається на зміні витяжки прокату по його довжині. Тому більш точна оцінка якості налаштувань швидкісного режиму прокатки визначається за непрямыми оцінками при зміні величини петлі прокату за чорною групою. Неточності налаштувань компенсуються зміною режиму натягу в останньому міжклітовому проміжку чорнової групи. Вплив регулятора натягу на частоту обертання головних приводів здійснюється через систему цифрового завдання і узгодження частот обертання головних приводів.

На рис. 9 зображені струмові діаграми при прокатці з натягом. Після захоплення металу валками другою кліттю в міжклітовому проміжку 1–2 створюється натяг.

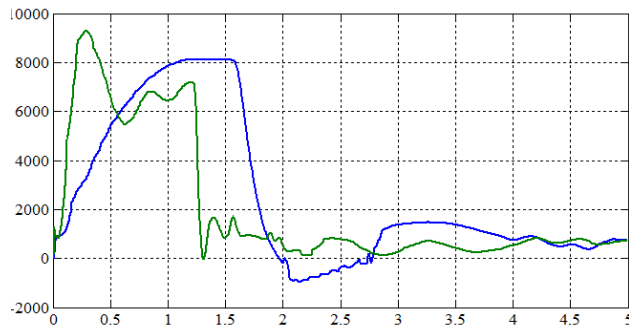


Рис. 9. Перехідні процеси за струмом в двох міжклітових проміжках

Такий натяг призводить до зміни розширення прокату  $\Delta b_2 = 0,13$  мм. значення струму якоря приводу в першій клітці впало навіть до нульової позначки, а струм якоря приводу першої клітці зріс до значення рівного  $2I_{H2}$ .

На рис. 10 наведена діаграма зміни частоти обертання головних приводів при реальній прокатці на стані з питомим натягом  $q_{12} = 4,84$  Н/м<sup>2</sup>.

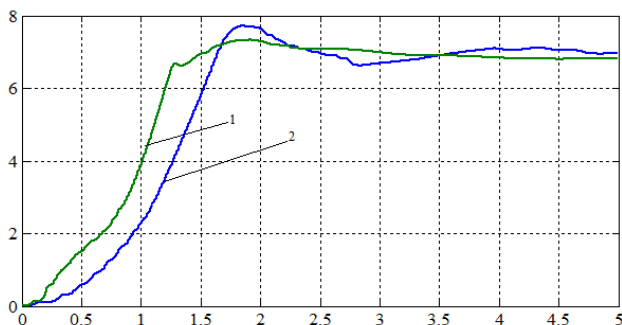


Рис. 10. Перехідні процеси за швидкістю в двох міжклітових проміжках

Видно, що після захоплення металу валками, частота обертання двигуна першої клітці дещо зросла, за рахунок створення натягу прокату, а другої впала  $\Delta\omega_1 = 0,15\%$ ,  $\Delta\omega_2 = 0,151\%$ .

При захопленні металу валками клітці 2 запам'ятовується струм двигуна клітці 1 і після цього визначається зміна струму в клітці 1. Якщо значення струму зменшилася, що говорить про режим натягу, то регулятор натягу впливає на завдання швидкості клітці

1 до тих пір поки поточне значення струму не стане рівним заданому.

На рис. 11 представлені графік зміни частот обертання клітей 1, 2 і 3 та зміна швидкості у двох міжклітових проміжках з натягом.

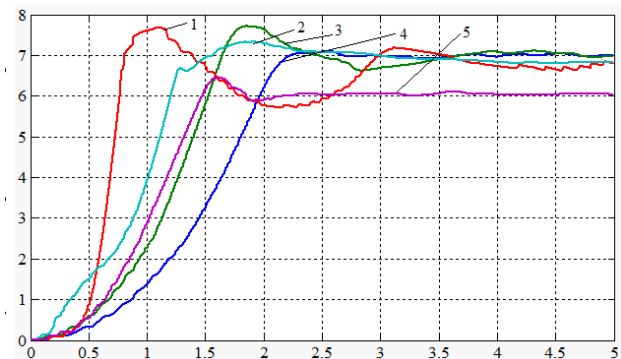


Рис. 11. Графіки перехідних процесів для кутової швидкості робочих валків клітей (1–3) та двох міжклітових проміжках (4–5)

Спостерігаються ділянки просадки швидкості після захоплення металу валками першої клітці, заповнення міжклітового проміжку регулювання від значення  $\omega_1 = 6$  рад/с до  $\omega_1' = 6,8$  рад/с, що забезпечує режим близький до вільної прокатки.

**Висновки.** Математичний опис процесу прокатки у чорновій групі клітей, який ліг в основу побудови моделі прокатної клітці, що включає в себе блоки розрахунку випередження з урахуванням натягу, розрахунку швидкості прокату на вході і виході в кліть, моменту прокатки при прокатці з натягом і розширенням, підтвердив вірність розрахунків. Моделювання проводилося для двох міжклітових проміжків і відповідно трьох клітей. Для спрощення системи було враховано тип калібрів квадрат, так як вони значно легші для моделювання.

Аналіз результатів моделювання створеної системи, а саме зміни швидкостей та струмів приводів трьох клітей та двох міжклітових проміжків, показав що розроблена система автоматичного керування натягом чорнової групи клітей повною мірою є працездатною й задовольняє заданим вимогам.

#### Список літератури

1. Маринич І. А., Сердюк О. Ю., Грам О. О., Романов С. О. Особливості моделювання режиму натягу чорнової групи клітей неперервного сортового стану. *Розвиток промисловості та суспільства. Тези доповідей міжнародної науково-технічної конференції (17–20 листопада 2020р., Кривий Ріг)*. Кривий Ріг: КНУ, 2020. С. 259.
2. Солод В. С., Бенетский А. Г., Мамаев А. Н. Моделирование процесса сортовой прокатки с помощью программного комплекса «СОПТ-ПРО». *Обработка материалов давлением*. 2010. № 3 (24). С. 60–63.
3. Карандаев А. С., Храпшин В. Р., Андрияшин И. Ю., Головин В. В. Математическое моделирование взаимосвязанных электромеханических систем межклетевого промежутка широкополосного стана горячей прокатки. *Известия вузов. Электромеханика*. 2009. № 1. С. 12–20.
4. Егоров А. П., Егоров В. С., Ханин М. И., Зворыкин В. Б. Моделирование системы управления толщиной полосы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки: учебное пособие. Днепропетровск: ИПК МК, 2000. 125 с.

- Восканьянц А. А. Автоматизированное управление процессами прокатки: учебное пособие. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 85 с.
- Учитель А. Д., Ткаченко Г. И., Хижняк В. Я., Мохнатый А. В. *Средства и системы автоматизации в горно-металлургическом комплексе*. Киев: ВПК «Экспрес-Поліграф», 2013. 184 с.
- Грудев А. П., Машкин А. Ф., Ханин М. И. *Технология прокатного производства*. Москва: Металлургия, 1994. 651 с.
- Бабенко М. А., Коротченко В. М., Носиков В. Л. Измерение скорости вращения валков прокатных клетей на основе микропроцессорной техники. *Металлургия и горнорудная промышленность*. 2002. №1. С. 43–45.
- Бабенко М. А., Коротченко В. М., Носиков В. Л. Микропроцессорный датчик наличия металла в валках прокатной клетки. *Металлургия и горнорудная промышленность*. 2003. №1. С. 49–53.
- Шохин В. В., Андреев А. И., Морковина П. С. Моделирование прокатного стана с использованием физических и математических моделей. *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №2(35). С.13–18.
- Шохин В. В., Пермякова О. В., Короткова Е. В. Моделирование взаимосвязанного частотно-регулируемого электропривода прокатного стана. *Международ. сб. науч. трудов. Вып. 21. Магнитогорск: гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова*, 2013. С. 70–75.
- Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems, Simulink. Москва: ДМК Пресс, 2008. 288 с.
- широкopolosного стана goryachej prokatki [Mathematical modeling of interconnected electromechanical systems of inter-stand spacing of wide-strip hot rolling mill]. *Izvestiya vuzov. E'lektromekhanika*. 2009, no. 1, pp. 12–20.
- Egorov A. P., Egorov V. S., Khanin M. I., Zvory'kin V. B. *Modelirovanie sistemy upravleniya tolshhinoj polosy nepreryvnogo shirokopolosного stana goryachej prokatki: uchebnoe posobie* [Modeling of strip thickness control system for continuous broadband hot rolling mill: Study guide]. Dnepropetrovsk: IPK MK Publ., 2000. 125 p.
- Voskan'yanc A. A. *Avtomatizirovanное upravlenie processami prokatki: uchebnoe posobie* [Automated control of rolling processes: Study guide]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2010. 85 p.
- Uchitel' A.D., Tkachenko G. I., Khizhnyak V. Ya., Mokhnaty' A. V. *Sredstva i sistemy avtomatizacii v gorno-metallurgicheskom komplekse* [Automation tools and systems in mining and metallurgical complex]. Kiev: VPK «Ekspres-Poli graf» Publ., 2013. 184 p.
- Grudev A. P., Mashkin A. F., Khanin M. I. *Tekhnologiya prokatnogo proizvodstva* [Rolling production technology]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1994. 651p.
- Babenko M. A., Korotchenkov V. M., Nosikov V. L. *Izmerenie skorosti vrasheniya valkov prokatny'kh kletej na osnove mikroprocessornoj tekhniki* [Measurement of rotation speed of rolling stands rolls based on microprocessor technology]. *Metallurgiya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2002, no. 1, pp. 43–45.
- Babenko M. A., Korotchenkov V. M., Nosikov V. L. *Mikroprocessorny'j datchik nalichiya metall v valkakh prokatnoj kleti* [Microprocessor-based sensor for presence of metal in rolling stand rolls]. *Metallurgiya i gornorudnaya promyshlennost'*. 2003, no. 1, pp. 49–53.
- Shokhin V. V., Andreev A. I., Morokovina P. S. *Modelirovanie prokatnogo stana s ispol'zovaniem fizicheskikh i matematicheskikh modelej* [Rolling mill simulation using physical and mathematical models]. *E'lektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы*. 2017, no. 2(35), pp.13–18.
- Shokhin V. V., Permyakova O. V., Korotkova E. V. *Modelirovanie vzaimosvyazannogo chastotno-reguliruemogo e'lektroprivoda prokatnogo stana* [Simulation of interconnected variable frequency drive of rolling mill]. *Mezhdunar. sb. nauch. trudov. Vip. 21* [Int. collection of scientific. works Vol. 21]. Magnitogorsk: gos. tekhn. un-ta im. G.I. Nosova Publ., 2013, pp. 70–75.
- Cherny'kh I. V. *Modelirovanie e'lektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems, Simulink* [Simulation of electrical devices in Matlab, SimPowerSystems, Simulink]. Moscow: DMK Press Publ., 2008. 288 p.

## References (transliterated)

- Marinich I. A., Serdyuk O. Yu., Gram O. O., Romanov S. O. *Osoblivosti modelyuvannya rezhimu natyagu chornovoyi grupi kli'tej neperevnoho sortovogo stanu* [Features of modeling tension mode of rough group of stands of continuous varietal condition]. *Rozvitok promislivosti ta suspi'l'stva. Tezy dopovidey mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (17-20 listopada 2020r., Kriviy Ri'g)* [Development of industry and society. Abstracts of reports of the international scientific and technical conference (November 17-20, 2020, Kryvyi Rih)]. Kryvyi Rih: KNU Publ., 2020. p. 259.
- Solod V. S., Beneczkij A. G., Mamaev A. N. *Modelirovanie processa sortovoy prokatki s pomoshch'yu programmnoho kompleksa «SORT-PRO»* [Modeling section rolling process using the "SORT-PRO" software package]. *Obrabotka materialov davleniem*, 2010, no. 3 (24), pp. 60–63.
- Karandaev A. S., Khramshin V. R., Andryushin I. Yu., Golovin V. V. *Matematicheskoe modelirovanie vzaimosvyazanny'kh e'lektromekhanicheskikh sistem mezhkletevogo promezhutka*

Надійшло 15.02.2021

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

**Маринич Іван Анатолійович** – кандидат технічних наук, доцент, Криворізький національний університет, доцент кафедри Автоматизації, комп'ютерних наук і технологій; м. Кривий Ріг, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9036-8532>; e-mail: [marynych@knu.edu.ua](mailto:marynych@knu.edu.ua)

**Сердюк Ольга Юрійівна** – кандидат технічних наук, Криворізький національний університет, старший викладач кафедри Автоматизації, комп'ютерних наук і технологій; м. Кривий Ріг, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0505-0800>; e-mail: [olgajs28@knu.edu.ua](mailto:olgajs28@knu.edu.ua)

**Маринич Иван Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, Криворожский национальный университет, доцент кафедры Автоматизации, компьютерных наук и технологий; г. Кривой Рог, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9036-8532>; e-mail: [marynych@knu.edu.ua](mailto:marynych@knu.edu.ua)

**Сердюк Ольга Юрьевна** – кандидат технических наук, Криворожский национальный университет, старший преподаватель кафедры Автоматизации, компьютерных наук и технологий; г. Кривой Рог, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0505-0800>; e-mail: [olgajs28@knu.edu.ua](mailto:olgajs28@knu.edu.ua)

**Marynych Ivan Anatolyevich** – candidate of technical sciences, docent, Kryvyi Rih National University, Associate Professor of the Department of Automation, Computer Science and Technology; Kryvyi Rih, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9036-8532>; e-mail: [marynych@knu.edu.ua](mailto:marynych@knu.edu.ua)

**Serdiuk Olga Yuriyivna** – candidate of technical sciences, Kryvyi Rih National University, Senior Lecturer of the Department of Automation, Computer Science and Technology; Kryvyi Rih, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0505-0800>; e-mail: [olgajs28@knu.edu.ua](mailto:olgajs28@knu.edu.ua)

**Т. А. ЗАЙЦЕВА, І. І. ШМЕЛЬОВ**

## **СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ КОНТАКТНОЇ ЗАДАЧІ ПРО ВТИСНЕННЯ ДВОЗВ'ЯЗНОГО ШТАМПУ В ПРУЖНИЙ ПІВПРОСТІР**

Робота присвячена розв'язанню задачі про вдавнення в пружний півпростір циліндричного штампу з плоскою основою під дією вертикальної сили, лінія дії якої проходить через центр основи. Поперечний перетин штампу займає двозв'язну область, обмежену двома концентричними лініями. Зроблено стислий огляд методів розв'язання задачі аналізу контактної взаємодії між циліндричним штампом та пружним півпростором. Застосовано розв'язок задачі у вигляді розкладення за малим параметром для випадка коли рівняння граничних кривих залежать від одного і того ж малого параметра. Для цього у кожному наближенні задача про вдавнення штамп з двозв'язною площадкою контакту у формі некругового кільця зводиться до аналогічної задачі про вдавнення штамп з площадкою контакту у формі кругового кільця. Розроблено програмне забезпечення на мові Java для обробки аналітичного розв'язку за отриманими розрахунковими формулами. За допомогою програмного пакету ANSYS створено скінчено-елементну модель контактної взаємодії абсолютно жорсткого штамп з пружним півпростором. Чисельне моделювання відбувалося із застосуванням ліцензованої версії, яка надається безкоштовно. Розв'язана низка задач для квадратних кілець різної ширини. Отримано розподіл тиску під штампом у різних перерізах та заглиблення штамп. Побудовані графіки розподілу тиску. При розв'язанні низки тестових задач з метою оцінки адекватності скінчено-елементної моделі, було проведено порівняння чисельних результатів з результатами, отриманими аналітичним шляхом. Отримана модель може бути використана для аналізу та прогнозування навантаження, зносу та руйнування контактної ділянки. До перспектив дослідження можуть бути віднесені розв'язання низки задач аналізу напружено-деформованого стану взаємодії штамп складної форми з пружним півпростором, а також групи штампів складної форми, та аналіз поведінки моделі в залежності від властивостей та особливостей пружного півпростору.

**Ключові слова:** контактна задача, штамп, напружено-деформований стан, моделювання, мова JAVA, скінчено-елементний аналіз, програмний комплекс ANSYS.

**Т. А. ЗАЙЦЕВА, И. И. ШМЕЛЬОВ**

## **СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ О ВДАВЛИВАНИИ ДВОСВЯЗНОГО ШТАМПА В УПРУГОЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВО**

Работа посвящена решению задач о вдавливании в упругое полупространство цилиндрического штампа с плоским основанием под действием вертикальной силы, линия действия которой проходит через центр основания. Поперечное сечение штампа занимает двосвязную область, ограниченную двумя концентрическими линиями. Сделан сжатый обзор методов решения задач анализа контактного взаимодействия цилиндрических штампов с упругим полупространством. Использовано решение задачи в виде декомпозиции по малому параметру для случая, когда уравнение предельных кривых зависит от одного и того же малого параметра. Для этого в каждом приближении задача о вдавливании штампа с двосвязной площадью контакта в форме некругового кольца сводится к аналогичной задаче о вдавливании штампа с площадью контакта в форме кругового кольца. Разработано программное обеспечение на языке Java для обработки аналитического решения по полученным расчетным формулам. С помощью программного комплекса ANSYS создана конечно-элементная модель контактного взаимодействия абсолютно жесткого штампа с упругим полупространством. Численное моделирование проводилось с использованием лицензионной версии программы, которая предоставляется бесплатно. Решён ряд задач для квадратных колец разной ширины. Получены распределение давления под штампом по разным сечениям и углубление штампа. Построены графики распределения давления. При рассмотрении ряда тестовых задач с целью оценки адекватности конечно-элементной модели проводится сравнение численных результатов с результатами, полученными аналитическим путём. Полученную модель можно использовать для анализа и прогнозирования нагрузок, износа и разрушения площади контакта. К перспективам исследования могут быть отнесены решение ряда задач анализа напряженно-деформированного состояния взаимодействия штампов сложной формы с упругим полупространством, а также групп штампов сложной формы, и анализ моделей поведения в зависимости от свойств и особенностей упругого полупространства.

**Ключевые слова:** контактная задача, штамп, напряженно-деформированное состояние, моделирование, язык JAVA, конечно-элементный анализ, программный комплекс ANSYS.

**T. A. ZAYTSEVA, I. I. SHMELOV**

## **MODERN APPROACHES TO SOLVING THE CONTACT PROBLEM OF PRESSING A DOUBLE-STAMP STAMP INTO AN ELASTIC HALF-SPACE**

The work is devoted to solving indentation problems into an elastic half-space of a cylindrical punch with a flat base by the vertical force. The force is aimed through the center of the base. The cross-section of the stamp is a doubly connected area bounded by two concentric lines. A concise review of methods for solving problems of analyzing the contact interaction of cylindrical dies with an elastic half-space is given. The solution of the problem in the form of decomposition by a small parameter is used when the equation of the edge curves depends on the same small parameter. To achieve it, in each approximation, the problem of indentation of a stamp with a doubly connected contact area in the form of a non-circular ring is reduced to a similar problem of indentation of a stamp with a contact area in the form of a circular ring. The software in the Java language has been developed for processing the analytical solution according to the obtained calculation formulas. With the help of the ANSYS software package, a finite element model of the contact interaction of an absolutely rigid stamp with an elastic half-space has been created. Numerical modeling was carried out using a licensed version of the program, free of charge. Several problems have been solved for square rings of different widths. The distribution of pressure under the stamp over different sections and the deepening of the stamp have been obtained. The pressure distribution graphs are plotted. When considering several test problems to assess the adequacy of the finite element model, the numerical results are compared with the results obtained analytically. The resulting model can analyze and predict loads, wear, and fracture of the contact area. The research prospects can include the solution of several problems of analysis of the stress-strain state of the interaction of dies of a complex shape with an elastic half-space, as well as groups of stamps of a complex shape, and the analysis of behavior models depending on the properties and characteristics of an elastic half-space.

**Keywords:** contact problem, stamp, stress-strain state, modeling, JAVA language, finite element analysis, ANSYS software package.

**Вступ.** Дослідження напружено-деформованого стану взаємодіючих тіл є досить актуальним завданням сьогодення, яке має значне теоретичне і практичне значення [1]. Розв'язання задач контактної взаємодії між

тілами мають широке застосування в таких галузях, як машинобудування, будівельна механіка, геофізика, сейсмологія та багатьох інших галузях інженерної діяльності. Адаже саме контактними взаємодіями в першу чергу визначаються процеси зносу, а величина контактних тисків є визначальним чинником, який викликає руйнування в зоні контакту [2]. Питання міцності і зносостійкості в процесі експлуатації обумовлюють актуальність теми дослідження для випадків, коли в ролі деформованого півпростору приймаються автомобільні дороги, ґрунтові основи [3] або фундаменти багатоповерхових і висотних будівель та споруд.

Складність розв'язання таких задач у аналітичній постановці обумовлює розробку нових підходів, що використовують чисельні методи рішення. До основних інструментів чисельного аналізу контактних задач механіки відносяться методи скінчених і граничних елементів [4], а також їх різні модифікації.

**Аналіз стану питання.** У зв'язку з бурхливим розвитком обчислювальної техніки, з'явилася тенденція в застосуванні методу скінчених елементів для розв'язання контактних задач теорії пружності [5]. Одними з перспективних напрямків розробки ефективних алгоритмів для задач цього класу є підходи, засновані на застосуванні методу граничних інтегральних рівнянь [6, 7]. Усучаснені варіанти розв'язання задач взаємодії жорсткого штампів та пружного півпростору з порожнинами [8] залишаються актуальними. Роботи [9, 10], в свою чергу, зосереджені на огляді моделей взаємодії жорстких штампів канонічної форми з пружним півпростором при відсутності початкових напружень. Розв'язання задач контактної взаємодії жорстких штампів із попередньо напруженими тілами представлені в [11]. Вплив початкових напружень на контактну взаємодію жорсткого кільцевого штампів з пружним півпростором представлено в роботі [12]. З використанням R-функцій [13] отримано наближений розв'язок задачі про вдавнення еліптичного кільцевого штампів у пружний півпростір.

Аналітичний розв'язок задачі про кільцевий штамп у вигляді подвійного ряду, коефіцієнти якого для довільних значень індексів визначаються точно з рекурентних співвідношень одержано у роботі [14]. Як приклад розвинення метод застосовуваний у роботі [15] для плоских еліптичних штампів із заокругленим краєм. Для штампів у формі прямокутного кільця вище зазначеним методом отримано рішення у роботі [16]. Робота [17] присвячена розв'язанню задач про вдавнення в пружний півпростір штампів різної конфігурації у формі не кругових кілець.

Багато сучасних робіт присвячено автоматизації та комп'ютеризації застосування скінчено-елементного аналізу з використанням програмних продуктів. До найбільш застосовуваних відносяться ABAQUS, ANSYS, AUTOCAD, INVENTOR, DEFORM, STRESS CHECK, FORG, MARC, COSMOS M, SIMSCALE, MFEM, MATLAB та інші [18].

**Постановка задачі.** Розглянемо задачу про вдавнення в пружний півпростір циліндричного штампів з

плоскою основою під дією вертикальної сили  $Q$ , лінія дії якої проходить через центр основи. Поперечний перетин штампів займає двозв'язну область  $\Omega$ , обмежену двома лініями  $\Gamma_1, \Gamma_2$ , що представляють лінії, з рівняннями близькими до квадратів зі сторонами, які дорівнюють відповідно  $2a, 2b, a < b$ .

Рівняння представимо у полярній системі координат рядами Фур'є:

$$\rho_{\Gamma_1} = af(\theta), \rho_{\Gamma_2} = bf(\theta),$$

$$f(\theta) = 1,1150 - 0,1406 \cos 4\theta +$$

$$+ 0,02506 \cos 8\theta + \dots$$

**Розв'язання задачі та обчислення результатів.** Для випадка коли рівняння граничних кривих залежать від одного і того ж малого параметра, отримано наближений розв'язок задачі у вигляді розкладення за малим параметром. У кожному наближенні задача про вдавнення штампів з двозв'язною площадкою контакту у формі некругового кільця зводиться до аналогічної задачі про вдавнення штампів з площадкою контакту у формі кругового кільця [14]. Неперервна, диференційована функція  $f(\theta)$  у рівняннях границі області набуває вигляду:

$$f(\varepsilon, \theta) = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \varepsilon^i f_i(\theta),$$

$$f_1(\theta) = -\cos 4\theta + 0,8178,$$

$$f_2(\theta) = 1,2677 \cos 8\theta,$$

$$\varepsilon = 0,1406; b = 2a.$$

Оскільки штамп вдавнюється в пружний півпростір вертикальною силою  $Q$ , лінія дії якої проходить через центр ваги області контакту, то  $x_{10} = 0$ ,  $x_{20} = 0$ , де  $(x_{10}, x_{20})$  – координати точки перетину цієї сили з площиною  $Ox_1x_2$  і отже, в рівняннях рівноваги:

$$P = Q; M_1 = x_{20}Q = 0; M_2 = x_{10}Q = 0.$$

Представимо шукане розташування нормальних тисків під штампом  $P(\rho, \theta)$  і вертикальне переміщення штампів  $\delta$  у вигляді ряду за ступенями  $\varepsilon$  [15]:

$$P(\rho, \theta) = \sum_{k=0}^{\infty} P_k(\rho, \theta) \varepsilon^k,$$

$$\delta = \sum_{k=0}^{\infty} \delta_k \varepsilon^k.$$

Для визначення  $P_k(\rho, \theta)$  і  $\delta_k$  використаємо наступні системи двовимірних інтегральних рівнянь [17]:

$$\frac{\delta_k 2\pi G}{1-\nu} = \iint_D \frac{P_k(\rho, \theta)}{r} ds + \Phi_k(P_0, P_1, \dots, P_{k-1}),$$

де  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона;  
 $G$  – модуль зсуву;

$D$  – кругове кільце ( $a \leq \rho \leq b$ ).

$$Q_k = \iint_D P_k(\rho, \theta) ds + F_k(P_0, P_1, \dots, P_{k-1}),$$

де прийняті наступні позначення (при  $k = 0, 1, 2, \dots$ ):

$$\Phi_0 = 0; \Phi_1 = \left(1 - \rho_0 \frac{\partial}{\partial \rho_0}\right) \iint_D \frac{P_0(\rho)}{r} f_1(\theta) ds;$$

$$\Phi_2(P_0, P_1) = \left(1 - \rho_0 \frac{\partial}{\partial \rho_0}\right) \iint_D [P_1(\rho, \theta) f_1(\theta) + P_0(\rho) f_2(\theta)] \frac{\partial s}{r} + \rho_0^2 \frac{\partial^2}{\partial \rho_0^2} \iint_D \frac{P_0(\rho)}{2r} f_1^2(\theta) ds;$$

$$F_0 = F_1(P_0) = 2 \iint_D P_0(\rho) f_1(\theta) ds;$$

$$F_2(P_0, P_1) = \iint_D [2P_1(\rho, \theta) f_1(\theta) + 2P_0(\rho) f_2(\theta) + P_0(\rho) f_1^2(\theta)] ds;$$

$$Q_0 = Q; Q_k = 0, k \neq 0;$$

$$r^2 = \rho^2 + \rho_0^2 - 2\rho\rho_0 \cos(\theta - \theta_0); (\rho_0, \theta_0) \in D.$$

Функції  $P_k(\rho, \theta)$  пов'язані з  $p_k(\rho, \theta)$  для  $k = 0, 1, 2$  співвідношеннями:

$$P_0(\rho) = p_0(\rho);$$

$$P_1(\rho, \theta) = p_1(\rho, \theta) + p_0(\rho) \rho f_1(\theta);$$

$$P_2(\rho, \theta) = p_2(\rho, \theta) + p_0(\rho) \rho f_2(\theta) + p_1(\rho, \theta) \rho f_2(\theta) +$$

$$+ 0,5 p_0(\rho) \rho^2 f_1^2(\theta).$$

Використаємо залежності для цих величин, коли  $b = 2a$ ,  $\varepsilon = 0,1406$ , що отримані раніше [17]. Одержуємо, що контактний тиск під квадратним кільцевим штампом, коли  $b = 2a$  у точках променя  $(\rho, \theta_*)$ , що виходить з початку координат і пересікає зовнішній і внутрішній контури області контакту в точках  $(\rho_{\Gamma_2}, \theta_*)$  і  $(\rho_{\Gamma_1}, \theta_*)$  відповідно, виражається залежністю:

$$p(\rho, \theta_*) = P_0 + \varepsilon P_1,$$

$$P_0 = \frac{Q}{2\pi b^2} \sigma_0,$$

$$P_1 = \frac{Q}{2\pi b^2} [-1,6356\sigma_0 + (-0,5314\sigma_0 + 1,05132\sigma_1 - 1,02095\sigma_2 + 0,7021\sigma_3) \cos 4\theta],$$

$$\sigma_i = \frac{\pi}{2} \gamma \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{p=0}^{\infty} \left[ \alpha_{pk}^{(i)} \left( \frac{\rho}{\rho_{\Gamma_2}} \right)^{2k} + \right.$$

$$\left. + \beta_{pk}^{(i)} \left( \frac{\rho_{\Gamma_1}}{\rho} \right)^{2k+3} \right] \left( \frac{a}{b} \right)^p,$$

$$i = 0, 1, 2, 3;$$

$$\gamma^{-1} = \iint_D p_{00}(\rho) ds.$$

Вертикальне переміщення штампа має вигляд:

$$\delta = \frac{Q(1 - \nu)}{4Gb \iint_D p_0(\rho) ds} (1 - 0,8178\varepsilon).$$

Для автоматизації розрахунків за наведеними формулами було розроблено програмний додаток на Java. Однією з причин використання строго типізованої об'єктно-орієнтованої мови програмування стало те, що програми на Java транслюються в байт-код, який виконується віртуальною машиною Java-програмою, відповідальною за обробку байт-коду і передачі інструкції обладнанню, як інтерпретатор. Перевагою подібного способу виконання програм є повна незалежність байт-коду від операційної системи і устаткування, що дозволяє виконувати Java-додатки на будь-якому пристрої, для якого існує відповідна віртуальна машина. Часто до недоліків концепції віртуальної машини відносять зниження продуктивності. Але ряд удосконалень протягом останніх років значно збільшили швидкість виконання програм на Java за рахунок технології трансляції байт-коду в машинний безпосередньо під час роботи програми, широкого застосування native-коду в стандартних бібліотеках та апаратних засобів, що забезпечують прискорену обробку байт-коду. Ці оптимізації дозволили Java надавати еквівалентний рівень швидкості виконання програм у порівнянні з C++.

Саме завдяки цій особливості розроблений додаток в майбутньому має можливість бути трансформованим як у форму мобільного додатку для використання на пристроях під керівництвом операційної системи Android, так і у форму WEB додатку для забезпечення можливості широкого паралельного доступу.

Таким чином, завдяки поєднанню кросплатформності, високої швидкодії та великої кількості open source бібліотек, Java є достатньо потужним інструментом для обробки аналітичного розв'язку за отриманими розрахунковими формулами. Адекватність отриманих розрахунків була підтверджена під час дослідження.

**Програмне середовище розробки скінчено-елементної моделі.** Для розв'язання контактної задачі методом скінчено-елементного аналізу було використано програмну систему ANSYS, що є широко застосовуваною у сфері автоматизованих інженерних розрахунків (CAE) [19, 20]. Чисельне моделювання відбувалося із застосуванням ліцензованої версії, яка надається безкоштовно для використання у наукових дослідженнях [21] та має у своєму складі Ansys Workbench на основі Ansys Mechanical та Ansys SpaceClaim. Для роботи

програмного пакету використовувалася робоча станція, що мала Microsoft Windows 10 (64-bit, Version 20H2, OS build 19042.868), професійні CPU і GPU з підтримкою багатопоточного виконання інструкцій, технології OpenGL і роботи з 3D графікою, та фізичний логічний диск операційної системи, оскільки робота у віртуальному середовищі не підтримується.

Завдяки комплексному підходу, платформа надала можливість поєднати весь процес моделювання задачі у відповідних програмних модулях. У ANSYS SpaceClaim створено геометрію задачі. Генерація елементної сітки виконана за допомогою ANSYS Meshing. Завдяки ANSYS Workbench відбувалися процеси обміну і керування розрахунками.

**Результати комп'ютерного моделювання.** У результаті пошуку більш оптимального розбиття тіла елементною сіткою через зміну глобальної топології, була отримана скінчено-елементна модель за такої схеми розбиття, коли для моделювання різних внутрішніх отворів штампу можна не перебудовувати загальну модель. При чому, застосування регулярної сітки в зоні контакту півпростору зі штампом та поєднання регулярної сітки з нерегулярною за межами цієї зони, надало можливість не перевищити обмеження ліцензованої версії програми за кількістю елементів, не нарощувати розрахункову похибку і зменшити час розрахунків. Для цього було застосовано метод Multizone, який заснований на блоковій технології і забезпечує автоматичний поділ тіла на групи геометричних тіл. До першої групи були віднесені об'єми, до яких застосовувався метод Sweep для побудови розрахункової сітки на основі призматичних елементів. До другої групи – об'єми, для яких застосовувався метод Hex Dominant для побудови розрахункової сітки на основі гексаєдрів. Таким чином, була отримана результуюча модель півпростору, що складається зі 124 тис. елементів.

Розрахунки проводились для ізотропних матеріалів, таких як, наприклад, конструкційні сталі з бібліотеки ANSYS та інших. Потім частина результатів розрахунків була приведена до безрозмірних величин для можливості порівняння з отриманими раніше аналітичними.

Похибка розв'язку при визначенні максимального контактного тиску із зменшенням розміру елементів (як на 10 %, так і на 20 %) ніж у побудованій моделі складає менше 5 %. Таким чином, отримана достатня точність розв'язання поставленої задачі за допомогою створеної скінчено-елементної моделі півпростору. На рис. 1 наведено приклад скінчено-елементної моделі півпростору для випадку коли на нього діє кільцевий квадратний штамп для  $a/b = 0.1$

Проводились чисельні експерименти, коли на півпростір безпосередньо діяв штамп з різними розмірами квадратного кільця  $a/b = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ . Також для моделювання дії штампу на пружний півпростір, було застосовано відповідно розрахований тиск по поверхні елементів зони контакту. На рис.2 наведено поверхню розподілу тиску для  $a/b = 0.5$  під основою штампа.

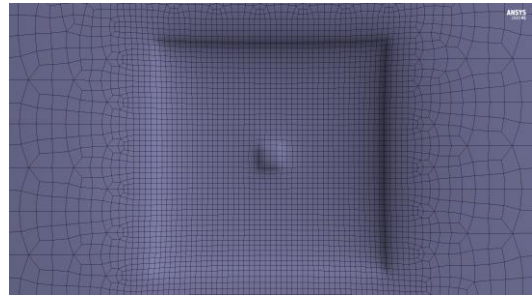


Рис. 1. Вигляд скінчено-елементної моделі зверху: півпростір під дією тиску штампу  $\frac{a}{b} = 0.1$

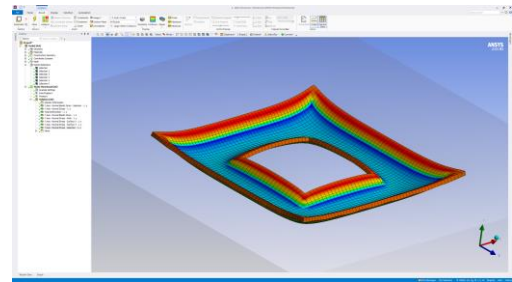


Рис. 2: Поверхня розподілу тиску під квадратним кільцевим штампом для  $\frac{a}{b} = 0.5$

При розв'язанні низки тестових задач з метою оцінки адекватності скінчено-елементної моделі, було проведено порівняння чисельних результатів з результатами, отриманими аналітичним шляхом. Для цього результати чисельних розрахунків були приведені до безрозмірних величин. На рис. 3 суцільною лінією 1 показана залежність нормального тиску  $P^*$  від  $\rho/\rho_{r2}$  при  $\theta = 0$  (для  $a/b = 0.5$ ) [17]. Пунктирною лінією 2 наведено розподіл нормального тиску під кільцевим квадратним штампом, що отримано шляхом розрахунків у пакеті ANSYS. З рис. 3 видно, що нормальні напруження при  $\theta = 0$  отримані аналітичним шляхом на краях зони контакту значно вищі за чисельні та прямують до нескінченності.

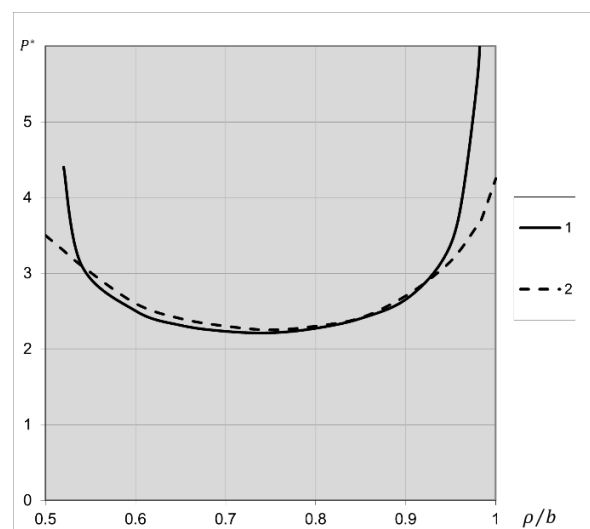


Рис. 3: Графік порівняння аналітичних результатів з чисельними на прикладі розподілу нормального тиску під квадратним кільцевим штампом при  $\theta = 0$ .

На решті ділянки контакту (середня частина кільця) значення нормальних напружень майже близькі, що властиво для застосованих методів розв'язання задачі. Відносна різниця у розрахунках нормального тиску у середній зоні кільця склала 0.042. Також треба відзначити, що напруги ростуть швидше із зовнішньої сторони кільця. Зі зменшенням ширини кільця зростають напруги і з внутрішньої сторони.

Було проведено аналогічні розрахунки і порівняння для штампів різної ширини, а саме  $a/b = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ . З отриманих результатів можна зробити аналогічні висновки.

**Висновки та перспективи досліджень.** У роботі поставлена та розв'язана задача аналізу контактної взаємодії пружного півпростору з циліндричним штампом з плоскою основою під дією вертикальної сили  $Q$ , лінія дії якої проходить через центр основи. Поперечний перетин штампів займає двозв'язну область у формі кільця близького до квадратного. Відтворено аналітичний розв'язок задачі методом зведення до послідовності задач для області контакту у формі кругового кільця із застосуванням розкладу за малим параметром. У кожному наближенні задача про вдавнення штампів з двозв'язною площадкою контакту у формі некругового кільця зводиться до аналогічної задачі про вдавнення штампів з площадкою контакту у формі кругового кільця. Розроблено програмне забезпечення на мові Java для обробки аналітичного розв'язку за отриманими розрахунковими формулами.

За допомогою програмного пакету ANSYS створено модель контактної взаємодії абсолютно жорсткого штампів з пружним півпростором. Обрана конфігурація схеми розбиття – скінчено-елементна модель, та розв'язана низка задач для квадратних кілець різної ширини.

Отримано розподіл тиску під штампом у різних перерізах та заглиблення штампів. Побудовані графіки розподілу тиску. Проведено порівняльний аналіз чисельних результатів з аналітичними, що отримані раніше. Це надало змогу казати про адекватну роботу скінчено-елементної моделі.

Таким чином, отримана модель може бути використана для аналізу та прогнозування навантаження, зносу та руйнування контактної ділянки.

У подальшому передбачається розв'язання низки задач аналізу напружено-деформованого стану взаємодії штампів складної форми з пружним півпростором, а також групи штампів різної форми, які включають у себе штампів як канонічних форм так і складно-профільних, та аналіз поведінки моделі в залежності від властивостей та особливостей пружного півпростору.

#### Список літератури

1. Спица О. Г. Численный анализ контактного взаимодействия штампа и многослойного упругого полупространства. *Вісник Запорізького національного університету*. 2015. № 3. С. 249–255.
2. Bosakov S. Two Contact Problems for Circular Die Pressing-In in Elastic Half Space. *Science and Technique*. 2018. Vol. 17, no. 6. P. 458–464;
3. Пущин Р. В., Пыхалов А. А. Анализ напряжений замковой части рабочих лопаток авиационных двигателей с конечно-элементным решением контактной задачи теории упругости.

- Труды МАИ*. 2020. № 110. С. 14–21. doi: 10.34759/trd-2020-110-11.
4. Андрієвський В. П., Максим'юк Ю. В., Мицюк С. В., Пискунов С. О. Дослідження еволюції напружено-деформованого стану і визначення розрахункового ресурсу масивних елементів вісесиметричних конструкцій із використанням універсального скінченного елемента. *Вісник Національного Технічного Університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ». 2018. № 22 (1298). С. 66–72.
5. Mikhailova E., Tarlakovskii D., Fedotenkov G. Transient contact problem for spherical shell and elastic half-space. *Shell Structures: Theory and Applications*. 2017. Vol. 4. P. 301–304. doi: 10.1201/9781315166605-67.
6. Игумнов Л. А., Марков И. П. Моделирование динамики трехмерных линейных электроупругих тел с отверстиями с помощью метода граничных элементов. *Проблемы прочности и пластичности*. 2017. Т. 79, № 3. С. 348–356. doi: 10.32326/1814-9146-2017-79-3-348-356.
7. Zhao J., Vollebregt E. A., Oosterlee C. W. Extending the BEM for Elastic Contact Problems Beyond the Half-Space Approach. *Mathematical Modelling and Analysis*. 2016. Vol. 21, no. 1. P. 119–141. doi: 10.3846/13926292.2016.1138418.
8. Yulong L., Arutiunian A., Kuznetsova E., Fedotenkov G. Method for solving plane unsteady contact problems for rigid stamp and elastic half-space with a cavity of arbitrary geometry and location. *INCAS BULLETIN*. 2020. Т. 12. С. 99–113. doi: 10.13111/2066-8201.2020.12.S.9.
9. Schanz M., Ye W., Xiao J. Comparison of the convolution quadrature method and enhanced inverse FFT with application in elastodynamic boundary element method. *Computational Mechanics*. 2016. Vol. 57. P. 523–536. doi: 10.1007/s00466-015-1237-z.
10. Гузь А. Н., Рудницкий В. Б. *Основы теории контактного взаимодействия упругих тел с начальными (остаточными) напряжениями*. Хмельницький: вид. ПП Мельник, 2006. 710 с.
11. Babich. S. Contact Problem for Two Identical Strips Reinforced by Periodically Arranged Fasteners with Initial Stresses. *International Applied Mechanics*. 2019. Vol. 55, no. 6. P. 629–635.
12. Yaretskaya N. A. Contact Problem for the Rigid Ring Stamp and the Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. 2018. Vol. 54, no. 5. P. 539–543.
13. Рвачев В. Л., Проценко В. С. *Контактные задачи теории упругости для неклассических областей*. Київ: Наук. думка, 1977. 235 с.
14. Roitman A. B., Shishkanova S. F. The solution of the annular punch problem with the aid of recursion relations. *Soviet Applied Mechanics*. 1973. No. 9(7). P. 725–729.
15. Shyshkanova S. F. Indentation of an elliptical die with a rounded edge into an elastic half-space. *Mechanics of solids*. 1987. No. 22(3). P. 74–77.
16. Shyshkanova G. A., Zaytseva T. A., Frydman A. D. The analysis of manufacturing errors effect on contact stresses distribution under the ring parts deformed asymmetrically. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 7. P. 352–357.
17. Зайцева Т. А., Шишканова Г. А. *Розв'язання просторових контактних задач для неклассических багатозв'язних областей*. Дніпро: Вид-во ДНУ, 2011. 192 с.
18. Moaz H. Finite Element Analysis is A Powerful Approach To Predictive Manufacturing Parameters. *Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences*. 2017. No. 26(1). P. 229–238.
19. Зайцева Т. А., Шмельов І. І. Використання методу скінчених елементів для моделювання контактних задач в пакеті Ansys. *Тези доповідей XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПІС-2020)»*. Дніпро: ДНУ, 2020. С. 114–115.
20. Гулаков С. В., Щербаков С. В. Применение программной системы конечно-элементного анализа ANSYS для компьютерного моделирования напряженного состояния цилиндрических изделий при воздействии локальным источником нагрева. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету*. Сер.: Технічні науки. 2015. Т. 2, №30. С. 21–26.
21. Ansys Free Student Software Downloads. URL: <https://www.ansys.com/academic/free-student-products> (дата звернення: 30.02.2021).

## References (transliterated)

- Spitsa O. G. Chislennyi analiz kontaktnogo vzaimodejstviya shtampa i mnogoslojnego uprugogo poluprostanstva [Numerical analysis of the contact interaction of the stamp and the multilayer elastic half-space]. *Visnik Zaporiz'kogo nacional'nogo universitetu* [Bulletin of Zaporizhzhya National University]. Zaporizhzhia, "ZNU" Publ., 2015, no 3, pp. 249–255.
- Bosakov S. Two Contact Problems for Circular Die Pressing-In in Elastic Half Space. *Science and Technique*. 2018, vol. 17, no. 6, pp. 458–464.
- Pushchin R. V., Pykhalov A. A. Analiz napryazhenij zamkovoij chasti rabochih lopatok aviacionnyh dvigatelej s konechno-elementnym resheniem kontaktnoj zadachi teorii uprugosti [Stress analysis of the locking part of the blades of aircraft engines with a finite-element solution of the contact problem of the theory of elasticity]. *Trudy MAI*. 2020, no. 110, pp. 14–21. doi: 10.34759/trd-2020-110-11.
- Andrievsky V. P., Maksymuk Yu. V., Mytsiuk S. V., Piskunov S. O. Doslidzhennya evolyucii napruzhenno-deformovanogo stanu i viznachennya rozrahunkovogo resursu masivnih elementiv visesimetrichnih konstrukcij iz vikoristannyam universal'nogo skinchennogo elementu [Investigation of the evolution of the stress-strain state and determination of the calculated resource of massive elements of axisymmetric structures using a universal finite element]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management, and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 22 (1298), pp. 66–72.
- Mikhailova E., Tarlakovskii D., Fedotenkov G. Transient contact problem for spherical shell and elastic half-space. *Shell Structures: Theory and Applications*. 2017, vol. 4, pp. 301–304. doi: 10.1201/9781315166605-67.
- Igumnov L. A., Markov I. P. Modelirovanie dinamiki trekhmernykh linejnykh elektropugnykh tel s otverstiyami s pomoshch'yu metoda granichnykh elementov [Modeling the dynamics of three-dimensional linear electroelastic bodies with holes using the method of boundary elements]. *Problems of strength and ductility*. 2017, vol. 79, no. 3, pp. 348–356. doi: 10.32326/1814-9146-2017-79-3-348-356.
- Zhao J., Vollebregt E. A., Oosterlee C. W. Extending the BEM for Elastic Contact Problems Beyond the Half-Space Approach. *Mathematical Modeling and Analysis*. 2016, vol. 21, no. 1, pp. 119–141. doi: 10.3846 / 13926292.2016.1138418.
- Yulong L., Arutiunian A., Kuznetsova E., Fedotenkov G. Method for solving plane unsteady contact problems for rigid stamp and elastic half-space with a cavity of arbitrary geometry and location. *INCAS BULLETIN*. 2020, vol. 12, pp. 99–113. doi: 10.13111/2066-8201.2020.12.S.9.
- Schanz M., Ye W., Xiao J. Comparison of the convolution quadrature method and enhanced inverse FFT with application in elastodynamic boundary element method. *Computational Mechanics*. 2016, vol. 57, pp. 523–536. doi: 10.1007/s00466-015-1237-z.
- Guz A. N., Rudnitsky V. B. *Osnovy teorii kontaktnogo vzaimodejstviya uprugih tel s nachal'nymi (ostatochnymi) napryazheniyami* [Fundamentals of the theory of contact interaction of elastic bodies with initial (residual) stresses]. Khmelnytsky, Melnik Publ., 2006. 710 p.
- Babich. S. Contact Problem for Two Identical Strips Reinforced by Periodically Arranged Fasteners with Initial Stresses. *International Applied Mechanics*. 2019, vol. 55, no. 6, pp. 629–635.
- Yaretskaya N. A. Contact Problem for the Rigid Ring Stamp and the Half-Space with Initial (Residual) Stresses. *International Applied Mechanics*. 2018, vol. 54, no. 5, pp. 539–543.
- Rvachev V. L., Protsenko V. S. *Kontaknyye zadachy teorii uprugosti dlia neklassycheskikh oblastei* [Contact problems of elasticity theory for non-classical domains]. Kyiv, Nauk. Dumka Publ., 1977. 235p.
- Roitman A. B., Shishkanova S. F. The solution of the annular punch problem with the aid of recursion relations. *Soviet Applied Mechanics*. 1973, no. 9(7), pp. 725–729.
- Shyshkanova S. F. Indentation of an elliptical die with a rounded edge into an elastic half-space. *Mechanics of solids*. 1987, no. 22(3), pp. 74–77.
- Shyshkanova G. A., Zaytseva T. A., Frydman A. D. The analysis of manufacturing errors effect on contact stresses distribution under the ring parts deformed asymmetrically. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015, no. 7, pp. 352–357.
- Zaitseva T. A., Shishkanova G. A. Rozv'yazannya prostorovykh kontaktnykh zadach dlya neklasichnykh bagatozv'yaznykh oblastej [Solving spatial contact problems for nonclassical multiconnected domains]. Dnipro, DNU Publ., 2011. 192 p.
- Moaz H. Finite Element Analysis is A Powerful Approach To Predictive Manufacturing Parameters. *Journal of the University of Babylon for Pure and Applied Sciences*. 2017, no. 26(1), pp. 229–238.
- Zaytseva T. A., Shmelov I. I. Vikoristannya metodu skinchennykh elementiv dlya modelyuvannya kontaktnykh zadach v paketi Ansys [Using the finite element method for modeling contact problems in the Ansys package]. *Trudy mezhdunar. konferentsii "Matematichne ta programne zabezpechennya intelektual'nykh sistem (MPZIS-2020)" (18–20 listopada, 2020, Dnipro)* [Proc. of the Int. Conf. "Mathematical support and software for intelligent systems (MSSIS-2020)"]. Dnipro, DNU Publ., 2020, pp. 114–115.
- Gulakov S. V., Shcherbakov S. V. Primenenie programnoj sistemy konechno-elementnogo analiza ANSYS dlya komp'yuternogo modelirovaniya napryazhennoho sostoyaniya cilindricheskikh izdelij pri vozdejstvii lokal'nykh istochnikom nagreva [Application of the ANSYS finite element analysis software system for computer modeling of the stress state of cylindrical products under the influence of a local heat source]. *Visnik Priazov'skogo Derzhavnogo Tekhnichnogo Universitetu. Ser.: Tekhnichni nauki* [Bulletin of the Azov State Technical University. Thematic issue: Technical Sciences]. 2015, vol. 2, no. 30, pp. 21–26.
- Ansys Free Student Software Downloads. Available at: <https://www.ansys.com/academic/free-student-products> (accessed 30.02.2021).

Надійшла (received) 18.04.2021

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

**Зайцева Тетяна Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, доцент кафедри комп'ютерних технологій; м. Дніпро, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6346-3390>; e-mail: [ztan2004@ukr.net](mailto:ztan2004@ukr.net)

**Шмельов Іван Ігорович** – Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, аспірант кафедри комп'ютерних технологій; м. Дніпро, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6558-1887>; e-mail: [shmel.ivan@gmail.com](mailto:shmel.ivan@gmail.com)

**Зайцева Тетяна Анатоліївна** – кандидат технических наук, доцент, Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, доцент кафедры компьютерных технологий; м. Днепр, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6346-3390>; e-mail: [ztan2004@ukr.net](mailto:ztan2004@ukr.net)

**Шмелев Иван Игоревич** – Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, аспирант кафедры компьютерных технологий; м. Днепр, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6558-1887>; e-mail: [shmel.ivan@gmail.com](mailto:shmel.ivan@gmail.com)

**Zaytseva Tetyana Anatoliyivna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Oles Honchar Dnipro National University, Associate Professor of the Department of Computer Technologies; Dnipro, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6346-3390>; e-mail: [ztan2004@ukr.net](mailto:ztan2004@ukr.net)

**Shmelov Ivan Ihorovich** – Oles Honchar Dnipro National University, postgraduate student of the Department of Computer Technologies; Dnipro, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6558-1887>; e-mail: [shmel.ivan@gmail.com](mailto:shmel.ivan@gmail.com)

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### INFORMATION TECHNOLOGY

УДК 65.011.56

DOI: 10.20998/2079-0023.2021.01.13

**Є. П. ПАВЛЕНКО, В. М. БУТЕНКО, В. О. ГУБІН, С. В. ЛУБЕНЕЦЬ**

#### ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ТИПІВ ДАНИХ ПРИ РОЗРОБЦІ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

У роботі розглядаються проблеми підвищення ефективності розробки програмного забезпечення, зокрема, питання зменшення термінів розробки програм та використання автоматизованого синтезу програм, що дозволить уникнути доопрацювання вихідного продукту. Програмне забезпечення потрібно протестувати разом з іншими системними компонентами у всіх поєднаннях, які можуть зустрітись. Тестування займає багато часу, бо приховані помилки виявляються при несподіваних взаємодіях програмних компонентів. При структурному аналізі діаграми потоків даних не є кінцевим результатом, це інструмент розробників. Спочатку будуються діаграми, а потім розробляються механізми, що забезпечують необхідну поведінку системи. Розвивається графічний підхід до вирішення проблеми автоматизації розробки програмних засобів, який базується на залученні візуальних форм представлення програм. Для будь-якого програмного об'єкта можна виділити кінцеве число станів, в яких він перебуває в кожен момент часу. Хід виконання програми тоді асоціюється з переходами об'єкта з одного стану в інший. Граф замінює текстову форму опису алгоритму програми, при цьому реалізується подання алгоритму в візуальній формі. Специфікація структур даних, а також установка міжмодульного інтерфейсу за даними відділена від опису структури алгоритму і елементів управління. Використовуються базові модулі і типи даних. Базові модулі є локальними обчислюваними функціями, на основі яких породжуються всі інші об'єкти технології. Типи даних описують синтаксичний і семантичний аспекти побудови даних, що використовуються в базових функціях. Розглянуто алгоритми пошуків маршрутів на орієнтованих графах. Під час визначення маршрутів з кореневої вершини в кінцеві використано властивості алгебри трізначної логіки. На підставі розглянутого підходу, а також з урахуванням його недоліків, був запропонований метод класифікації типів даних, заснований на реалізації часткового перебору маршрутів графу зв'язків програми та спосіб проектування ПЗ на його основі з урахуванням мінімізації часу і вартості проекту.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, комп'ютерна інженерія, інформаційні системи, компоненти, частковий перебір маршрутів графу, витрати на розробку.

**Е. П. ПАВЛЕНКО, В. М. БУТЕНКО, В. А. ГУБИН, С. В. ЛУБЕНЕЦ**

#### ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ТИПОВ ДАННЫХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ИНЖЕНЕРИИ

В работе рассматриваются проблемы повышения эффективности разработки программного обеспечения, в частности, вопрос уменьшения сроков разработки программ и использования автоматизированного синтеза программ, что позволит избежать доработки исходного продукта. Программное обеспечение нужно протестировать вместе с другими системными компонентами во всех сочетаниях, которые могут встретиться. Тестирование занимает много времени, так как скрытые ошибки выявляются при неожиданных взаимодействиях программных компонентов. При структурном анализе диаграммы потоков данных не являются конечным результатом, это инструмент разработчиков. Сначала строятся диаграммы, а затем разрабатываются механизмы, обеспечивающие необходимое поведение системы. Развивается графический подход к решению проблемы автоматизации разработки программных средств, основанный на привлечении визуальных форм представления программ. Для любого программного объекта можно выделить конечное число состояний, в которых он находится в каждый момент времени. Граф заменяет текстовую форму описания алгоритма программы, при этом реализуется представление алгоритма в визуальной форме. Спецификация структур данных, а также установка межмодульных интерфейса по данным отделена от описания структуры алгоритма и элементов управления. Используются базовые модули и типы данных. Базовые модули являются локальными исчисляемыми функциями, на основе которых порождаются все остальные объекты технологии. Рассмотрены алгоритмы поиска маршрутов на ориентированных графах. На основании рассмотренного подхода, а также с учетом его недостатков, был предложен метод классификации типов данных, основанный на реализации частичного перебора маршрутов графа связей программы и способ проектирования ПО на его основе с учетом минимизации времени и стоимости проекта.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, компьютерная инженерия, информационные системы, компоненты, частичный перебор маршрутов графа, затраты на разработку.

**Y. P. PAVLENKO, V. M. BUTENKO, V. O. GUBIN, S. V. LUBENETS**

#### RESEARCH OF DATA TYPE CLASSIFICATION METHODS WHEN DEVELOPING COMPUTER ENGINEERING SOFTWARE

The paper deals with the problems of increasing the efficiency of software development, in particular, the issue of reducing the time for developing programs and using automated synthesis of programs, which will avoid the revision of the original product. The software should be tested along with

© Є. П. Павленко, В. М. Бутенко, В. О. Губін, С. В. Лубенець, 2021

other system components in all combinations that may occur. Testing is time-consuming because hidden bugs are revealed through unexpected interactions between software components. With structural analysis, data flow diagrams are not the end result, they are a developer tool. First, diagrams are built, and then mechanisms are developed to ensure the required system behavior. A graphical approach to solving the problem of automation of software development is being developed, based on the involvement of visual forms of program presentation. For any program object, you can select a finite number of states in which it is at each moment of time. The program progress is associated with the transition of an object from one state to another. The graph replaces the textual form of the description of the program algorithm, while the visual representation of the algorithm is realized. The specification of data structures, as well as the setting of intermodular interfaces according to data, is separated from the description of the structure of the algorithm and controls. Basic modules and data types are used. Basic modules are local calculable functions, on the basis of which all other technology objects are generated. Data types describe the syntactic and semantic aspects of constructing data used in base functions. Algorithms for finding routes on directed graphs are considered. When defining routes from the root vertex to the final ones, the properties of the algebra of three-valued logic were used. Based on the considered approach, as well as taking into account its shortcomings, a method for classifying data types was proposed, based on the implementation of a partial enumeration of the routes of the graph of program links and a method for designing software based on it, taking into account minimizing the time and cost of the project.

**Keywords:** software, computer engineering, information systems, components, partial enumeration of graph routes, development costs.

**Вступ.** Проблеми якості роботи програмного забезпечення (ПЗ) комп'ютерної інженерії зараз набули першорядну важливість. В різних джерелах докладно обговорюються фактори, що впливають на ефективність використання ПЗ на підприємствах, але слід проаналізувати головний фактор, що визначає якість використання ПЗ. Цей фактор – технологія створення і супроводу ПЗ.

Слід звернути увагу на фактор часу, який необхідно витратити на розробку ПЗ до введення його в експлуатацію, оскільки час розробки є основним критерієм, що визначає витрати на створення ПЗ. Вимоги до ПЗ, до його функцій можуть змінюватися, адже вони визначаються середовищем, в якому буде працювати ПЗ, отже час, як ресурс, має найбільш значну вагу при розрахунку економічної доцільності створення програмного продукту.

Для скорочення часу розробки і підвищення якості ПЗ розроблена достатня кількість технологій і підходів. Вони стосуються не тільки етапів життєвого циклу ПЗ, але й побудови структури компанії-розробника програмних продуктів.

Використання автоматичного синтезу програм дозволяє розробнику програмних продуктів реалізовувати систему графів переходів у вигляді програми, що дозволяє знизити вимоги до його кваліфікації, автоматизувати процес програмування. Результат розробки мовами високого рівня залежить від використовуваної мови програмування, необхідно визначити класи, атрибути, області дії змінних.

**Постановка проблеми.** Якість ПЗ визначається методами і способами моделювання предметної області, які дозволяють здійснювати розробку структур баз даних, інформаційної структури розроблюваного ПЗ.

Програма повинна бути спроектована таким чином, щоб використовувати заздалегідь обумовлену кількість ресурсів – обсягу пам'яті, часу процесора тощо. ПЗ потрібно протестувати разом з іншими системними компонентами у всіх поєднаннях, які можуть зустрітися. Тестування займає багато часу, бо приховані помилки виявляються при несподіваних взаємодіях програмних компонентів.

Складність ПЗ збільшилася, виділилися області, в яких помилки або недостатня якість програм можуть завдати шкоди, яка перевищить економічний ефект від їх використання.

Ефективність розробки ПЗ визначається сукупністю багатьох факторів. Існують різноманітні

підходи до оцінки якості розробки ПЗ, які мають переваги і недоліки. Таким чином, виникає задача дослідження технологій використання автоматизованого синтезу програм, які дозволяють скоротити час розробки програмного продукту, а також дослідження підвищення ефективності їх застосування.

**Аналіз стану проблеми.** Досить часто плани створення складних програмних засобів і БД готуються і оцінюються некваліфіковано, на основі думок замовників і розробників про необхідні функції та можливі якості ПЗ. Тому помилки при визначенні необхідних показників якості, оцінки трудомісткості, вартості та тривалості створення ПЗ є поширеним явищем. Часто проекти ПЗ не відповідають вимогам до характеристик якості, не вкладаються в графіки і бюджет розробки.

Застосування стандартів, що регламентують процеси життєвого циклу ПЗ, може служити основою для забезпечення якості програмних засобів, однак потрібне коригування та адаптація деяких положень стандартів стосовно особливостям технологій програмування.

Виділяються два типи підходів до розробки ПЗ – структурний та об'єктно-орієнтований. Оскільки в об'єктно-орієнтованому ПЗ екземпляри класів обмінюються повідомленнями, для кожного класу визначають повідомлення, які надходять його об'єктам і на їх основі будують діаграми переходу [1]. Також будують моделі станів для кожного об'єкта і визначають списки подій, що змінюють стан об'єктів [2].

Після виділення класів і їх опису можна побудувати моделі процесів, які повинні бути реалізовані в майбутній програмі [3].

Якщо користувач правильно вказав всі характеристики даного, потрібно побудувати екземпляр об'єкта і включити його в множину даних [4].

Структурний аналіз є альтернативою процесам та етапам об'єктно-орієнтованого аналізу. Після проведення структурного аналізу будується модель системи, описана діаграмами потоків даних й іншими елементами. Ці діаграми дають формальну модель проблеми. Потім можна приступити до визначення класів і об'єктів різними способами.

Один із способів полягає в тому, що спочатку формується словник даних і потім виконується аналіз контекстних діаграм моделі [5].

Інший спосіб полягає в аналізі окремих діаграм потоків даних. В якості об'єктів розглядаються зовнішні сутності, сховища даних, керуючі перетворення, сховища керуючих сутностей. В якості класів – потоки даних, потоки управління. Перетворення даних розглядається як операція над існуючими об'єктами або як поведінка об'єкту, який створюється для виконання необхідного перетворення [6].

В структурному аналізі вхідні та вихідні дані вивчаються, поки не досягнуть вищого рівня абстракції. Процес перетворення вхідних даних у вихідні є основним. Після визначення основної сутності в діаграмі потоків даних вивчається вся інфраструктура, простежуються вхідні та вихідні потоки даних від неї, групуються процеси і стани, як основні, так і побічні.

При структурному аналізі діаграми потоків даних не є кінцевим результатом, це інструмент розробників. Спочатку будуються діаграми, а потім розробляються механізми, що забезпечують необхідну поведінку системи. Зберігається тільки продукт структурного аналізу високого рівня абстракції. Він є незалежним від проекту системи [7].

Засоби автоматизації програмування орієнтовані на наближення мови програмування до способу мислення програміста, в бездирективному методі організації розробки програм. Підвищення продуктивності праці програміста пов'язується з більшою зрозумілістю програмного коду.

При дедуктивному синтезі програм використовується формальний метод побудови програм. Розробка програми з заданої специфікації розглядається як задача доказу існування потрібного рішення.

Індуктивний синтез програм ґрунтується на знаходженні спільних для заданої множини прикладів процедур, що ведуть до розв'язання задачі. Індуктивний синтез програм може здійснюватися на синтаксичному рівні, коли використовуються зовнішні ознаки програм, або на семантичному рівні, коли в основі лежить семантика моделі програми [8].

Розвивається також графічний підхід до вирішення проблеми автоматизації розробки програмних засобів, який базується на залученні візуальних форм представлення програм. Застосування графічних методів дозволяє підвищити продуктивність праці програміста. Графічна форма запису забезпечує високий рівень їх структуризації, дотримання технологічної культури програмування, пропонує надійний стиль програмування [9].

Розробка програмного забезпечення для потреб залізниці має специфіку, зокрема, необхідність підтримувати розподілені обчислення в різних компонентах інформаційних систем на залізничному транспорті [10], [11]. Вибір технології розробки програмного забезпечення для таких систем пропонується виконувати з урахуванням засобів, описаних в [12].

**Метод вирішення проблеми.** Для подання алгоритмів оберемо модель програмного модуля з дискретними станами. Для будь-якого програмного об'єкта можна виділити кінцеве число станів, в яких він

перебуває в кожен момент часу. Хід виконання програми тоді асоціюється з переходами об'єкта з одного стану в інший.

Програма інтерпретується деякою математичною функцією

$$M: in(D) \rightarrow out(D);$$

де  $in(D)$  – множина вхідних даних програмного модуля  $M$ ,  
 $out(D)$  – множина вихідних даних програмного модуля  $M$ .

Граф станів  $G$  визначається як орієнтований граф, вершини якого відповідають стану, а дуги – переходам системи зі стану в стан. Кожна вершина графа позначається відповідною функцією  $f$ .

Дуги графа інтерпретуються як події. Будемо розглядати подію, як зміну стану програмного модулю, яка впливає на виконання програми. Відповідна подія визначає подальший хід виконання програми, яка побудована згідно з певним алгоритмом.

Активізація деякої події залежить від стану об'єкта, яке визначається даними  $D$  модулю  $M$ .

Розглянемо множину предикативних функцій  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ . Це функції, які в залежності від значень даних  $D$  дорівнюють 0 або 1. Дугам графа  $G$  поставимо у відповідність функції  $P$ . Подія, яка виконує перехід на графі, відбувається, якщо модель об'єкта на даному кроці роботи алгоритму знаходиться в стані  $S_i$  та відповідна предикативна функція  $P_{ij}(D)$  дорівнює 1.

В якості алгоритмічної моделі методу використаємо множину  $\langle D, F, P, G \rangle$ , де  $D$  – структури даних,  $F$  – множина функцій предметної області,  $P$  – множина предикативних функцій, що обробляють структури даних предметної області,  $G$  – граф станів об'єкту.

Граф замінює текстову форму опису алгоритму програми, при цьому реалізується подання алгоритму в візуальній формі та відбувається декомпозиція основних компонент опису алгоритму програми. Специфікація структур даних, а також установка міжмодульного інтерфейсу за даними відділена від опису структури алгоритму і елементів управління.

Запропонована алгоритмічна модель визначає деяку функцію і може служити вихідними даними для побудови алгоритмічних моделей інших програм. Таким чином, цей метод допускає побудову ієрархічних алгоритмічних моделей. Структура алгоритмічної моделі залежить від способу декомпозиції об'єкта програмування на множини станів і подій, які визначаються предикативними функціями.

В даній технології використовують базові модулі і типи даних. Базові модулі є локальними обчислюваними функціями, на основі яких породжуються всі інші об'єкти технології. Типи даних описують синтаксичний і семантичний аспекти побудови даних, що використовуються в базових функціях, а також і в об'єктах.

Модуль є замкнутою програмною одиницею з набором входів і показчиків виходів, яку можна

викликати з будь-якого іншого модуля програми і окремо компілювати. В модулі виділяють його зовнішність (інтерфейс) – частину, за допомогою якої модуль пов'язується із зовнішнім середовищем – іншими модулями, операційною системою.

Тип функції визначається як множина відображень з області визначення функції в область результату. Областю визначення функції є декартове множення значень кількох типів формальних параметрів, областю результатів – множина значень деякого одного типу даних.

Функцію розглядають як опис абстрактного типу:  $T_1, T_2, \dots, T_n \rightarrow T_r$ , де  $T_1, T_2, \dots, T_n$  – типи формальних параметрів функції,  $T_r$  – тип результату функції.

Вихідні дані та результати обчислень базових модулів розміщуються в списку типів даних функції, тому тип базового модуля визначається як відображення типів даних з області визначення на область їх значень.

В технології об'єктно-орієнтованого програмування в якості програмних одиниць розглядаються об'єкти. Вони мають конкретний зміст сенс і діють в рамках предметної області програмування. В предметній області вже визначений термінологічний словник даних. Для кожної предметної області будується інформаційне середовище, що дозволяє уніфікувати проектування програмних модулів різними розробниками.

Проблема передачі інформації від однієї програми до іншої представляє собою одну з проблем, яка служить джерелом найбільшої кількості помилок в програмному забезпеченні. Вирішення цієї проблеми досягається за умови введення обмежень на способи і методи побудови міжмодульного інформаційного інтерфейсу, а також за рахунок розробки засобів автоматизації побудови таких інтерфейсів.

Інформація про поділ даних за ознакою їх використання в об'єктах необхідна при побудові на основі об'єкта виконуваного ехе-модуля, для виконання операції інкапсуляції об'єктів та при тестуванні об'єктів.

Операція агрегації з сукупності наявних об'єктів породжує новий об'єкт-агрегат. Проблема автоматизації породження базових модулів представляє практичний інтерес. Як вирішення цієї проблеми пропонується використовувати операцію інкапсуляції об'єктів-агрегатів.

В об'єкті-агрегаті віднесення того чи іншого даного до певного класу залежить від маршруту роботи алгоритму на керуючому графові об'єкта. Задача класифікації даних для об'єктів-агрегатів пов'язана з вирішенням проблеми виділення всіх незалежних маршрутів, які можуть бути реалізовані в графі агрегату.

Задача побудови всіх незалежних маршрутів з кореневої вершини в кінцеві вершини графа еквівалентна задачі декомпозиції вихідного графа на сукупність частин графа, таких, що  $G = \cup R_i$ , де  $R_i$  – орієнтовані маршрути з кореневої вершини в кінцеві.

Кожен з маршрутів є лінійним графом (в загальному випадку вони можуть містити і цикли), а розвитком обчислювального процесу на графі відбувається по одному з виділених напрямів.

Класифікаційні ознаки даних визначаються розташуванням об'єктів на маршруті обчислень. Якщо кілька модулів на маршруті мають спільний параметр, то його класифікаційна ознака буде визначатися типом його першого входження. Наприклад, для маршруту  $R_1: M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4$  об'єкт  $O_1$  зустрічається в двох модулях:  $M_2$  та  $M_3$ , в модулі  $M_2$  цей об'єкт обчислюється і не вимагає попередньої ініціалізації, а в модулі  $M_3$  об'єкт ініціюється і повинен прийняти значення заздалегідь. У зв'язку з тим, що модуль  $M_2$  в цьому маршруті зустрічається раніше, то  $O_1$  не потрібно заздалегідь ініціювати. Таким чином, на цьому маршруті об'єкт  $O_1$  необхідно віднести до обчислюваних. Якщо об'єкт зустрічається вперше і одразу ініціюється, то його слід віднести до зовнішніх даних.

Використаємо алгоритми пошуків маршрутів на орієнтованих графах і запропонуємо метод класифікації типів даних, заснований на реалізації часткового перебору маршрутів графу зв'язків. Під час визначення маршрутів з кореневої вершини в кінцеві використаємо властивості алгебри тризначної логіки. Маршрути орієнтованого графа будемо описувати списками вершин. З точки зору класифікації даних агрегату схеми маршрутів визначимо диз'юнкції алгебри тризначної логіки.

Пропонується такий алгоритм вирішення задачі часткового перебору маршрутів графу.

Крок 1. Вершини графа кодуються символами впорядкованої множини будь-яким способом, але так, щоб коренева вершина мала найменше значення, а кінцеві – найбільше.

Крок 2. Для поточного стану маршруту  $R_i$  шукається шлях переходу з останньої вершини в будь-яку вільну вершину.

Крок 3. Якщо перехід можливий, то до маршруту додається один символ. Якщо перехід неможливий, то розглядається наступна вершина списку вільних вершин і так до тих пір, поки не скінчиться список вершин.

Крок 4. Якщо перехід з поточної вершини в будь-яку з вільних вершин неможливий, то відбувається повернення за схемою маршруту на один символ назад.

Крок 5. При досягненні кінцевої вершини алгоритм повертається на один символ назад.

Крок 6. Алгоритм завершує свою роботу, якщо список вільних вершин кореневої вершини вичерпаний.

Ефективність алгоритму залежить від зв'язності графа. Для повнозв'язаного графа реалізується повний перегляд усіх схем маршрутів. В інших випадках число перевірок реалізованості маршрутів на графі дорівнює сумі потужностей множин досяжності і недосяжності.

Залежність розкиду усередненої складності запропонованого алгоритму в залежності від ступеня

графа отримана експериментально, в результаті моделювання графів різної структури. З ростом кількості вершин графу складність алгоритму збільшується також для лінійних графів, і раціональним порядком графа можна вважати 7–8.

Застосування досліджуваного алгоритму та моделей може бути ефективним при синтезі спеціалізованого програмного забезпечення транспортно-призначення. Серед класу зазначеного ПЗ є такі компоненти, які використовуються у підсистемах транспорту для управління складними технологічними процесами критичними до безпеки їх функціонування. Однак, для зазначеного застосування моделі слід дослідити особливості функціонування та експлуатації відповідного обладнання та визначити ймовірність впливу помилок програмного забезпечення на роботу такого спеціалізованого обладнання.

Майбутнім удосконаленням моделі є включення до її складу компонентів, які б оптимізували не тільки відповідні множини досяжності і недосяжності, але й більш високі властивості алгоритму спеціального призначення. Це дало б змогу більш ефективніше реалізовувати тестування алгоритмів та програм спеціалізованих комп'ютерних систем, зокрема транспортно-призначення. Але таке удосконалення потребує суттєвих витрат часу й буде проводитись в подальшому.

**Висновки.** В роботі проведено дослідження технологій автоматизованого синтезу програм, був проведений аналіз характеристик якості програмного забезпечення інформаційних систем.

На підставі проведеного дослідження розроблено алгоритм рішення задачі оптимізації графу програми, вдосконалено метод класифікації типів даних, заснований на реалізації часткового перебору маршрутів графу. Отримані результати роботи випробувані на реальному прикладі – при моделювання графів програм різної структури.

Розроблений узагальнений алгоритм в результаті невеликих змін може бути використаний для часткового перебору маршрутів графів програм при проектуванні різних видів ПЗ, і розроблюване програмне забезпечення може бути вдосконалено за рахунок збільшення його функціональності та скорочення витрат на розробку.

Дослідження відкриває перспективи подальших розробок та удосконалень спеціалізованого програмного забезпечення комп'ютерних систем транспортно-призначення критичних до безпеки.

#### Список літератури

1. Патрикеев Ю. *Объектно-ориентированное проектирование*. URL: <http://www.object.newmail.ru/oop1.html> (дата звернення: 05.06.2020).
2. Буч Г. *Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений*. URL: <https://www.twirpx.com/file/279137> (дата звернення: 05.06.2020).
3. *Проектирование программного обеспечения*. URL: <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/965/28965> (дата звернення: 27.06.2020).

4. Маклафлин Б., Поллайс Г., Уэст Д. *Объектно-ориентированный анализ и проектирование*. URL: <https://library.bntu.by/maklaflin-brett-obektno-orientirovanny-analiz-i-proektirovanie> (дата звернення: 27.06.2020).
5. McMenamin S., Palmer J. *Essential Systems Analysis*. New York, 1984. New York: Yourdon Press. 267 p.
6. Ward P., Mellor S. *Structured Development for Real-time Systems. Vol.1*. New York: Pearson Technology Group, 2008. 176 p.
7. *Объектно-ориентированный анализ и проектирование*. URL: <http://www.hardline.ru/1/5/1390/1789-6.htm> (дата звернення: 27.06.2020).
8. Новиков Ф.А. *Системы представления знаний*. URL: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/372/60372> (дата звернення: 27.06.2020).
9. Вельбицкий И.В. *Технология программирования*. URL: <https://www.twirpx.com/file/170607> (дата звернення: 27.06.2020).
10. Listrovoy S. V., Butenko V. M., Bryksin V. O., Golovko O. V. Development of method of definition maximum clique in a non-oriented graph. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 5, № 4 (89). P. 12–17. EID: 2-s2.0-85032585697 DOI: 10.15587/1729-4061.2017.111056).
11. Лістровий С. В., Панченко С. В., Мойсєнко В. І., Бутенко В. М. *Математичне моделювання в розподілених інформаційно-керуючих системах залізничного транспорту*. Харків: ФОП Бровін О. В., 2017. 220 с.
12. Павленко Е. П., Бутенко В. М., Губин В. А. Исследование методов разработки программного обеспечения компьютерной инженерии на основе типовых программных элементов. *Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»*: сб. науч. тр. Темат. вып.: Системный анализ, управление и информационные технологии. Харьков: НТУ «ХПИ». 2019. № 1. С. 67–71.

#### References (transliterated)

1. Patrikeev Y. *Ob'yektno-oriyentirovannoye proyektirovaniye* [Object Oriented Design] Available at: <http://www.object.newmail.ru/oop1.html> (accessed 05.06.2020).
2. Booch G. *Ob'yektno-oriyentirovanny analiz i proyektirovaniye s primerami prilozheniy* [Object-oriented analysis and design with examples of applications] Available at: <https://www.twirpx.com/file/279137> (accessed 05.06.2020).
3. *Proyektirovaniye programmnogo obespecheniya* [Software design] Available at: <http://window.edu.ru/library/pdf2txt/965/28965> (accessed 27.06.2020).
4. McLaughlin B., Pollays G., West D. *Ob'yektno-oriyentirovanny analiz i proyektirovaniye* [Object Oriented Analysis and Design] Available at: <https://library.bntu.by/maklaflin-brett-obektno-orientirovanny-analiz-i-proektirovanie> (accessed 27.06.2020).
5. McMenamin S., Palmer J. *Essential Systems Analysis*. New York, 1984. NY, Yourdon Press Publ. 267 p.
6. Ward P., Mellor S. *Structured Development for Real-time Systems. Vol.1*. New York: Pearson Technology Group Publ., 2008. 176 p.
7. *Ob'yektno-oriyentirovanny analiz i proyektirovaniye* [Object-oriented analysis and design] Available at: <http://www.hardline.ru/1/5/1390/1789-6.htm> (accessed 27.06.2020).
8. Novykov F. *Sistemy predstavleniya znaniy* [Knowledge Presentation Systems] Available at: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/372/60372> (accessed 27.06.2020).
9. Wielbitsky Y. *Tekhnologiya programmirovaniya* [Programming technology] Available at: <https://www.twirpx.com/file/170607> (accessed 27.06.2020).
10. Listrovoy S. V., Butenko V. M., Bryksin V. O., Golovko O. V. Development of method of definition maximum clique in a non-oriented graph. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 5, no. 4 (89), p. 12–17. EID: 2-s2.0-85032585697 DOI: 10.15587/1729-4061.2017.111056).
11. Listrovoy S. V., Panchenko S. V., Moiseenko V. I., Butenko V. M. *Matematychnye modelyuvannya v rozpodilenykh informatsiynokeryuyuchykh systemakh zaliznychnoho transportu* [Mathematical modeling in distributed information-control systems of railway transport]. Kharkiv, 2017. 220 p.
12. Pavlenko Y. P., Butenko V. M., Gubin V. O. *Issledovaniye metodov razrabotki programmnogo obespecheniya komp'yuternoy inzhenerii*

na osnove tipovykh programnykh elementov [Research of methods for developing computer engineering software based on standard software elements] *Vestnik Nats. tekhn. un-ta «KHPi»: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemnyy analiz, upravleniye i informatsionnyye tekhnologii* [Bulletin of NTU "KhPI". Series: Systems Analysis,

Management and Information Technology]. Kharkov, 2019, no. 1, pp. 67–71.

Надійшла (received) 08.02.2021

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

**Павленко Євген Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7626-9933>; e-mail: [evgenijpavlenko821@gmail.com](mailto:evgenijpavlenko821@gmail.com)

**Бутенко Володимир Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, доцент кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9958-3960>; e-mail: [butenko@kart.edu.ua](mailto:butenko@kart.edu.ua)

**Губін Вадим Олександрович** – Національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри штучного інтелекту; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1850-1930>; e-mail: [vadim.gubin@nure.ua](mailto:vadim.gubin@nure.ua)

**Лубенець Сергій Васильович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, доцент кафедри міжнародних відносин, міжнародної інформації та безпеки; м. Харків, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1061-8763>; e-mail: [S.Lubenec@karazin.ua](mailto:S.Lubenec@karazin.ua)

**Павленко Евгений Петрович** – кандидат технических наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, доцент кафедры специализированных компьютерных систем; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7626-9933>; e-mail: [evgenijpavlenko821@gmail.com](mailto:evgenijpavlenko821@gmail.com)

**Бутенко Владимир Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта, доцент кафедры специализированных компьютерных систем; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9958-3960>; e-mail: [butenko@kart.edu.ua](mailto:butenko@kart.edu.ua)

**Губин Вадим Александрович** – Национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры искусственного интеллекта; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1850-1930>; e-mail: [vadim.gubin@nure.ua](mailto:vadim.gubin@nure.ua)

**Лубенец Сергей Васильевич** – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, доцент кафедры международных отношений, международной информации и безопасности; г. Харьков, Украина; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1061-8763>; e-mail: [S.Lubenec@karazin.ua](mailto:S.Lubenec@karazin.ua)

**Pavlenko Yevhen Petrovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Ukrainian State University of Railway Transport, Associate Professor at the Department of the Specialized Computer Systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7626-9933>; e-mail: [evgenijpavlenko821@gmail.com](mailto:evgenijpavlenko821@gmail.com)

**Butenko Vladimir Mihajlovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Ukrainian State University of Railway Transport, Associate Professor at the Department of the Specialized Computer Systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9958-3960>; e-mail: [butenko@kart.edu.ua](mailto:butenko@kart.edu.ua)

**Gubin Vadim Oleksandrovykh** – National University of Radio Electronics, senior lecturer at the Department of Artificial Intelligence; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1850-1930>; e-mail: [vadim.gubin@nure.ua](mailto:vadim.gubin@nure.ua)

**Lubenets Serhii Vasylovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, V. N. Karazin Kharkiv National University, Associate Professor of International Relations, International Information and Security; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1061-8763>; e-mail: [S.Lubenec@karazin.ua](mailto:S.Lubenec@karazin.ua)

**С. В. ПЕТРАСОВА, Н. Ф. ХАЙРОВА, А. С. КОЛЕСНИК**

## ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПОРЯДКУ ДЕННОГО В ПОТОКАХ НОВИНИХ ДАНИХ

З кожним днем обсяг потоків новинних даних зростає, що збільшує інтерес до систем, які дозволяють автоматизувати обробку великих потоків даних. Визначення смислової подібності текстової інформації на основі використання інтелектуальних засобів обробки даних дозволить виділяти спільні інформаційні простори новин. У статті проаналізовані сучасні статистичні метрики для визначення зв'язних фрагментів, зокрема, новинних текстів, що відображають порядок денний (agenda), вказані основні переваги та недоліки. Пропонується інформаційна технологія виявлення спільного інформаційного простору актуальних новин в потоці даних за певний період часу. Технологія включає логіко-лінгвістичну і дистрибутивно-статистичну модель ідентифікації колокацій. Модель дистрибутивної семантики МІ застосовується на етапі вилучення потенційних колокацій. При цьому регулярні вирази, розроблені відповідно до граматики англійської мови, дозволяють виявляти граматично правильні конструкції. Перевагою розробленої логіко-лінгвістичної моделі формалізації семантико-граматичних характеристик колокацій на основі використання алгебро-предикатних операцій і предиката семантичної еквівалентності, є врахування аналізу як граматичної структури мови, так і смислу слів (колокатів). Тезаурус WordNet застосовується на етапі визначення відношення синонімії між головними і залежними компонентами колокацій. На основі досліджуваного корпусу новинних текстів служб CNN і BBC проведена оцінка ефективності розробленої технології. Аналіз показав, що коефіцієнт точності precision дорівнює 0,96. Застосування запропонованої технології дозволить поліпшити якість обробки потоків новинних повідомлень. Вирішення завдання автоматичного визначення смислової близькості може застосовуватися при виявленні текстів однієї тематики, актуальної інформації, добуванні фактів і усунення смислової неоднозначності та ін.

**Ключові слова:** потік даних, порядок денний, логіко-лінгвістична модель, дистрибутивно-статистична модель, колокація, смислова близькість, WordNet, корпус новинних текстів, precision.

**С. В. ПЕТРАСОВА, Н. Ф. ХАЙРОВА, А. С. КОЛЕСНИК**

## ТЕХНОЛОГИЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОВЕСТКИ ДНЯ В ПОТОКАХ НОВОСТНЫХ ДАННЫХ

В настоящее время объем потоков новостных данных возрастает, что увеличивает интерес к системам, которые позволяют автоматизировать обработку больших потоков данных. Определение смысловой близости текстовой информации на основе использования интеллектуальных средств обработки данных позволит выделять общие информационные пространства новостей. В статье проанализированы современные статистические метрики для определения связанных фрагментов, в частности, новостных текстов, отображающих повестку дня (agenda), указаны основные преимущества и недостатки. Предлагается информационная технология выявления общего информационного пространства актуальных новостей в потоке данных за определенный период времени. Технология включает логико-лингвистическую и дистрибутивно-статистическую модели идентификации коллокаций. Модель дистрибутивной семантики МІ применяется на этапе извлечения потенциальных коллокаций. При этом регулярные выражения, разработанные в соответствии с грамматикой английского языка, позволяют выявлять грамматически правильные конструкции. Преимуществом разработанной логико-лингвистической модели формализации семантико-грамматических характеристик коллокаций на основе использовании алгебро-предикатных операций и предиката семантической эквивалентности, является возможность анализировать как грамматическую структуру языка, так и смысл слов (коллокатов). Тезаурус WordNet применяется на этапе определения отношения синонимии между главными и зависимыми компонентами коллокаций. На основе исследуемого корпуса новостных текстов служб CNN и BBC проведена оценка эффективности разработанной технологии. Анализ показал, что коэффициент точности precision равен 0,96. Применение предлагаемой технологии позволит улучшить качество обработки потоков новостных сообщений. Решение задачи автоматического определения смысловой близости может применяться при выявлении текстов одной тематики, актуальной информации, извлечении фактов и устранении смысловой неоднозначности и др.

**Ключевые слова:** поток данных, повестка дня, логико-лингвистическая модель, дистрибутивно-статистическая модель, коллокация, смысловая близость, WordNet, корпус новостных текстов, precision.

**S. V. PETRASOVA, N. F. KHAIROVA, A. S. KOLESNYK**

## TECHNOLOGY FOR IDENTIFICATION OF INFORMATION AGENDA IN NEWS DATA STREAMS

Currently, the volume of news data streams is growing that contributes to increasing interest in systems that allow automating the big data streams processing. Based on intelligent data processing tools, the semantic similarity identification of text information will make it possible to select common information spaces of news. The article analyzes up-to-date statistical metrics for identifying coherent fragments, in particular, from news texts displaying the agenda, identifies the main advantages and disadvantages as well. The information technology is proposed for identifying the common information space of relevant news in the data stream for a certain period of time. The technology includes the logical-linguistic and distributive-statistical models for identifying collocations. The MI distributional semantic model is applied at the stage of potential collocation extraction. At the same time, regular expressions developed in accordance with the grammar of the English language make it possible to identify grammatically correct constructions. The advantage of the developed logical-linguistic model formalizing the semantic-grammatical characteristics of collocations, based on the use of algebraic-predicate operations and a semantic equivalence predicate, is that both the grammatical structure of the language and the meaning of words (collocates) are analyzed. The WordNet thesaurus is used to determine the synonymy relationship between the main and dependent collocation components. Based on the investigated corpus of news texts from the CNN and BBC services, the effectiveness of the developed technology is assessed. The analysis shows that the precision coefficient is 0.96. The use of the proposed technology could improve the quality of news streams processing. The solution to the problem of automatic identification of semantic similarity can be used to identify texts of the same domain, relevant information, extract facts and eliminate semantic ambiguity, etc.

**Keywords:** data stream, agenda, logical-linguistic model, distribution-statistical model, collocation, semantic similarity, WordNet, news text corpus, precision.

**Вступ.** Дослідження інформаційного порядку популярним завданням, в тому числі, через денного (information agenda) є актуальним і досить поширеність та широкий доступ до контенту ЗМІ.

Сучасне суспільство використовує ЗМІ, щоб формувати і описувати поточні проблеми та події, що відбуваються в усьому світі. У зв'язку з цим автоматична обробка та аналіз контенту ЗМІ (зокрема, потоків новинних повідомлень) є однією з можливостей для вивчення взаємодії громадського, політичного та медійного порядків денних, дозволяючи виявити, які теми популярні в суспільстві та ЗМІ. Таким чином, під порядком денним маємо на увазі «сукупність актуальних проблем і сюжетів, що мають ряд самостійних характеристик» [1, 2].

Існуючі сьогодні підходи до класифікації новин і розроблені додатки групують новини за досить великими тематичними групами. Найчастіше це пов'язано із застосуванням методів машинного навчання, які добре працюють на великих обсягах текстів з простором ознак класифікації, що добре поділяється. Однак, дуже часто необхідно виділити відносно вузьку сукупність новин, які мають ряд самостійних та пов'язаних характеристик.

Ми пропонуємо інформаційну технологію визначення смислової подібності новинного контенту медійних платформ BBC і CNN для виявлення актуального порядку денного за певний період часу. Технологія включає в себе розроблену модель семантичної подібності для ідентифікації синонімічних колокацій у новинному потоці даних, регулярні вирази з граматичними правилами та модель дистрибутивної семантики МІ для виявлення колокацій як найбільш змістовних фрагментів новинних текстів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Колокація, як не випадкове синтаксичне та семантичне сполучення двох або більше лексем, що складається з головного та залежного компонентів, містить у собі більш конкретну семантичну інформацію, ніж окремі слова. Тому автоматичне визначення близьких за змістом колокацій в новинному потоці даних дозволить виявляти спільний новинний контент, що відображає актуальний порядок денний.

Для визначення сили смислового зв'язку між членами заданої лексичної підсистеми, тобто колокації, пропонується застосувати дистрибутивно-статистичну методику, суть якої полягає в статистичному аналізі спільної зустрічальності лексем у великих потоках даних. Алгоритми аналізу [3, 4] використовують засоби математичної статистики і алгебри, лінгвістична інформація присутня тільки в морфологічній розмітці колокацій.

Статистичні метрики або міри асоціації ґрунтуються на частотах колокацій і окремих колокатів (слів), що входять до них, для обчислення стійкості, притаманної лексичним одиницям. Всього існує більше 80 мір, що дозволяють оцінити силу зв'язності [5–7]. Частіше за інших використовуються такі міри, як МІ, РМІ, t-score, log-likelihood, коефіцієнт ймовірності, критерій узгодженості Пірсона та інші.

Однак, статистичні методи витягають додаткові шумні дані та ігнорують синтаксичні зв'язки між словами на довгих відстанях. Водночас визначення колокацій вимагає на додаток до моделей статистичного аналізу використання морфологічних та

синтаксичних засобів. У цьому випадку ідентифікація семантично близьких колокацій дозволяє не тільки враховувати ймовірність спільної появи компонентів колокацій, а й формалізувати граматичні залежності між головним та залежним компонентами [8].

Отже, аналіз статистичних методів і моделей дистрибутивної семантики при вирішенні завдання виявлення смислових зв'язків між словами показав, що найбільш продуктивною є комбінація статистичної міри (зокрема, коефіцієнта взаємної інформації МІ, який порівнює залежні контекстно-зв'язані частоти з незалежними) та розробленої моделі семантичної подібності, що базується на алгебрі скінченних предикатів [9], які описують відношення між компонентами колокації.

**Метою дослідження** є визначення спільного інформаційного простору (порядку денного), що представляє актуальні питання в новинних потоках даних, шляхом моделювання функцій інтелекту з розуміння смислу.

**Матеріали і результати дослідження.** Для визначення близького за змістом новинного контенту розроблено корпус новинних текстів, що постійно поповнюється. Корпус включає статті новинних сайтів BBC [10] і CNN [11], автоматично витягнуті за допомогою інструменту Scrapy.

На першому етапі розробленої інформаційної технології (рис. 1) проводиться пошук потенційних кандидатів – головних та залежних компонентів колокацій – на основі визначення статистичної значимості колокацій за допомогою моделі дистрибутивної семантики МІ, що дозволяє виділяти рідкісні колокації і підходить для виділення термінології, власних імен та інших конструкцій, в яких показники частоти слів колокації зовсім малі.

Для встановлення лінгвістичної правильності виявлених кандидатів, а саме їх лексичної залежності, використовується морфологічна розмітка (POS-tagging) та розроблені регулярні вирази, що описують 3 типи колокацій: дієслівні, субстантивні та атрибутивні. Відповідно до корпусно-орієнтованого підходу ці колокації являють собою значимі фрагменти тексту, що найбільш часто зустрічаються в корпусах [12].

Таким чином, використовуючи Python NLTK, визначаємо дієслова ( $x^i$ ): 'MD', 'VB', 'VBD', 'VBG', 'VBP', 'VBZ', 'VBN', іменники ( $y^i$ ): 'NN', 'NNS', 'NNP', 'NNPS' і прикметники ( $z^i$ ): 'JJ', 'JJR', 'JJS' та здобуваємо послідовності слів, які утворюють синтаксичні конструкції (біграми):  $xu$ ,  $uy$  та  $zy|ux$ .

Другий етап інформаційної технології полягає у виділенні близьких за змістом колокацій. Для цього пропонується розроблена логічна модель семантичної подібності, заснована на використанні алгебро-предикатних операцій і предиката семантичної еквівалентності  $\gamma_i$ .

Предикат  $\gamma_1$  показує семантичну близькість дієслівних колокацій,  $\gamma_2$  – субстантивних колокацій,  $\gamma_3$  – атрибутивних колокацій:

$$\gamma_1(coll_1, coll_2) = x_1^{[1-6]} y_1^{[1-4]} x_2^{[1-6]} y_2^{[1-4]} \quad (1)$$

$$\gamma_2(coll_1, coll_2) = y_1^{[1-4]} y_1^{[1-4]} y_2^{[1-4]} y_2^{[1-4]} \quad (2)$$

$$\gamma_3(coll_1, coll_2) = z_1^{[1-3]} y_1^{[1-4]} z_2^{[1-3]} y_2^{[1-4]} \vee z_1^{[1-3]} y_1^{[1-4]} y_2^{[1-4]} x_2^7 \vee y_1^{[1-4]} x_1^7 y_2^{[1-4]} x_2^7 \quad (3)$$

Отже, предикат  $\gamma_i$  описує семантико-синтаксичні зв'язки між колокаціями, тоді як тезаурус WordNet 3.1.0 надає інформацію про синонімічність колокатів.

Наприклад, наступні фрагменти новинних повідомлень BBC і CNN були визначені як семантично

близькі, оскільки містять близькі за смыслом колокації, що формують спільний порядок денний:

...A flooding emergency( $y_1^1 y_1^1$ ) in the Washington DC area left commuters in hazardous conditions. Torrential downpours led to road closures and left drivers stranded ( $y_1^2 x_1^7$ ) as well as dangerous flooding on the underground rail-lines.

...A flash flood emergency( $y_2^1 y_2^1$ ) in Washington left roads submerged and cars stranded ( $y_2^2 x_2^7$ ) as heavy rains poured over the region.

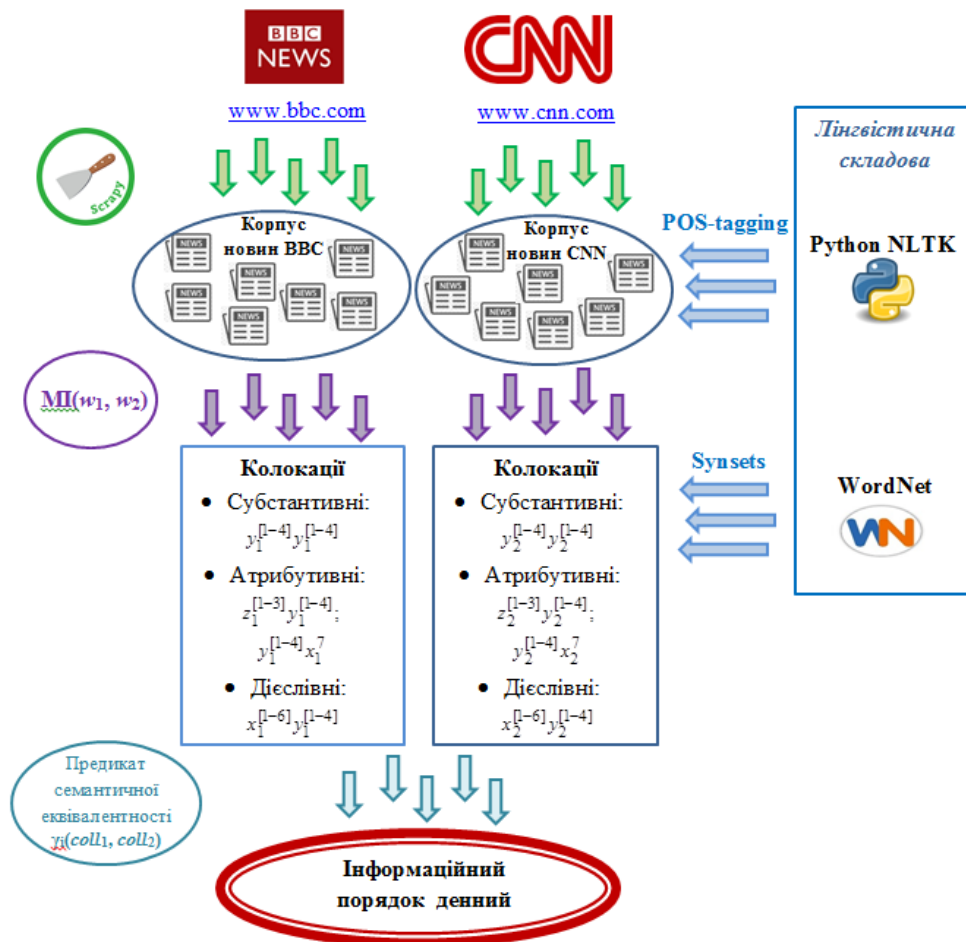


Рис. 1. Етапи інформаційної технології визначення інформаційного порядку денного в потоках новинних даних

Таким чином, текстові фрагменти вважаються семантично подібними, якщо граматичні характеристики синонімічних колокацій задовольняють предикату семантичної еквівалентності.

Вилучені з новин колокації дозволяють не тільки виявити відсутні в лінгвістичних джерелах поєднання слів, а й обчислити статистичні показники їх стійкості. У такий спосіб підставами визначення певного виразу (колокації) визнаються граматична й статистична моделі, представлені певним контекстом.

Розроблена технологія реалізована у вигляді програмного застосунка (рис. 2) з виявлення колокацій з великих потоків даних. Програмна імплементація дозволяє завантажувати новинні повідомлення, вилучати семантично близькі колокації та відображати

їх у порядку спадання значення коефіцієнта MI.

Результатом роботи програмного додатка є виявлені у корпусі новинних текстів близькі за смыслом колокації, що дозволяють визначити спільний інформаційний простір актуальних новин.

Для оцінки ефективності розробленої технології та порівняльного аналізу з існуючими технологіями вилучення колокацій з великих потоків даних проведено розрахунок показника точності (precision). Аналіз показав, що середній коефіцієнт точності, визначений відношенням числа релевантних колокацій та неправильно прийнятих системою рішень (не релевантних колокацій) до загального числа колокацій, виданих системою, дорівнює 0,96.

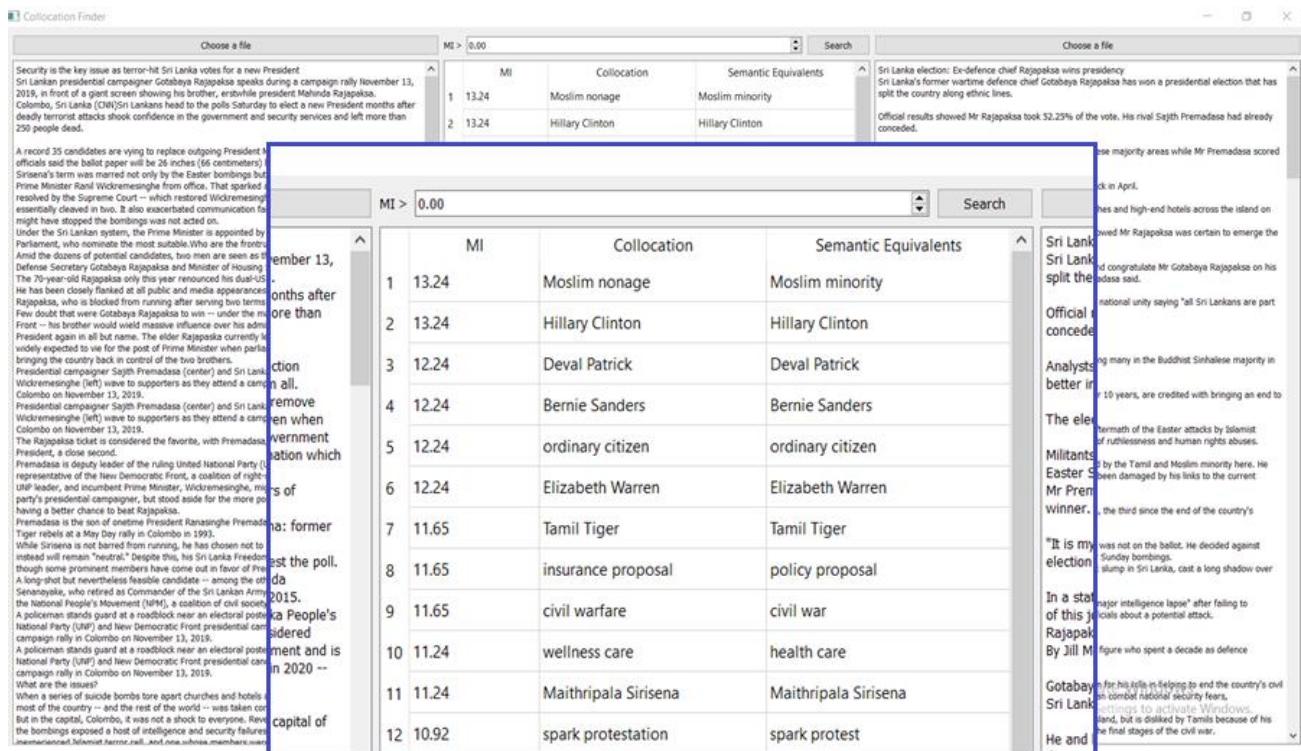


Рис. 2. Програмна реалізація виявлення колокацій з великих потоків даних

Для порівняння отриманих результатів з іншим існуючим програмним забезпеченням, що займається аналогічним завданням, було обрано web-додаток Sketch Engine [13]. Цей додаток включає в себе функцію визначення вордскетчів (word sketches), тобто типових фраз, що визначаються, з одного боку, синтаксисом, який обмежує сполучуваність слів в певній мові, та з іншого – ймовірністю, пов'язаною з частотою використання слів.

До обраного застосунка було завантажено дослідницький корпус новинних повідомлень для автоматичного вилучення колокацій. Результати порівняльного аналізу оцінки ефективності застосунків представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз показників Precision

|                                   | Всього вилучено колокацій | Оціночна вибірка | Precision |
|-----------------------------------|---------------------------|------------------|-----------|
| Sketch Engine                     | 1911                      | 1000             | 0.57      |
| Розроблене програмне забезпечення | 3227                      |                  | 0.96      |

**Висновки.** На основі розробленої логіко-лінгвістичної моделі та моделі дистрибутивної семантики запропоновано інформаційну технологію визначення смислової подібності новинного контенту з використанням алгебро-предикатних операцій для формалізації семантико-граматичних характеристик колокацій. Встановлюючи неявні смислові зв'язки між фрагмен-

тами новинного тексту, технологія дозволяє ідентифікувати спільні інформаційні простори актуальних новин – інформаційний порядок денний.

В результаті проведеного порівняльного аналізу виявлено, що показник precision розробленої технології значно перевищує аналогічний показник ефективності існуючого web-додатка Sketch Engine.

Розроблена програмна імплементація дозволить поліпшити якість обробки потоків новинних повідомлень, а також може бути запропонована як покращена модель існуючих систем семантичної обробки текстів, наприклад, використовуватись для виявлення текстів однієї тематики, актуальної інформації, добування фактів та усунення смислової неоднозначності та ін.

#### Список літератури

1. Каминченко Д.И. Информационная повестка дня современных сетевых СМИ: политический аспект. *Via in tempore. История. Политология*. 2019. Т. 46, № 3. С. 576–584.
2. Adams A., Harf A., Ford R. Agenda Setting Theory: A Critique of Maxwell McCombs & Donald Shaw's Theory In Em Griffin's A First Look at Communication Theory. *Meta-communicate*. 2014. Vol. 4, no. 1. URI: <https://journals.chapman.edu/ojs/index.php/mc/article/view/902> (дата звернення: 23.04.2021).
3. Lenci A. Distributional Models of Word Meaning. *Annual Review of Linguistics*. 2018. Vol. 4. P. 151–171. URI: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-linguistics-030514-125254> (дата звернення: 23.04.2021).
4. Dinu A., Dinu L., Sorodoc I. Aggregation methods for efficient collocation detection. *Proceedings of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation*. 2014. P. 4041–4045. URI: [http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2014/pdf/1184\\_Paper.pdf](http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2014/pdf/1184_Paper.pdf) (дата звернення: 23.04.2021).
5. Хохлова М. В. Сопоставительный анализ статистических мер на примере частеречных предпочтений сочетаемости существительных. *Компьютерная лингвистика и вычислительные онтологии*. 2017. Вып. 1. С. 166–171.

6. Liu X., Huang D., Yin Zh., Ren F. Recognition of Collocation Frames from Sentences. *IEICE Trans. Inf. Syst.* 2019. 102-D. P. 620–627. URI: <https://doi.org/10.1587/TRANSINF.2018EDP7255> (дата звернення: 23.04.2021)
7. Хохлова М. В. К вопросу о сходстве мер ассоциации применительно к задаче автоматического извлечения глагольных коллокаций. *Компьютерная лингвистика и вычислительные онтологии*. 2019. Вып. 3. С. 9–18.
8. Petrasova S., Khairova N., Lewoniewski W., Mamyrbayev O., Mukhsina K. Similar Text Fragments Extraction for Identifying Common Wikipedia Communities. *Data. Stream Mining and Processing*. 2018, vol. 3, issue 4, article 66. URI: <https://doi.org/10.3390/data3040066> (дата звернення: 23.04.2021).
9. Бондаренко М.Ф., Шабанов-Кушнаренко Ю.П. *Теория интеллекта*. Харьков: СМІТ, 2007. 576 с.
10. BBC. URI: <https://www.bbc.com/news> (дата звернення: 23.04.2021).
11. CNN. URI: <https://edition.cnn.com> (дата звернення: 23.04.2021)
12. Бобкова Т. В. Основні підходи до ідентифікації й вилучення колокацій із текстів. *Наукові праці. Філологія. Мовознавство*. 2015. № 241 (253). С. 10–16. URI: <http://linguistics.chdu.edu.ua/article/viewFile/87653/83242/> (дата звернення: 23.04.2021).
13. *Sketch Engine*. URI: <https://www.sketchengine.eu> (дата звернення: 23.04.2021).
4. Dinu A., Dinu L., Sorodoc I. Aggregation methods for efficient collocation detection. *Proceedings of the Ninth International Conference on Language Resources and Evaluation*. 2014, pp. 4041–4045. URI: [http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2014/pdf/1184\\_Paper.pdf](http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2014/pdf/1184_Paper.pdf) (accessed 23.04.2021).
5. Hohlova M.V. Sopostavitel'nyy analiz statisticheskikh mer na primere chastotnykh preferency sochetayemosti sushchestvitel'nykh [Comparative Analysis of Statistical Measures on the Example of Part-of-Speech Preferences for Combining Nouns]. *Komp'yuternaya lingvistika i vychislitel'nye ontologii* [Computational linguistics and computational ontologies]. 2017, issue 1, pp. 166–171.
6. Liu X., Huang D., Yin Zh., Ren F. Recognition of Collocation Frames from Sentences. *IEICE Trans. Inf. Syst.* 2019, 102-D, pp. 620–627. URI: <https://doi.org/10.1587/TRANSINF.2018EDP7255>
7. Hohlova M.V. K voprosu o shodstve mer associacii primenitel'no k zadache avtomaticheskogo izvlecheniya glagol'nykh kollokatsiy [To the Question of The Similarity of Association Measures Applied to the Problem of Automatic Extraction of Verb Collocations]. *Komp'yuternaya lingvistika i vychislitel'nye ontologii* [Computational linguistics and computational ontologies]. 2019, issue 3, pp. 9–18.
8. Petrasova S., Khairova N., Lewoniewski W., Mamyrbayev O., Mukhsina K. Similar Text Fragments Extraction for Identifying Common Wikipedia Communities. *Data. Stream Mining and Processing*. 2018, vol. 3, issue 4, article 66. URI: <https://doi.org/10.3390/data3040066> (accessed 23.04.2021).
9. Bondarenko M., Shabanov-Kushnarenko Yu. *Teoriya intellekta* [The Theory of Intelligence]. Kharkiv, SMIT Publ., 2007. 576 p.
10. BBC. URI: <https://www.bbc.com/news> (accessed 23.04.2021).
11. CNN. URI: <https://edition.cnn.com> (accessed 23.04.2021).
12. Bobkova T. V. Osnovni pidhody do identifikatsii i vyluchennia kolokatsiy iz tekstiv [Basic approaches to identification and extraction of collocations from texts]. *Naukovi pratsi. Filologiya. Movoznavstvo* [Scientific works. Philology. Linguistics]. 2015, no. 241 (253), pp. 10–16. URI: <http://linguistics.chdu.edu.ua/article/viewFile/87653/83242/> (accessed 23.04.2021).
13. *Sketch Engine*. URI: <https://www.sketchengine.eu> (accessed 23.04.2021).

## References (transliterated)

1. Kaminchenko D.I. Informacionnaya povestka dnja sovremennyh setevykh SMI: politicheskij aspekt [Information Agenda of Modern Online Media: Political Aspect]. *Via in tempore. Istorija. Politologija* [Via in tempore. History. Political science]. 2019, vol. 46, no. 3, pp. 576–584
2. Adams A., Harf A., Ford R. Agenda Setting Theory: A Critique of Maxwell McCombs & Donald Shaw's Theory In Em Griffin's A First Look at Communication Theory. *Meta-communicate*. 2014, vol. 4, no. 1. URI: <https://journals.chapman.edu/ojs/index.php/mc/article/view/902> (accessed 23.04.2021).
3. Lenci A. Distributional Models of Word Meaning. *Annual Review of Linguistics*. 2018, vol. 4, pp. 151–171. URI: <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-linguistics-030514-125254>

Надійшла (received) 05.05.2021

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

**Петрасова Світлана Валентинівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6011-135X>; e-mail: [svetapetrasova@gmail.com](mailto:svetapetrasova@gmail.com).

**Хайрова Ніна Феліксівна** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9826-0286>; e-mail: [nina\\_khajrova@yahoo.com](mailto:nina_khajrova@yahoo.com).

**Колесник Анастасія Сергіївна** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірантка кафедри інтелектуальних комп'ютерних систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5817-0844>; e-mail: [kolesniknastya20@gmail.com](mailto:kolesniknastya20@gmail.com).

**Петрасова Светлана Валентиновна** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры интеллектуальных компьютерных систем; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6011-135X>; e-mail: [svetapetrasova@gmail.com](mailto:svetapetrasova@gmail.com).

**Хайрова Нина Феликсовна** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры интеллектуальных компьютерных систем; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9826-0286>; e-mail: [nina\\_khajrova@yahoo.com](mailto:nina_khajrova@yahoo.com).

**Колесник Анастасия Сергеевна** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры интеллектуальных компьютерных систем; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5817-0844>; e-mail: [kolesniknastya20@gmail.com](mailto:kolesniknastya20@gmail.com).

**Petrasova Svitlana Valentynivna** – candidate of technical sciences, docent, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», associate professor of the Department of Intelligent Computer Systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6011-135X>; e-mail: [svetapetrasova@gmail.com](mailto:svetapetrasova@gmail.com).

**Khairova Nina Feliksivna** – doctor of technical sciences, professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», professor of the Department of Intelligent Computer Systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9826-0286>; e-mail: [nina\\_khajrova@yahoo.com](mailto:nina_khajrova@yahoo.com).

**Kolesnyk Anastasiia Sergiivna** – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», PhD student of the Department of Intelligent Computer Systems; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5817-0844>; e-mail: [kolesniknastya20@gmail.com](mailto:kolesniknastya20@gmail.com).

*Р. О. ГАМЗАЄВ, М. В. ТКАЧУК*

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ І ТЕХНОЛОГІЙ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНФІГУРУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ЛІНІЙОК ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ

У статті проведено аналіз існуючих підходів до вирішення задачі динамічного конфігурування у лінійках програмних продуктів (ЛПП). ЛПП це набір програмних систем, що мають спільні і варіабельні компоненти і використовують набір парадигм і методів до розробки. Завдяки використанню яких надаються можливості налаштувати програмні рішення відповідно до потреб кінцевих користувачів. Було показано, що для вирішення цієї проблеми доцільно використовувати методи і технології побудови сучасних рекомендаційних систем (РС). Проведено аналіз існуючих підходів і методів побудови РС, були розглянуті такі можливі методи як: кластеризація, марковський процес прийняття рішень, факторизація матриць. В результаті огляду інтелектуальних методів розробки РС та дослідження функціональних можливостей технологій реалізації РС у проектах з відкритим кодом, для подальшого використання саме в задачах конфігурування динамічних ЛПП запропоновано метод N-вимірної контекстно-залежної тензорної факторизації та інструментальна система CARSKit. Розроблені функціональні вимоги та запропонована архітектура прототипу РС, яка уможливила автоматизацію конфігурування програмних компонентів у системах «Розумний будинок» (РБ), і яка може бути програмно реалізована засобами системи CARSKit та алгоритмами обробки консолідованих даних на мові Python. Ця реалізація дозволяє побудувати процес відстеження змін у зовнішньому середовищі і передавати інформацію в РБ і після аналізу вхідних даних обробляти в РС для відстеження змін у контекстній інформації. Під час подальших досліджень заплановано проведення обчислювальних експериментів з урахуванням специфіки систем «Розумний будинок» і застосування кількісних метрик для оцінки ефективності алгоритмів тензорної авторизації для прогнозування динамічних змін програмних компонентів в цих системах.

**Ключові слова:** рекомендаційна система, лінійка програмних продуктів, варіабельність, динамічне конфігурування, архітектура

*Р. А. ГАМЗАЕВ, Н.В. ТКАЧУК*

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ РЕКОМЕНДАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ КОНФИГУРИРОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЛИНЕЙОК ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

В статье проведен анализ существующих подходов к решению задачи динамического конфигурирования в линейках программных продуктов (ЛПП). ЛПП представляют набор программных систем, имеющих общие и переменные компоненты и использующие набор парадигм и методов к разработке. Благодаря использованию которых предоставляются возможности настраивать программные решения в соответствии с потребностями конечных пользователей. Было показано, что для решения этой проблемы целесообразно использовать методы и технологии построения современных рекомендательных систем (РС). Проведен анализ существующих подходов и методов построения РС, были рассмотрены такие возможные методы как: кластеризация, марковский процесс принятия решений, факторизация матриц. В результате рассмотрения интеллектуальных методов разработки РС и исследования функциональных возможностей технологий реализации РС в проектах с открытым кодом, для дальнейшего использования именно в задачах конфигурирования динамических ЛПП предложен метод N-мерной контекстно-зависимой тензорной факторизации и инструментальная система с открытым исходным кодом CARSKit. Разработаны функциональные требования и предложена архитектура прототипа РС, которая делает автоматизацию конфигурирования программных компонентов в системах «Умный дом» (УД), а также может быть программно реализована средствами системы CARSKit и алгоритмами обработки консолидированных данных на языке Python. Эта реализация позволяет построить процесс отслеживания изменения во внешней среде и передавать информацию в УД и после анализа входных данных обрабатывать в РС для отслеживания изменения во контекстной информации. В качестве дальнейших исследований запланировано проведение вычислительных экспериментов с учетом специфики систем «Умный дом» и применения количественных метрик для оценки эффективности алгоритмов тензорной факторизации для прогнозирования динамических конфигураций программных компонентов в этих системах.

**Ключевые слова:** рекомендательная система, линейка программных продуктов, вариабельность, динамическое конфигурирование, архитектура

*R. O. GAMZAYEV, M.V. TKACHUK*

## USING METHODS AND TECHNOLOGIES OF RECOMMENDATION SYSTEMS FOR DYNAMIC SOFTWARE PRODUCT LINES CONFIGURATION

Software product lines (SPL) dynamic configuring process could use methods for recommendation system (RS) elaboration. An overview and analysis of such methods was done in this paper. SPL represent a set of software systems that have common and variable functional components and use a set of paradigms and methods for development. In the classical static SPL the process of configuring performed before executing and performing in the operation environment (OE), in contrast dynamic software product lines performs after executing in the OE. Through the use of which it is possible to customize software solutions in accordance with the needs of end users. The following possible methods to build RS were considered: clustering, Markov decision-making process, matrix factorization. According to the review of the intelligent RS method development and researching of the functionalities of such systems in some open-source projects it was proposed to use N-dimensional context-dependent tensor factorization method and CARSKit tool system. Functional requirements and software architecture of the RS were developed. It allows to automatize software components configuration in the „Smart Home” (SH) systems that could be implemented with CARSKit software toolkit and algorithms implemented with programming language Python. This implementation allows to build a process for tracking changes in the external environment and transfer information to the SH system and, after analyzing the input data, process it in the RS to track changes in the context information. In the future research some additional quantitative experiments will be performed considering the specifics of the SH systems, additionally quantitative metrics will be used for efficiency assessment of the tensor factorization algorithms to predict the dynamic configurations of software components in these systems.

**Keywords:** recommendation system, software product line, variability, dynamic configuration, architecture.

**Вступ.** Постійне ускладнення функціональних задач, які мають бути вирішені шляхом використання програмних систем (ПС) у різних предметних областях (ПрО) передбачає можливість побудови та подальшого

ефективного використання вже не окремих ПС, а цілих їх взаємопов'язаних сукупностей, які в сучасній програмній інженерії отримали назву лінійок програмних продуктів (software product line). Такі лінійки

програмних продуктів (ЛПП) мають спільний набір загальних функцій (компонентів), які налаштовуються відповідно до потреб користувачів у певному контексті їх функціонування і які націлені на забезпечення варіабельності (variability) ЛПП, що в свою чергу передбачає можливість конфігурування та налаштування їх певних функцій та окремих параметрів [1]. У так званих статичних ЛПП визначення властивостей варіабельності відбувається ще до процесу розміщення та виконання у відповідному операційному середовищі, тобто на етапі їх архітектурного проектування шляхом побудови відповідної моделі варіабельності, наприклад, FODA-моделей та деяких ін. [2]. Але внаслідок структурної складності та функціональної насиченості більшості ЛПП, в таких системах досить часто виникають проблеми із продуктивністю і масштабованістю, і тому в сучасній програмній інженерії активно розробляються та досліджуються динамічні ЛПП (Dynamic Software Product Lines) [2], в яких важливу роль відіграють механізми адаптації та конфігурування варіабельних функцій і властивостей безпосередньо на етапі виконання та розміщення їх окремих компонентів. Для вирішення цих актуальних науково-практичних задач необхідно застосування нових інтелектуальних методів розробки ЛПП, і зокрема, цікавим напрямком таких досліджень може бути вивчення можливостей сучасних рекомендаційних систем (recommendation systems), які використовують знання-орієнтовані методи і технології ефективної фільтрації консолідованої інформації і забезпечують вибір конфігурацій персоналізованих продуктів для різних груп їх користувачів у відповідності з динамічними змінами в навколишньому середовищі.

Слід зазначити, що дослідження у цьому напрямку проводяться вже досить активно і, зокрема, проблема адаптації ЛПП у відповідь на зміну контексту висвітлена в [3]. В ній традиційні варіабельні моделі функцій ЛПП доповнюються набором логічних правил (продукцій), які явно визначають, за якої умови має відбуватися її переконфігурація. В [4] також розглянуті декілька підходів до динамічного налаштування властивостей ЛПП, це застосування методів машинного навчання, що дозволяє виявити явно не передбачувані зміни контексту та створювати нові правила адаптації. Другий підхід, в саме: еволюція, фокусується на забезпеченні механізму постійного моніторингу змін у вже існуючих конфігураціях ЛПП, а потім – прогнозування нових, на основі обробки цих даних, при цьому в [4] зазначено, що для складних ЛПП ці два підходи доцільно використовувати комбіновано. В [5] запропонована доменна модель для аналізу альтернативних механізмів варіабельності в ЛПП для мобільних застосунків із використання мови Java і показана можливість використання деяких методів імплементації варіабельності, які є специфічними для цієї мови програмування. В той же час можна констатувати, що можливості використання саме рекомендаційних систем ще недостатньо висвітлені в існуючих публікаціях за темою конфігурування динамічних ЛПП.

Метою цієї статті є аналіз інтелектуальних методів і технологій побудови рекомендаційних систем

(РС) для вирішення задач самоконфігурування ДЛПП, дослідження можливостей застосування вже існуючих проектів реалізації РС з відкритим кодом, розробка архітектури прототипу такої РС для застосування в процесах побудови ДЛПП в предметній області «Розумний будинок», а також визначення подальших задач для програмної реалізації та експериментального дослідження працездатності та ефективності запропонованого підходу.

### **Формальне визначення та узагальнена функціональна структура рекомендаційних систем.**

Сучасні РС представляють собою окремий клас систем інтелектуальної обробки даних, які застосовуються для того, щоб передбачити, які саме інформаційні об'єкти або сервіси: певні товари, послуги, медійний контент тощо, будуть цікаві різним групам їх користувачів [6]. Для цього РС обробляють додаткову, як правило, накопичену раніше, ретроспективну інформацію стосовно їх профілів (або контекстів), тобто їх вже існуючих уподобань, можливих супутніх запитів, додаткових потреб та ін.

Формальне визначення РС можна подати у наступний спосіб [6]: нехай  $S$  – множина користувачів системи,  $I$  – множина всіх елементів, які підпадають під категорію їх переваг,  $R \subseteq I$  – ранжируваний список підмножини таких елементів, а  $r$  – це певний елемент в списку  $R$ . Проблема надання рекомендації полягає в тому, щоб вибрати  $r \in R$  таким чином, аби воно задовольняло вимоги відповідних користувачів  $s \in S$ .

Нехай  $E$  – метрика оцінки задоволеності окремого користувача, яка приймає значення  $z$ , де  $z$  – деяке дійсне число. Тоді якщо  $f$  визначає функцію рекомендації  $r$  елементів для  $s$  користувачів, то проблема формування рекомендації може бути сформульована таким чином:

$$f(r, s) = E \rightarrow \max$$

Питання класифікації сучасних РС заслуговують окремої уваги, і воно не є предметом розгляду у цьому дослідженні, але навіть стислий огляд вже існуючих публікацій за цією проблематикою [6–8] дає підставу вважати, що одним з найбільш поширених типів РС є системи на основі спільної фільтрації (collaborative filtering).

Спільна фільтрація (СФ) – це трьох-ступеневий процес, що починається зі збору користувацької інформації, потім будується матриця для розрахунку асоціацій і, нарешті, надається найбільш вірогідна рекомендація. Її основне припущення полягає в наступному: ті, хто однаково оцінював будь-які предмети в минулому, схильні давати схожі оцінки інших предметів і в майбутньому [8]. На спрощеній діаграмі класів (рис. 1) деякої узагальненої РС зображено 4 основні сутності, що відображають фундаментальні відносини, необхідні для виконання її основних функцій.

Головний клас RecommendationSystem агрегує в собі генеруючий клас RecommendationAlgorithm для алгоритмів надання рекомендацій, і клас бази даних DataBase, що містить інформацію щодо всіх груп

користувачів та їх оцінок, і клас User, який має свій унікальний ідентифікатор і який надає свої оцінки певних об'єктів (сервісів).

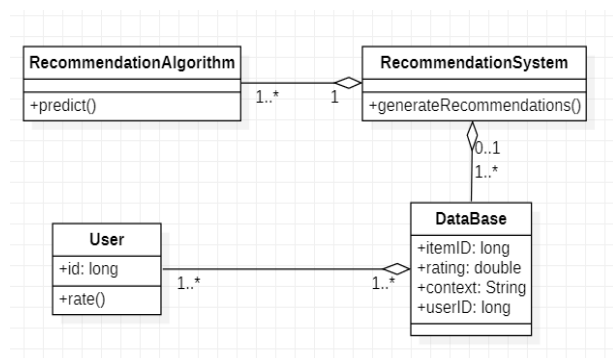


Рис. 1. Спрощена діаграма базових класів PC

**Аналіз інтелектуальних методів розробки рекомендаційних систем.** Кластеризація. Ця група традиційних методів побудови кластерів схожих об'єктів шляхом вимірювання подібності за допомогою таких показників, як відстань Мінковського та кореляція Пірсона [9]. Для двох об'єктів даних  $X = (x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$  та  $Y = (y_1, y_2, y_3 \dots y_n)$  відстань Мінковського визначається як:

$$d(X, Y) = \sqrt[q]{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|^q},$$

де  $n$  – номер розмірності об'єкта,  $x_i, y_i$  значення  $i$ -го виміру об'єкта  $X$  та  $Y$  відповідно,

$q$  – ціле додатне число.

Коли  $q = 1$ ,  $d$  – відстань Манхеттена; коли  $q = 2$ ,  $d$  – евклідова відстань.

Методи кластеризації можна класифікувати на три категорії: методи розділення, методи на основі щільності та ієрархічні методи. Методи на основі щільності зазвичай шукають щільні кластери об'єктів, розділених розрідженими областями, що представляють інформаційний шум. Методи ієрархічної кластеризації створюють декомпозицію набору об'єктів даних, використовуючи певні критерії. У більшості ситуацій кластеризація є проміжним етапом, і результуючі кластери використовуються для подальшого аналізу.

Марківський процес прийняття рішень. Модель Марківського процесу рішення (Markov Decision Process – MDP) це модель для послідовних стохастичних проблем прийняття рішень, яка часто використовується застосунках, де агент (користувач) впливає на навколишнє середовище своїми діями. MDP можна визначити як чотири набори:  $\langle S, A, R, tr \rangle$ , де  $S$  – набір станів,  $A$  – набір дій,  $R$  – функція реального значення винагороди для кожної пари стану–дії, і  $tr$  – ймовірність переходу між кожною парою станів, що обумовлюються кожною дією, або інакше кажучи, функція переходу станів [10]. Стан  $s \in S$  містить всю відповідну інформацію про стан середовища. Дії

викликають зміни стану, а вплив дій на стани фіксується функцією переходу. Функція переходу призначає розподіл ймовірностей по кожній парі(стану, дії). Отже,  $tr(s_1, \alpha, s')$  – це ймовірність здійснення переходу від стану  $s$  до стану  $s'$ , коли виконується  $\alpha$ . Нарешті, функція винагороди присвоює дійсне значення кожній парі (стан, дія), яке описує винагороду (або вартість) виконання цієї дії у такому стані. Часто винагорода є лише функцією стану, і, отже, є мірою бажаності досягнення кожного стану.

**Факторизація матриць.** Алгоритми матричної факторизації (Matrix Factorization – MF) працюють шляхом розкладання певної матриці конфігурації  $V$  взаємодії користувача з елементом його контенту на добуток двох прямокутних матриць меншої розмірності:  $W$  і  $H$ , що уможливило дослідження прихованих факторів для кожного користувача та елемента даних (див. рис. 2).

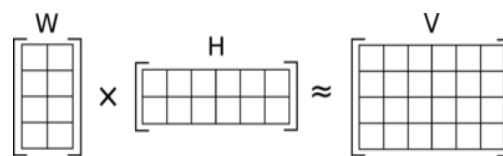


Рис. 2. Схема розкладання матриці конфігурацій

Основне припущення полягає в тому, що як користувачі, так і елементи можуть моделюватися зменшеною кількістю факторів. Формально матриця конфігурації  $V$  та її факторизація представляється наступним чином [11]:

$$V = [c_{11} \dots c_{1m} \vdots \vdots c_{n1} \dots c_{nm}] = H_{n \times h} \cdot W_{h \times m},$$

де  $V$  визначається як набір конфігурацій  $V = \{\vec{c}_1, \dots, \vec{c}_n\}$ ;

вибрані функції кодуються як «1», невибрані – як «0», та невизначені функції як «-1».

Крім того,  $H$  є латентною матрицею функцій, де  $n$  – кількість конфігурацій в  $V$ ,  $m$  – кількість функцій,  $h$  – число латентних розмірів. Окремим випадком підходу MF є  $N$ -вимірний тензорна факторизація [12]. Факторизація  $N$ -мірного тензора при ранзі розкладання  $k$  формує  $N$  матриць, що складаються з  $k$  стовпців, які представляють відображення кожного окремого виміру тензора на  $k$  фактор–вимірів семантичного простору. Схематично це можна зобразити на рис. 3.

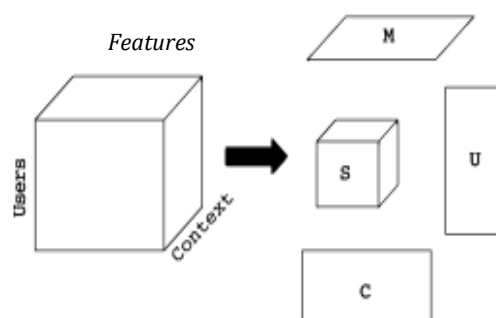


Рис. 3. Схема розкладання 3-вимірного тензора

Тензорна факторизація як найкраще підходить для вирішення задачі управління конфігураціями динамічних SPL, в яких наявна проблема експоненціально зростаючого конфігураційного простору [12].

**Огляд технологій реалізації рекомендаційних систем на прикладах існуючих проєктів з відкритим кодом.** Для розробки власного прототипу РС доцільно провести попередній аналіз деяких існуючих проєктів створення таких систем, з метою виявлення їх характерних технологічних особливостей, переваг та недоліків.

Проект Racoon Recommendation Engine. Ця система [13] представляє собою простий у використанні механізм рекомендацій на основі СФ, який використовує відстань (міру) Жаккарда для визначення схожості між користувачем та його  $k$  найближчими сусідами в масиві відповідних контекстів, і що дозволяє вимірювання двійкових рейтингових даних (тобто в термінах «подобається» / «не подобається»). Готовий модуль Racoon можна поєднати з будь-якою БД, оскільки його реалізація не залежить від конкретної структури даних про користувачів і він використовує тільки їх унікальні ідентифікатори. Racoon повністю реалізовано на мові Javascript, а для роботи з БД використовує асинхронні, неблокуючі функції платформи Node.js. Рекомендації та рейтинги накопичуються у проміжному поSQL – сховищі даних Redis, яке зберігає в оперативній пам'яті всі набори відповідних даних.

Проект LensKit for Python. Це інструментарій [14] з відкритим кодом використовується для побудови, дослідження та вивчення особливостей функціонування РС у різних предметних галузях. Спочатку реалізований як Java-фреймворк, остання версія LensKit містить також інструментальний пакет на мові Python, який забезпечує реалізацію декількох стандартних алгоритмів СФ, обчислення метрик оцінки якості отриманих результатів, а також прості у реалізації API – інтерфейси, що дозволяють легко використовувати його в інших застосунках. Так, наприклад, інтерфейс Algorithm, заснований на шаблонах, надає додаткові методи: Predictor реалізує передбачення уподобань користувачів; Recommender знаходить топ- $N$  рекомендацій та повертає їх рейтинговий список, разом із відповідними оцінками, а метод CandidateSelector дозволяє знайти об'єкт – кандидат

для рекомендації, коли в алгоритмі попередньо не надано жодного набору кандидатів для рекомендації.

Типовий експеримент із тестовою РС, яка створена з використанням LensKit for, складається з трьох основних етапів: 1) підготовка навчальних та тестових наборів з контекстами користувачів, 2) тренування обраного алгоритму СФ та формування вихідних рекомендацій; 3) обчислення їх метрик якості.

Проект Surprise. Цей інструмент [15] для побудови РС є бібліотекою скриптів Python для побудови та аналізу алгоритмів СФ. Surprise пропонує колекцію модулів-оцінювачів (estimator) для прогнозування результатів СФ, серед яких реалізовані як класичні так і модифіковані алгоритми на основі подібності (similarity-based), а також алгоритми, які засновані на факторизації матриць: такі, як SVD (Single Value Decomposition) або MF (Matrix Factorization). Система підтримує вбудовані метрики якості результатів СФ, а також інструменти для вибору моделі та автоматичного пошуку гіперпараметрів СФ. У функціоналі Surprise всі алгоритми є похідними від базового класу *AlgoBase*, де реалізовані деякі ключові методи: наприклад, прогнозування (predict), тренування (fit) та перевірка (test), які можна використати для реалізації будь-якого власного алгоритму прогнозування.

Проект CARSSkit. Ця система [16] представляє собою Java-інструментарій із відкритим вихідним кодом для роботи із контекстно-залежними РС, вона реалізує сучасні алгоритми СФ та надає стандартну платформу для їх розгортання. Функції CARSSkit забезпечують процес гнучкого конфігурування РС за допомогою головного файлу властивостей (property file), який включає параметри налаштування певного алгоритму СФ, опис джерел його вхідних та вихідних даних, посилання на методи оцінки, тощо.

Результати цього стислого огляду функціональних можливостей проєктів РС з відкритим вихідним кодом представлені в табл. 1.

На цій основі можливо зробити мотивований висновок, що для експериментальної реалізації власної РС доцільно обрати саме інструментарій CARSSkit [16].

Для подальшої роботи з актуальною версією CARSSkit достатньо клонувати її git-репозиторій до локальної директорії на комп'ютері розробника цільової РС (див.рис. 4) і таким чином отримати доступ до всіх пакетів, файлів та архівів, головним з яких є виконуючий архів CARSSkit.jar.

Таблиця 1 – Порівняння розглянутих проєктів РС

| Назва    | Підтримувані мови програмування |            |        | Наявність детальної документації | Можливість імплементації власних алгоритмів | Підтримка проєкту розробниками на даний момент |
|----------|---------------------------------|------------|--------|----------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|
|          | Java                            | Javascript | Python |                                  |                                             |                                                |
| Racoon   | –                               | +          | +      | –                                | –                                           | –                                              |
| LensKit  | +                               | –          | +      | +                                | –                                           | +                                              |
| Surprise | –                               | –          | +      | +                                | +                                           | +                                              |
| CARSSkit | +                               | –          | –      | +                                | +                                           | +                                              |

```
$ git clone https://github.com/irecsys/CARSKit
Cloning into 'CARSKit'...
remote: Enumerating objects: 2896, done.
remote: Counting objects: 100% (3/3), done.
remote: Compressing objects: 100% (3/3), done.
remote: Total 2896 (delta 0), reused 1 (delta 0), pack-reused 2893
Receiving objects: 100% (2896/2896), 38.92 MiB | 4.00 MiB/s, done.
Resolving deltas: 100% (2018/2018), done.
```

Рис. 4. Клонування репозиторію кода проєкта CARSKit

**Розробка архітектури прототипу рекомендаційної системи для конфігурування програмних компонентів систем «Розумний будинок».** Опис вимог до програмного забезпечення прототипу РС. В роботі [17] представлена одна з можливих доменних моделей варіабельних компонентів умовної системи «Розумний будинок (РБ)», і враховуючи її функції та властивості, можна запропонувати наступний сценарій управління конфігураціями її компонентів, який наведено на рис. 5 у вигляді UML-діаграми прецедентів.

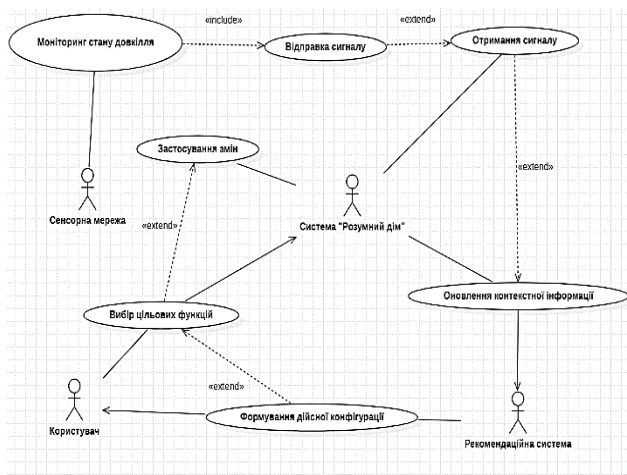


Рис. 5. Сценарій взаємодії РС, системи «РД» та користувачів

При цьому сенсорна мережа відслідковує зміни у зовнішньому середовищі і постійно передає інформацію до системи «РБ»; після аналізу вхідних сигналів система «РБ» передає їх безпосередньо до РС для відслідковування змін контекстної інформації, а потім алгоритм надання рекомендацій РС генерує для користувача певні конфігурації налаштувань функцій та властивостей «РБ»; і в кінцевому рахунку користувач обирає найбільш прийнятну для себе конфігурацію функцій і встановлює її у системі «РБ» через відповідні інтерфейси (або цей етап може бути повністю автоматизованим, в залежності від рівня інтелектуальності пристроїв самої системи «РБ»).

Крім того, з метою можливості вдосконалення роботи РС може бути передбачено застосування в ній певної БД прецедентів, які в подальшому також будуть використовуватися для надання рекомендацій: див. відповідну UML-діаграму послідовностей на рис. 6.

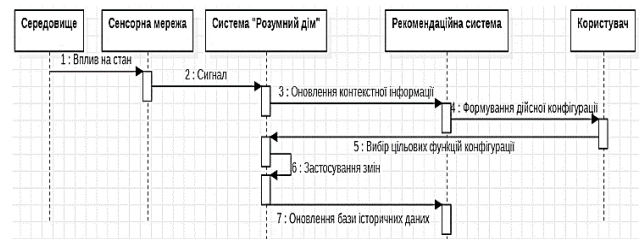


Рис. 6. Діаграма взаємодії РС, «РД» та користувача з використанням БД

Маючи функціональні вимоги до цільового прототипу РС, які представлені діаграмами на рис. 5 и рис. 6 відповідно, можна перейти до розробки її архітектури із використання інструментальних можливостей проєкту CARSKit (див. вище).

**Розробка архітектури прототипу РС.** Запропонована архітектура для прототипу РС представлена на рис. 7 у вигляді UML діаграми пакетів (package diagram). Пакет Data включає в себе три модулі: Structure, Setting та Processor, які, відповідно, містять основні класи реалізації структур даних (матриці та тензори), класи для базових операцій обробки даних і класи для налаштувань певних системних параметрів.

Пакет Algorithms поділяється на два інших пакети: пакет Baseline, який містить основні рекомендаційні алгоритми спільної фільтрації (UserKNN, SVD++ та ін.) та алгоритми ранжування (RankSGD, RankALS тощо), а також пакет CARS, що надає контекстно-залежні класи трансформації та адаптації основних алгоритмів [16]. Крім цих двох пакетів, функціональна архітектура запропонованої РС включає в себе також: пакет Generic, який містить класи, за інтерфейсами яких можуть бути реалізовані додаткові алгоритми рекомендацій; пакет Eval, що надає відповідні класи для розрахунку різноманітних метрик оцінки якості рекомендацій, і нарешті, пакет Main, в якому інкапсулюються класи для завантаження та ініціалізації поточного сеансу роботи з прототипом РС.

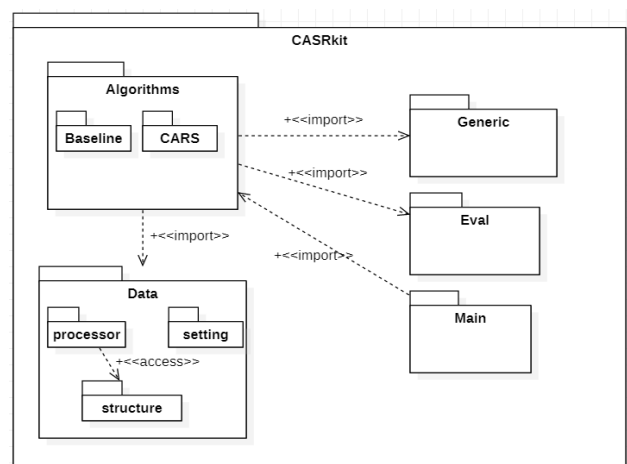


Рис. 7. Діаграма основних функціональних пакетів РС

**Висновки та подальші дослідження.** На основі проведеного аналізу існуючих підходів до вирішення задачі динамічного конфігурування програмних компонентів у лінійках програмних продуктів (ЛПП) було

показано, що для вирішення цієї проблеми доцільно використання методів та технологій побудови сучасних рекомендаційних систем (РС). Результатом подальшого огляду інтелектуальних методів розробки РС та дослідження функціональних можливостей деяких технологій реалізації РС у проектах з відкритим кодом, було запропоновано для подальшого використання саме в задачах кофигурування динамічних ЛПП обрати метод *N*-вимірної контекстно-залежної тензорної факторизації та інструментальний засіб CARSSkit. Для практичної реалізації прототипу відповідної РС в роботі була розроблена її функціональна архітектура, яка уможливує автоматизацію кофигурування програмних компонентів у системах типу «Розумний будинок». В подальшому ця запропонована архітектура РС має бути програмно реалізована, для чого можуть бути використані функціональні можливості як самого засобу CARSSkit, так і розроблені додаткові інструментальні засоби для реалізації алгоритмів обробки консолідованих даних на мові Python [18].

Особливу увагу в подальшому слід приділити плануванню обчислювальних експериментів з урахуванням специфіки ресурсів контекстних даних в системах типу «Розумний будинок» та вибору відповідних метрик для оцінки ефективності алгоритмів тензорної факторизації для прогнозування динамічних кофигурацій програмних компонентів в цих системах.

#### Список літератури

- Reinhartz-Berger I., Sturm A., Clark T., Cohen S., Bettin J. *Domain Engineering: Product Lines, Languages, and Conceptual Models*. Heidelberg: Springer, 2013. 420 p.
- Metzger A., Pohl K. Software Product Line Engineering and Variability Management: Achievements and Challenges. *Proceedings of FOSE'14 Conference*, May 31 – June 7, 2014, Hyderabad, India. P. 70–84.
- Eleutério J. A *Comparative Study of Dynamic Software Product Line Solutions for Building Self-Adaptive Systems*. 2017. 30 p.
- Sharifloo A. *Learning and Evolution in Dynamic Software Product Lines*. 2016. 8 p.
- Gamzayev R. O., Karaçuha E., Tkachuk M. V. et al. An Approach to Assessment of Dynamic Software Variability in Mobile Applications Development. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2018. № 40. С. 14–25.
- Sohail S., Siddiqui J., Ali R. Classifications of Recommender Systems: A Review. *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2017. Vol.10(4). P.132–153.
- Xiaoyuan Su, Taghi M. Khoshgoftaar. A Survey of Collaborative Filtering Techniques. *Advances in Artificial Intelligence*. Volume 2009, January 2009. 4 p.
- Lytvyn V., Vysotska V., Shatskykh V. et al. Design of A Recommendation System Based on Collaborative Filtering and Machine Learning Considering Personal Needs of The User. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4/2 (100). P. 6–28.
- Баргесян А. А., Куприянов М. С. *Методы и модели анализа данных OLAP и Data Mining*. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 331 с.
- Shani, G., Heckerman, D., Brafman, R. An MDP-Based Recommender System. *Journal of Machine Learning Research*. 2005. Vol. 6. P. 1265–1295.
- Symeonidis, P., Zioupos, A. *Matrix and Tensor Factorization Techniques for Recommender Systems*. SpringerBriefs in Computer Science, 2016. 102 p.
- Pereira J. et al. N-dimensional Tensor Factorization for Self-Configuration of Software Product Lines at Runtime Gothenburg. SPLC '18: *Proceedings of the 22nd International Systems and Software Product Line Conference*. 2018. Vol. 1. P. 87–97.
- Raccoon Recommendation Engine Github [Електронний ресурс]. URL: <https://github.com/guymorita/recommendationRaccoon#recommendationraccoon-raccoon> (дата звернення: 01.05.2021).
- Michael D. Ekstrand. LensKit for Python. *Dept. of Computer Science, Boise State University*. Idaho, USA, September 3, 2020.
- Surprise documentation [Електронний ресурс]. URL: <https://surprise.readthedocs.io/en/stable/index.html> (дата звернення: 12.06.2021).
- Zheng, Y., Mobasher, B. CARSSkit: A Java-Based Context-aware Recommendation Engine. *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Data Mining*, NJ, USA, 2015.
- Гамзаєв Р. О., Ткачук М. В., Товстокоренко О. Т. Застосування методів доменного моделювання для підтримки варіабельності програмного забезпечення в розробці систем «Розумний будинок». *Інформаційні системи та технології: Матеріали статей 9-ї Міжнародної наук.-техн. конференції, Харків, 17–20 листопада 2020 року*. Харків: ХНУРЕ, 2020. С. 217–220.
- Python documentation [Електронний ресурс]. URL: <https://www.python.org/about/> (дата звернення 01.05.2021).

#### References (transliterated)

- Reinhartz-Berger I., Sturm A., Clark T., Cohen S., Bettin J. *Domain Engineering: Product Lines, Languages, and Conceptual Models*. Heidelberg, Springer, 2013. 420 p.
- Metzger A., Pohl K. Software Product Line Engineering and Variability Management: Achievements and Challenges. *Proceedings of FOSE'14 Conference*, May 31 – June 7, 2014, Hyderabad, India. pp. 70–84.
- Eleutério J. A *Comparative Study of Dynamic Software Product Line Solutions for Building Self-Adaptive Systems*, 2017. 30 p.
- Sharifloo A. *Learning and Evolution in Dynamic Software Product Lines*, 2016. 8 p.
- Gamzayev R. O., Karaçuha E., Tkachuk M. V. et al. An Approach to Assessment of Dynamic Software Variability in Mobile Applications Development. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho universytetu imeni V.N. Karazina, Seriya «Matematychnе modelyuvannya. Informatsiyni tekhnolohiyi. Avtomatyzovani systemy upravlinnya»*. 2018, no 40, pp. 14–25.
- Sohail S., Siddiqui J., Ali R. Classifications of Recommender Systems: A Review // *Journal of Engineering Science and Technology Review*. 2017, vol.10(4), pp.132–153.
- Xiaoyuan Su, Taghi M. Khoshgoftaar. A Survey of Collaborative Filtering Techniques. *Advances in Artificial Intelligence*, Volume 2009, January 2009. 4 p.
- Lytvyn V., Vysotska V., Shatskykh V. et al. Design of A Recommendation System Based on Collaborative Filtering and Machine Learning Considering Personal Needs of The User. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, vol. 4/2 (100), pp. 6–28.
- Bargesyanyan A. A., Kupriyanov M. S. *Metody i modeli analiza dannykh OLAP i Data Mining*. SPb, BKhV-Peterburg, 2004. 331 p.
- Shani, G., Heckerman, D., Brafman, R. An MDP-Based Recommender System. *Journal of Machine Learning Research*, 2005, vol. 6, pp. 1265–1295.
- Symeonidis, P., Zioupos, A. *Matrix and Tensor Factorization Techniques for Recommender Systems*. SpringerBriefs in Computer Science, 2016. 102 p.
- Pereira J. et al. N-dimensional Tensor Factorization for Self-Configuration of Software Product Lines at Runtime Gothenburg. SPLC '18: *Proceedings of the 22nd International Systems and Software Product Line Conference*. 2018, vol. 1, pp. 87–97.
- Raccoon Recommendation Engine Github [Електронний ресурс]. URL: <https://github.com/guymorita/recommendationRaccoon#recommendationraccoon-raccoon> (дата звернення: 12.06.2021).
- Michael D. Ekstrand. LensKit for Python. *Dept. of Computer Science, Boise State University*. Idaho, USA, September 3, 2020.
- Surprise documentation URL: <https://surprise.readthedocs.io/en/stable/index.html> (accessed 01.05.2021).
- Zheng, Y., Mobasher, B. CARSSkit: A Java-Based Context-aware Recommendation Engine. *Proceedings of the 15th IEEE International Conference on Data Mining*, NJ, USA, 2015.

17. Hamzayev R. O., Tkachuk M. V., Tovstokorenko O.T. Zastosuvannya metodiv domennoho modelyuvannya dlya pidtrymky variabel'nosti prohrannoho zabezpechennya v rozrobtsi system «Rozumnyy budynok». *Informatsiyi systemy ta tekhnolohiyi: Materialy statey 9--yi Mizhnarodnoyi nauk.-tekhn. konferentsiyi, Kharkiv*, 17–20 lystopada 2020 roku. Kharkiv, KhNURE Publ., 2020, pp. 217–220.
18. *Python documentation* URL: <https://www.python.org/about/> (accessed 01.05.2021).
- Надійшла (received) 11.05.2021

*Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author*

**Гамзаєв Рустам Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент; докторант кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків–22, Україна, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>; e-mail: [rustam.gamzayev@karazin.ua](mailto:rustam.gamzayev@karazin.ua)

**Ткачук Микола Вячеславович** – доктор технічних наук, професор; завідувач кафедри моделювання систем і технологій, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків–22, Україна, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>; e-mail: [mykola.tkachuk@karazin.ua](mailto:mykola.tkachuk@karazin.ua)

**Гамзаев Рустам Александрович** – кандидат технических наук, доцент; докторант кафедры моделирования систем и технологий, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, площадь Свободы, 6, Харьков, Украина, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>; e-mail: [rustam.gamzayev@karazin.ua](mailto:rustam.gamzayev@karazin.ua)

**Ткачук Николай Вячеславович** – доктор технических наук, профессор заведующий кафедрой моделирования систем и технологий, Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, площадь Свободы, 4, Харьков, Украина, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>; e-mail: [mykola.tkachuk@karazin.ua](mailto:mykola.tkachuk@karazin.ua)

**Gamzayev Rustam Olexandrovich** – PhD, associate professor; post-doctorate at the Department of Systems and Technologies Modeling, Kharkiv National University named after V.N. Karazina, Maidan Svobody, 6, Kharkiv, Ukraine, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2713-5664>; e-mail: [rustam.gamzayev@karazin.ua](mailto:rustam.gamzayev@karazin.ua)

**Tkachuk Mykola Vyacheslavovich** – doctor of technical sciences, professor; head of the Department of Systems and Technologies Modeling, Kharkiv National University named after V.N. Karazina, Maidan Svobody, 6, Kharkiv, Ukraine, 61022; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0852-1081>; e-mail: [mykola.tkachuk@karazin.ua](mailto:mykola.tkachuk@karazin.ua)

**K. S. YAMKOVYI****DEVELOPMENT AND COMPARATIVE ANALYSIS OF SEMI-SUPERVISED LEARNING ALGORITHMS ON A SMALL AMOUNT OF LABELED DATA**

The paper is dedicated to the development and comparative experimental analysis of semi-supervised learning approaches based on a mix of unsupervised and supervised approaches for the classification of datasets with a small amount of labeled data, namely, identifying to which of a set of categories a new observation belongs using a training set of data containing observations whose category membership is known. Semi-supervised learning is an approach to machine learning that combines a small amount of labeled data with a large amount of unlabeled data during training. Unlabeled data, when used in combination with a small quantity of labeled data, can produce significant improvement in learning accuracy.

The goal is semi-supervised methods development and analysis along with comparing their accuracy and robustness on different synthetic datasets. The proposed approach is based on the unsupervised  $K$ -medoids methods, also known as the Partitioning Around Medoid algorithm, however, unlike  $K$ -medoids the proposed algorithm first calculates medoids using only labeled data and next process unlabeled classes – assign labels of nearest medoid. Another proposed approach is the mix of the supervised method of  $K$ -nearest neighbor and unsupervised  $K$ -Means. Thus, the proposed learning algorithm uses information about both the nearest points and classes centers of mass.

The methods have been implemented using Python programming language and experimentally investigated for solving classification problems using datasets with different distribution and spatial characteristics. Datasets were generated using the scikit-learn library. Was compared the developed approaches to find average accuracy on all these datasets. It was shown, that even small amounts of labeled data allow us to use semi-supervised learning, and proposed modifications ensure to improve accuracy and algorithm performance, which was demonstrated during experiments. And with the increase of available label information accuracy of the algorithms grows up. Thus, the developed algorithms are using a distance metric that considers available label information.

**Keywords:** Unsupervised learning, supervised learning, semi-supervised learning, clustering, distance, distance function, nearest neighbor, medoid, center of mass.

**К. С. ЯМКОВИЙ****РОЗРОБКА ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ АЛГОРИТМІВ НАВЧАННЯ З ЧАСТКОВИМ ЗАЛУЧЕННЯМ ВЧИТЕЛЯ НА МАЛІЙ КІЛЬКОСТІ РОЗМІЧЕНИХ ДАНИХ**

Дана робота присвячена розробці та порівняльному аналізу алгоритмів навчання з частковим залученням вчителя, заснованих на поєднанні неконтрольованих та контрольованих підходів до класифікації наборів даних з невеликою кількістю маркованих даних, а саме виявленню, до якої з набору категорій нове спостереження належить за допомогою навчального набору даних, що містить спостереження, приналежність до категорії яких відома. Навчання з частковим залученням вчителя – це підхід до машинного навчання, який поєднує невелику кількість маркованих даних з великою кількістю немаркованих даних під час навчання. Немарковані дані, якщо їх використовувати в поєднанні з невеликою кількістю маркованих даних, можуть значно покращити точність навчання.

Метою роботи є розробка та аналіз методів навчання з частковим залученням вчителя, а також порівняння їх точності та надійності на різних наборах штучних даних. Запропонований підхід заснований на методі неконтрольованого навчання  $K$ -медоїдів, також відомий як алгоритм Розбиття навколо медоїдів, однак, на відміну від  $K$ -медоїдів, запропонований алгоритм спочатку обчислює медоїди, використовуючи лише марковані дані, а далі обробляє не марковані елементи – призначає мітки найближчих медоїдів. Іншим запропонованим підходом є поєднання контрольованого методу  $K$ -найближчих сусідів та неконтрольованого  $K$ -середніх. При цьому запропонований алгоритм навчання використовує інформацію як про найближчі точки, так і про класи центрів маси.

Методи були реалізовані з використанням мови програмування Python та експериментально досліджені для вирішення проблем класифікації з використанням наборів даних з різними розподілом та просторовими характеристиками. Набори даних були сформовані за допомогою бібліотеки scikit-learn. Було порівняно розроблені підходи за їх середню точність за всіма датасетами. Було показано, що навіть невеликі кількості маркованих даних дозволяють використовувати навчання з частковим залученням вчителя, а запропоновані модифікації забезпечують підвищення точності та роботи алгоритму, що було продемонстровано під час експериментів. І зі збільшенням доступної інформації про ярлики, точність алгоритмів зростає. Таким чином розроблені алгоритми використовують метрику відстані, яка враховує доступну інформацію про ярлики.

**Ключові слова:** навчання без учителя, навчання з учителем, навчання з частковим залученням вчителя, кластеризація, відстань, функція відстані, найближчий сусід, медоїд, центр мас.

**К. С. ЯМКОВОЙ****РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБУЧЕНИЯ С ЧАСТИЧНЫМ ПРИВЛЕЧЕНИЕМ УЧИТЕЛЯ НА МАЛОМ КОЛИЧЕСТВЕ РАЗМЕЧЕННЫХ ДАННЫХ**

Данная работа посвящена разработке и сравнительному анализу алгоритмов обучения с частичным привлечением учителя, основанных на сочетании подходов с привлечением учителя и без классификации наборов данных с небольшим количеством маркированных данных, а именно выявлению, к какой из набора категорий новое наблюдение предстает с помощью учебного набора данных, содержащего наблюдения, принадлежность к категории которых известна. Обучение с частичным привлечением учителя – это подход к машинному обучению, который сочетает небольшое количество размеченных данных с большим количеством не размеченных данных во время обучения. Не размеченные данные, если их использовать в сочетании с небольшим количеством размеченных данных, могут значительно улучшить точность обучения. Целью работы является разработка и анализ методов обучения с частичным привлечением учителя, а также сравнение их точности и надежности на различных наборах искусственных данных. Предложенный подход основан на методе обучения без учителя  $K$ -Медоид, также известного как алгоритм Разбивка вокруг медоид, однако, в отличие от стандартного  $K$ -Медоид, предложенный алгоритм сначала вычисляет медоиды, используя только размеченные данные, а дальше обрабатывает не размеченные – назначает метки ближайших медоидов. Другим предложенным подходом является сочетание метода обучения с учителем  $K$ -ближайших соседей и обучения без учителя  $K$ -средних. При этом предложенный алгоритм обучения использует информацию как о ближайших точки, так и о классах центров масс.

Методы были реализованы с использованием языка программирования Python и экспериментально исследованы для решения проблемы классификации с использованием наборов данных с различными распределением и пространственными характеристиками. Наборы данных были сформированы с помощью библиотеки scikit-learn. Были проведено сравнение разработанных подходов на основе их средней точности

© K. S. Yamkovyi, 2021

по всем датасета. Было показано, что даже небольшие количества размеченных данных позволяют использовать обучение с частичным привлечением учителя, а предложенные модификации обеспечивают повышение точности и устойчивости алгоритма, что было продемонстрировано во время экспериментов. И с увеличением доступной информации о ярлыки, точность алгоритмов растет. Таким образом, разработанные алгоритмы используют метрику расстояния, учитывающую доступную информацию о метках классов.

**Ключевые слова:** обучение без учителя, обучение с учителем, обучение с частичным привлечением учителя, кластеризация, расстояние, функция расстояния, ближайший сосед, медоид, центр масс.

**Introduction.** A large amount of data was produced recently, and nowadays humanity had the opportunity to store and process all this data. In all spheres of life people try to use these data for optimizing business and life-improving using AI and data mining.

There are several approaches to data processing and analysis problem within the framework of machine learning paradigms. One of them is unsupervised learning [1] when we try to detect inner structure or patterns without human supervision. The most efficient approach in machine learning is supervised learning, when we have some data with labels and try to learn a function on data points as label pairs. In many cases, there is no opportunity to label all data from different cases, causes are too complex and expensive experiments, data streaming with large frequency [2], or just high cost of data labeling. Therefore, in this case a satisfactory compromise is semi-supervised learning when we use datasets with a small amount of labeled that allows learning better inner structure (fig 1).

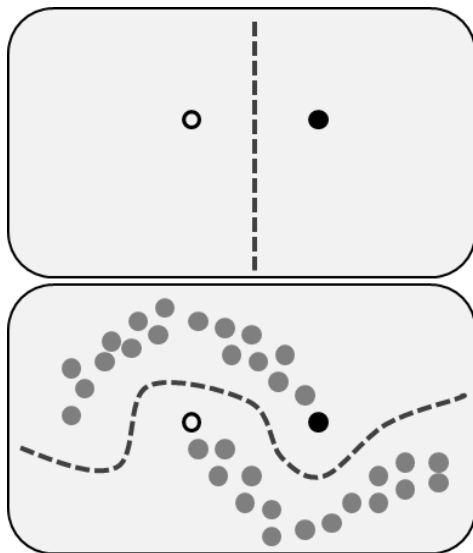


Fig. 1. Example of unlabeled data in semi-supervised learning

Semi-supervised learning includes different approaches, and can be used for any popular data analysis problems, such as clustering [3], anomaly detection, latent variables models.

The object of the study is the process of the data points classifications, namely, identifying to which of a set of categories a new observation belongs using a training set of data containing observations whose category membership is known.

The subject of the study is development of semi-supervised methods for data classification.

The purpose of the work is to develop an improved semi-supervised method using already exist supervised and unsupervised approaches and compare their accuracy and robustness.

**Problem statement.** Given a set of  $l$  labeled

examples  $\{< x_1, y_1 >, \dots, < x_l, y_l >\}$ , where  $x_i$  – feature vector of  $i$ -th example and  $y_i$  – its label (class), and a set of  $u$  unlabeled data  $\{x_{l+1}, \dots, x_{l+u}\}$   $x_1, x_2, \dots, x_{l+u} \in X$  and  $y_1, y_2, \dots, y_l \in Y$ . The goal is to determine some function using given sets, that will correct map points from  $X$  to  $Y$ :  $f(x_j) = y_j$  for any point from  $X$ .

**Related work.** The semi-supervised learning described in literature not so widely as unsupervised or supervised, especially algorithms implementation.

In [4] Jesper E. van Engelen and Holger H. Hooze gives an overview of semi-supervised approaches describes assumptions of semi-supervised learning especially: smoothness, low-density and manifold.

Semi-supervised approach demonstrates high efficiency in solving clustering problems, the idea of using of clustering algorithm was described in the review [5]. The majority of these methods are modifications of the popular  $k$ -means clustering method.

One of the simplest unsupervised approach is  $K$ -Medoids also known as Partitioning Around Medoid algorithm was proposed in 1987 by Kaufman and Rousseeuw in [6]. A medoid is a point in the cluster, whose average dissimilarities with all the other points in the cluster is minimum.

$K$ -medoid is a partitioning technique of clustering, which clusters the data set of  $n$  objects into  $k$  clusters, with the number  $k$  of clusters assumed known a priori.

Both the  $k$ -means and  $k$ -medoids algorithms are partitional, which breaking the dataset up into groups, and both attempt to minimize the distance between points labeled to be in a cluster, and a point designated as the center of that cluster. In contrast to the  $k$ -means algorithm,  $k$ -medoids choose data points as centers and can be used with arbitrary distances, while in  $k$ -means the center of a cluster is the average between the points in the cluster (fig. 2). Consequently,  $K$ -medoids is more robust to noise and outliers as compared to  $K$ -means.

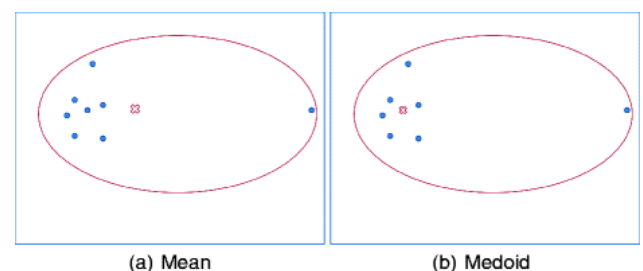


Fig. 2. Mean and medoid difference

The supervised approach described in [7]. The nearest neighbor decision rule assigns to an unclassified sample point the classification of the nearest of a set of previously classified points. Thus, for any number of categories, the probability of error of the nearest neighbor rule is bounded above by twice the Bayes probability of error. In this sense, it may be said that half the classification information in an

infinite sample set is contained in the nearest neighbor.

One of the popular semi-supervised methods is kernels based methods [8], especially Transductive support vector machines [9, 10]. This method has the same pros and cons as classic Support Vector Machine, but the main cons are that the algorithm works only with binary classification and has exponential computation time while a data set to increase.

**Semi-supervised methods.** As a baseline was chosen clustering algorithms implemented in the scikit-learn library [11, 12]. Algorithms use different approaches and library has interfaces for using custom metrics.

The proposed algorithm uses the  $K$ -medoid approach as a base idea. However, unlike  $K$ -medoids the proposed algorithm first calculates medoids using only labeled data and next process unlabeled classes – assign labels of nearest medoid.

This algorithm has the following pros:

- reduced processing time, because required only multiple iteration throw points unlike standard  $K$ -medoid;
- more robustness to wrong assigned labels, because the algorithm gives higher weights to labeled data in the medoids calculation step.

Another proposed approach uses the idea of  $K$ -nearest neighbors and  $K$ -Mean algorithm, because for classifying we use both information about the nearest points and classes centers of mass (algorithm 1).

As a distance metric was used Euclidean distance but any metric could be used.

Classes' centers do not recalculate after each assignment, because experiments show that it does not bring results but takes more computation time.

So, the described above method allows:

- consider information about the nearest point, because in most cases point has the same label as its neighbors;
- combine a different kind of information;
- tune weight of different sources using input parameters.

**Experiments.** For experiments purpose was generated multiple datasets using sklearn library. Each dataset contains 250 points in 2D space. Available only 10% of labels as default. In addition, datasets have multiple clusters with different distributions and shapes (fig. 3).

We will compare different approaches to find average accuracy on all these. In Tab. 1 we can see that the best-unsupervised method is  $K$ -nearest neighbors based algorithm has higher average accuracy. The fig. 4 shown the same result. Especially the  $K$ -nearest neighbors based approach has better accuracy in case of closely located clusters with the same distribution.

Another required feature of a semi-supervised algorithm is quality versus a number of labels dependency: more labels – higher quality and vice versa. However, fig. 5 shows that the proposed methods perform more accuracy with increasing number of available labels.

Table 1 – Accuracy comparison

| Method name                                        | Dataset name |       |        | Average accuracy |
|----------------------------------------------------|--------------|-------|--------|------------------|
|                                                    | Moons        | Aniso | Varied |                  |
| $K$ -medoids based                                 | 0.860        | 0.864 | 0.904  | 0.876            |
| $K$ -nearest neighbors based<br>( $N = 5, C = 2$ ) | 0.904        | 0.900 | 0.912  | 0.905            |

Algorithm 1. Object classification using  $K$ -NN based approach

Input:

$X$  – feature matrix  $n*m$ ,  $n$  – number of objects,  $m$  – number of features

$y$  – labels vector of length  $n$ ,  $y[i] = -1$  if no label data for  $i$ -th object

$K$  – number of nearest points

$C$  – weight of nearest class center

Output:

$y\_predicted$  – vector of length  $n$  with object labels

```

1:  $y\_predicted \leftarrow$  empty list of length  $n$ 
2:  $unlabeled\_idxs \leftarrow$  list of indexes where  $y = -1$ 
3:  $labeled\_idxs \leftarrow$  list of indexes where  $y > -1$ 
4:  $center\_coordinates \leftarrow$  list of center coordinates for each class, calculated using available labels
5: random shuffle  $unlabeled\_idxs$ 
6: for  $i$  in  $unlabeled\_idxs$  do
7:    $distances\_i \leftarrow$  distances from  $i$ -th object to each object with indexes in  $labeled\_idxs$ 
8:    $argsort\_distances\_i$ 
9:    $nearest\_idxs \leftarrow$  indexes of first  $K$  elements from  $distances\_i$ 
10:   $classes\_dist\_i \leftarrow$  distance from  $i$ -th object to each classes' center
11:   $nearest\_class\_idx \leftarrow$  index of nearest class to  $i$ -th object
12:   $cls\_counts \leftarrow$  list, where  $j$ -th element denote numbers of points belong to  $j$ -th class among  $nearest\_idxs$ 
13:   $cls\_counts[nearest\_class\_idx] \leftarrow cls\_counts[nearest\_class\_idx] + C$  // add additional value for class with nearest center
14:   $label \leftarrow \text{argmax}(cls\_counts)$ 
15:   $y\_predicted[i] \leftarrow label$ 
16: end for
17: for  $i$  in  $labeled\_idxs$  do
18:   $y\_predicted[i] \leftarrow y[i]$ 
19: end for
20: return  $y\_predicted$ 

```

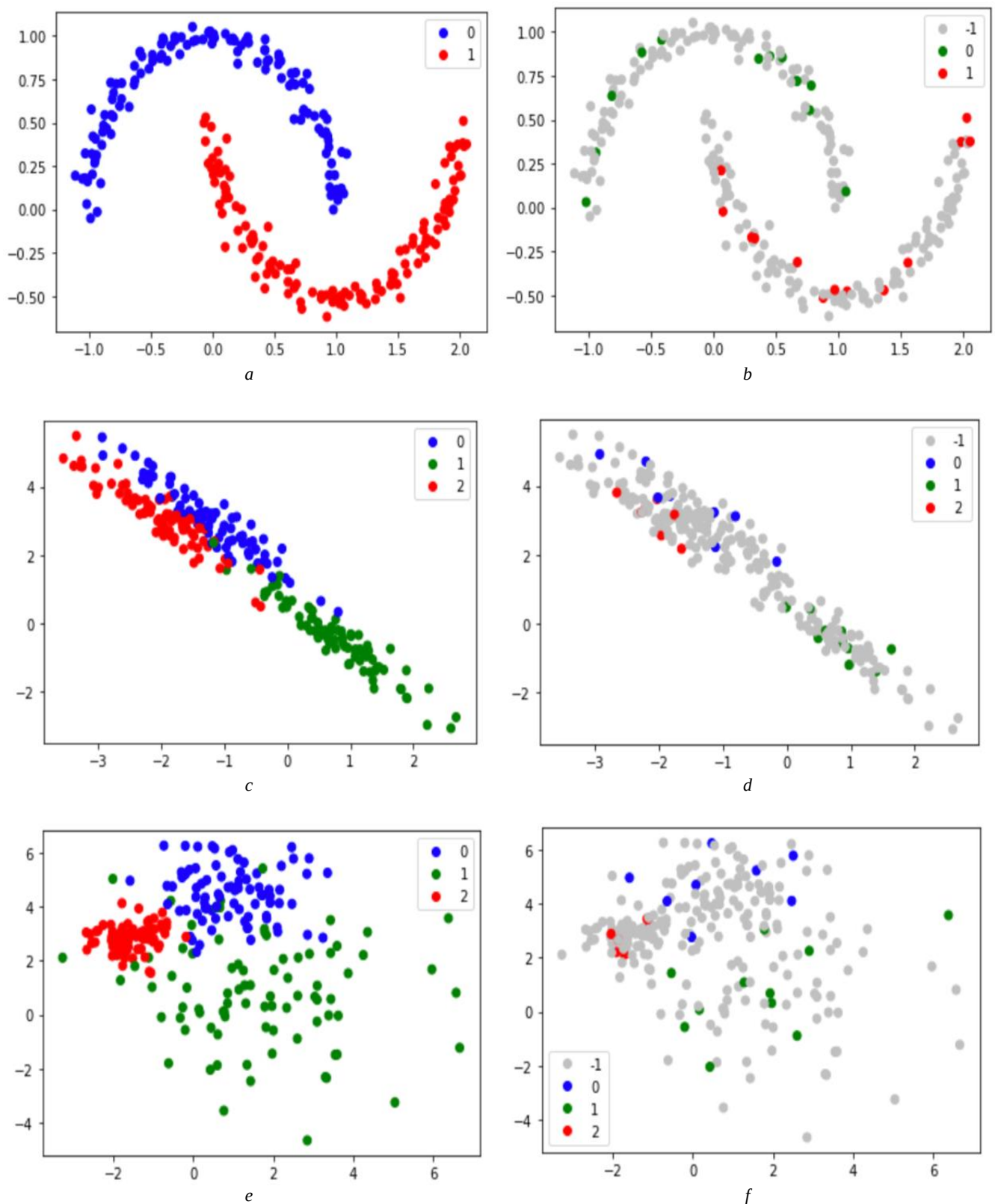


Fig. 3. Datasets visualization; the legend shows classes' label, -1 – unlabeled point;  
 $a, b$  – moons dataset, 2 classes, with non-convex and separable shapes;  
 $c, d$  – aniso dataset, 3 classes, convex shape with same class variation, not separable;  
 $e, f$  – varied dataset, 3 classes with a convex shape and different class variation, also not separable

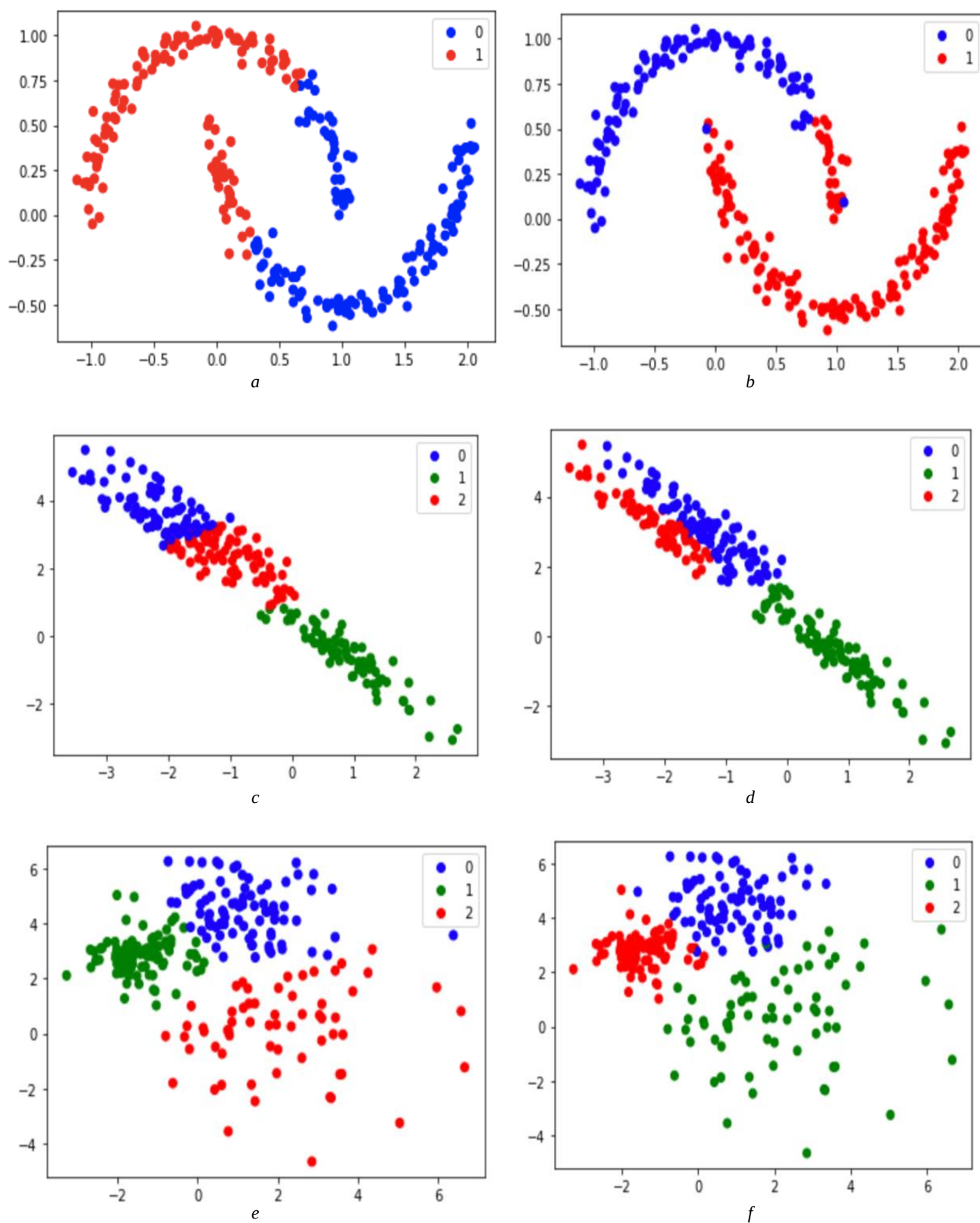


Fig. 4. Predicted labels visualization; a, c, f – unsupervised K-Medoids;  
b, d, f – semi-supervised K-nearest neighbors based method

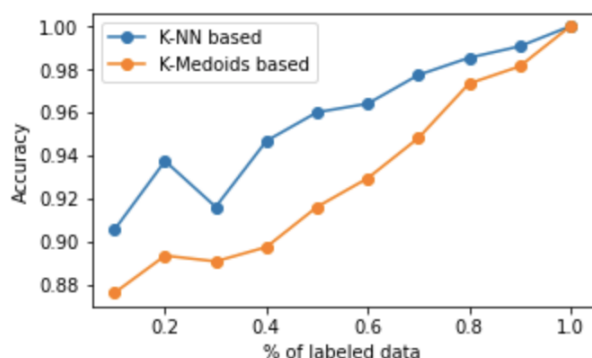


Fig. 5. Accuracy versus the quantity of labeled data comparison plot

**Conclusions.** In this study, we had shown that even small amounts of labeled data allow using of semi-supervised learning and improving accuracy. In addition, semi-supervised learning can improve algorithm performance too. Multiple approaches to semi-supervised learning were proposed, they are using a distance metric that considers available label information.

#### References

1. Hinton G., Sejnowski T. Unsupervised Learning: Foundations of Neural Computation. MIT Press, 1999. 391 p.
2. Lyubchik L. M., Galuza A. A., Grinberg G. M. Semi-supervised Learning to Rank with Nonlinear Preference. *Recent Developments in Fuzzy Logic and Fuzzy Sets. Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Lviv: Springer, 2019. Vol. 391. P. 73–102.
3. Basu S., Bilenco M., Banerjee A., Mooney. R. J. *Probabilistic semi-supervised clustering with constraints*. MIT Press, 2006. P. 73–102.
4. Jesper E., Holger H. A survey on semi-supervised learning. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05855-6>.
5. Bair E. *Semi-supervised clustering*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1307.0252.pdf>.
6. Kaufman, L., Rousseeuw P. J. *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*. New York: Wiley, 1990. 342 p.

7. Cover T., Hart P. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1967. Vol. 13, no. 1. P. 21–27.
8. Huang T., Kecman V., Kopriva I. *Kernel Based Algorithms for Mining Huge Data*. New York: Springer, 2006. 208 p.
9. Vapnik V. N. *Statistical Learning Theory*. New York: Wiley, 1998. 768 p.
10. Wang J., Shen X., Pan W. Transductive Support Vector Machines, *Contemporary Mathematics*. 2007. Vol. 443. P. 7–19.
11. Rossum G. *Python programming language*. Available at: <http://www.python.org>.
12. Cournapeau D. *Scikit-learn. machine learning library for the Python programming language*. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/>.

#### References (transliterated)

1. Hinton G., Sejnowski T. Unsupervised Learning: Foundations of Neural Computation. MIT Press, 1999. 391 p.
2. Lyubchik L. M., Galuza O. A., Grinberg G. M. Semi-supervised Learning to Rank with Nonlinear Preference. *Recent Developments in Fuzzy Logic and Fuzzy Sets. Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Lviv, Springer, 2019, vol. 391, pp. 81–103.
3. Basu S., Bilenco M., Banerjee A., Mooney. R. J. *Probabilistic semi-supervised clustering with constraints*. MIT Press, 2006, pp. 73–102.
4. Jesper E., Holger H. A survey on semi-supervised learning. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10994-019-05855-6>.
5. Bair E. *Semi-supervised clustering*. Available at: <https://arxiv.org/pdf/1307.0252.pdf>.
6. Kaufman, L., Rousseeuw P. J. *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*. New York, Wiley, 1990. 342 p.
7. Cover T., Hart P. Nearest neighbor pattern classification. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1967, vol. 13, no. 1, pp. 21–27.
8. Huang T., Kecman V., Kopriva I. *Kernel Based Algorithms for Mining Huge Data*. New York, Springer, 2006. 208 p.
9. Vapnik V. N. *Statistical Learning Theory*. New York, Wiley, 1998. 768 p.
10. Wang J., Shen X., Pan W. Transductive Support Vector Machines, *Contemporary Mathematics*. 2007, vol. 443, pp. 7–19.
11. Rossum G. *Python programming language*. Available at: <http://www.python.org>.
12. Cournapeau D. *Scikit-learn. machine learning library for the Python programming language*. Available at: <https://scikit-learn.org/stable/>.

Посмунула (received) 10.03.2021

#### Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

**Ямковий Клим Сергійович** – магістр, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри комп'ютерної математики і аналізу даних; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9512-4150>; e-mail: [yamkovou@gmail.com](mailto:yamkovou@gmail.com)

**Ямковой Клим** – магистр, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры компьютерной математики и анализа данных; г. Харьков, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9512-4150>; e-mail: [yamkovou@gmail.com](mailto:yamkovou@gmail.com)

**Yamkovi Klym** – master, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, PhD student of the Department of Computer Mathematics and Data Analysis; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9512-4150>; e-mail: [yamkovou@gmail.com](mailto:yamkovou@gmail.com)

**О. Ю. МЕЛЬНИКОВ****ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СКЛАДАННЯ ЄДИНОГО ВСТУПНОГО ІСПИТУ З ІНОЗЕМНОЇ МОВИ ВИПУСКНИКАМИ-БАКАЛАВРАМИ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ ПРИ ВСТУПІ ДО МАГІСТРАТУРИ**

В роботі наведено інформацію щодо необхідності складання «Єдиного вступного іспиту» з іноземної (англійської) мови студентами, що отримали освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавра та бажають продовжити навчання для здобуття ступеня магістра. Визначено, що при роботі зі студентами випускного курсу бакалаврату доцільно, по-перше, визначити відсоток випускників, здача якими ЄВІ малоймовірна, а по-друге, активізувати роботу з такими випускниками для підвищення цієї ймовірності. Було поставлено задачу створення моделі для прогнозування результатів складання єдиного вступного іспиту з іноземної мови випускниками-бакалаврами закладу вищої освіти при вступі до магістратури. Запропоновано низку факторів, які впливають на бал ЄВІ, а саме: конкурсний бал при зарахуванні (показник базового рівня студента), рейтинг (оцінка) за підсумками першого року навчання (іспит з обов'язкового предмету «Іноземна мова»), рейтинг за підсумками вивчення дисципліни вільного вибору «Іноземна мова» на 2-3-му курсах (максимальний з усіх або «0», якщо студент не вибирав), рейтинг за підсумками додаткових занять «Іноземна мова» на 4-му курсі, середній рейтинг за передостанню сесію (показник «актуального» відношення студента до навчального процесу), факт наявності додаткових балів (показник зацікавленості студента іншими видами діяльності, крім навчальної), середній рейтинг диплому бакалавра (показник загального ставлення студента до навчального процесу). Наведено наявні дані щодо студентів двох років кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень Донбаської державної машинобудівної академії. Запропоновано метод штучних нейронних мереж з архітектурою двошарового персептрону з десятьма нейронами у кожному прихованому шарі, активаційною функцією сигмоїдою і алгоритмом зворотного поширення помилок для навчання мережі. Проведено розрахунки в середовищі Deductor Studio Lite, проаналізовано їхні результати. Зазначено, що запропонований підхід до прогнозування можна застосовувати при роботі зі студентами випускного курсу бакалаврату, для визначення відсотку випускників, здача якими ЄВІ малоймовірна, та активізації роботи з такими випускниками для підвищення цієї ймовірності.

**Ключові слова:** освітньо-кваліфікаційний рівень, єдиний вступний іспит, прогнозування, штучна нейронна мережа, персептрон, сигмоїда, навчання мережі.

**А. Ю. МЕЛЬНИКОВ****ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ СДАЧИ ЕДИНОГО ВСТУПИТЕЛЬНОГО ЭКЗАМЕНА ПО ИНОСТРАННОМУ ЯЗЫКУ ВЫПУСКНИКАМИ-БАКАЛАВРАМИ УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ В МАГИСТРАТУРУ**

В работе приведена информация о необходимости сдачи «Единого вступительного экзамена» по иностранному (английскому) языку студентами, которые получили образовательно-квалификационный уровень бакалавра и желают продолжить обучение для получения степени магистра. Определено, что при работе со студентами выпускного курса бакалаврата целесообразно, во-первых, определить процент выпускников, сдача которыми ЕВЭ маловероятна, а во-вторых, активизировать работу с такими выпускниками для повышения этой вероятности. Была поставлена задача создания модели для прогнозирования результатов сдачи единого вступительного экзамена по иностранному языку выпускниками-бакалаврами учреждения высшего образования при поступлении в магистратуру. Предложен ряд факторов, которые влияют на бал ЕВЭ, а именно: конкурсный балл при зачислении (показатель базового уровня студента), рейтинг (оценка) по итогам первого года обучения (экзамен по обязательному предмету «Иностранный язык»), рейтинг по итогам изучения дисциплины свободного выбора «Иностранный язык» на 2-3-м курсах (максимальный из всех или «0», если студент не выбирал), рейтинг по итогам дополнительных занятий «Иностранный язык» на 4-м курсе, средний рейтинг по предпоследнюю сессию (показатель «актуального» отношения студента к учебному процессу), факт наличия дополнительных баллов (показатель заинтересованности студента другими видами деятельности, кроме учебной), средний рейтинг диплома бакалавра (показатель общего отношения студента к учебному процессу). Приведены имеющиеся данные в отношении студентов двух лет кафедры интеллектуальных систем принятия решений Донбасской государственной машиностроительной академии. Предложен метод искусственных нейронных сетей с архитектурой двухслойного персептрона с десятью нейронами в каждом скрытом слое, активационной функцией сигмоидой и алгоритмом обратного распространения ошибки для обучения сети. Проведены расчеты в среде Deductor Studio Lite, проанализированы их результаты. Отмечено, что предложенный подход к прогнозированию можно применять при работе со студентами выпускного курса бакалаврата, для определения процента выпускников, сдача которыми ЕВЭ маловероятна, и активизации работы с такими выпускниками для повышения этой вероятности.

**Ключевые слова:** образовательно-квалификационный уровень, единственный вступительный экзамен, прогнозирование, искусственная нейронная сеть, персептрон, сигмоида, обучение сети.

**О. Yu. MELNYKOV****FORECASTING THE RESULTS OF THE SINGLE ENTRANCE EXAM IN A FOREIGN LANGUAGE BY BACHELORS OF THE INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION**

The paper provides information on the need to pass the “Unified entrance exam” in a foreign (English) language by students who have received a bachelor’s degree and wish to continue their studies to obtain a master’s degree. It is determined that when working with undergraduate students, it is advisable, firstly, to determine the percentage of graduates whose passing EVE is unlikely, and secondly, to intensify work with such graduates to increase this probability. The task was set to create a model for predicting the results of the unified entrance exam in a foreign language by bachelor’s graduates of higher education institutions upon entering the master’s program. A number of factors that affect the EVE score are proposed, namely: competitive score at enrollment (indicator of the student’s basic level), rating (assessment) based on the results of the first year of study (exam in the compulsory subject “Foreign Language”), choice “Foreign language” in the 2-3rd year (maximum of all or “0”, if the student did not choose), the rating of additional classes “Foreign language” in the 4th year, the average rating for the penultimate session (indicator “current” student’s attitude to the educational process), the fact of having additional points (an indicator of the student’s interest in other activities than learning), the average rating of a bachelor’s degree (an indicator of the general student’s attitude to the educational process). The available data concerning students of two years of the department of intelligent decision-making systems of the Donbas State Engineering Academy are given. A method of artificial neural networks with a two-layer perceptron architecture with ten neurons in each hidden layer, a sigmoid activation function, and an error backpropagation algorithm for

network training is proposed. Calculations were performed in the Deductor Studio Lite environment, their results were analyzed. It is noted that the proposed approach to forecasting can be applied when working with undergraduate students, to determine the percentage of graduates whose EVI is unlikely to pass, and to intensify work with such graduates to increase this probability.

**Keywords:** educational and qualification level, the only entrance exam, forecasting, artificial neural network, perceptron, sigmoid, network training.

**Вступ.** Згідно з «Правилами прийому» до будь-якого закладу вищої освіти в Україні, випускники бакалаврату, які бажають продовжити навчання для здобуття ступеня магістра, мають скласти «Єдиний вступний іспит». Це форма вступного випробування з іноземної (англійської, або німецької, або французької, або іспанської) мови для вступу на навчання для здобуття ступеня магістра на основі здобутого ступеня вищої освіти бакалавра, магістра (освітньо-кваліфікаційного рівня спеціаліста), яка передбачає використання організаційно-технологічних процесів здійснення зовнішнього незалежного оцінювання [1].

При роботі зі студентами випускного курсу бакалаврату доцільно, по-перше, визначити відсоток випускників, здача якими ЄВІ малоімовірна, а по-друге, активізувати роботу з такими випускниками, для підвищення цієї ймовірності. Визначення вірогідності здачі ЄВІ студентами неможливо без використання сучасних математичних та інтелектуальних методів (наприклад, методу штучних нейронних мереж) та інформаційних технологій.

Було поставлено задачу створення моделі для прогнозування результатів складання єдиного вступного іспиту з іноземної мови випускниками-бакалаврами закладу вищої освіти при вступі до магістратури.

**Постановка задачі та вхідні фактори.** Для створення будь-якої моделі прогнозування потрібно визначити вхідні фактори. Пропонуються наступні:

- конкурсний бал при зарахуванні – показник базового рівня студента;
- рейтинг (оцінка) за підсумками першого року навчання – іспит з обов'язкового предмету «Іноземна мова»;
- рейтинг за підсумками вивчення дисципліни вільного вибору «Іноземна мова» на 2–3-му курсах – максимальний з усіх або «0», якщо студент не вибирав;
- рейтинг за підсумками додаткових занять «Іноземна мова» на 4-му курсі;
- середній рейтинг за передостанню сесію – показник «актуального» відношення студента до навчального процесу;
- факт наявності додаткових балів – показник зацікавленості студента іншими видами діяльності, крім навчальної (наукова, культурно-масова, громадська робота);
- середній рейтинг диплому бакалавра – показник загального ставлення студента до навчального процесу.

Наведені фактори впливають на оцінку, яку студент отримає на єдиному вступному іспиті з іноземної (як правило, англійської) мови для вступу до магістратури.

**Рішення задачі методом штучних нейронних мереж.** Далі потрібно наповнити модель реальними

даними та здійснити розрахунки у спеціальному середовищі.

Математичне моделювання взагалі та штучні нейронні мережі нерідко використовують для прогнозування успішності студентів закладів вищої освіти [2–5].

Як модель нейронної мережі був обраний двошаровий перцептрон. Оцінку кращого числа нейронів в прихованому шарі проведемо, використовуючи відому нерівність [6–8]. Об'єм кожного прихованого шару візьмемо рівним 10 нейронам. Тип активаційної функції – сигмоїда. Навчання мережі проводилося методом зворотного поширення помилок. На рис. 1 представлено одну з можливих моделей для рішення поставленої задачі методом штучних нейронних мереж – двошаровий перцептрон із сімома входами.

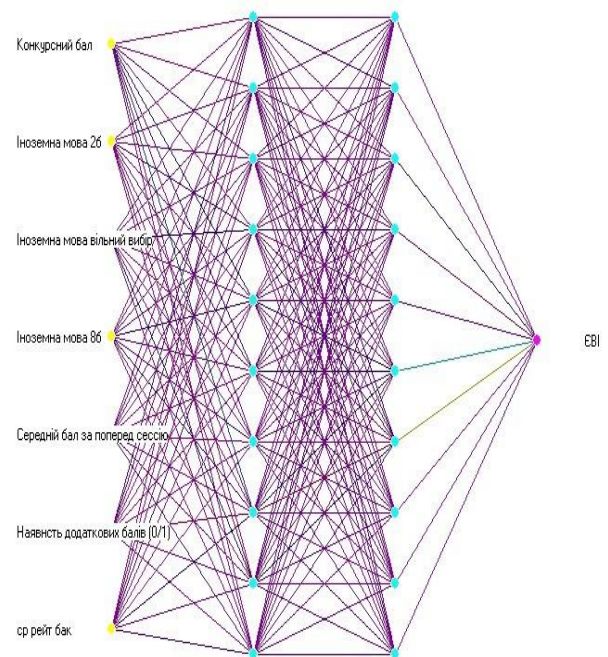


Рис. 1. Архітектура запропонованої нейронної мережі

Розрахунок був проведений в середовищі Deductor Studio [9].

На рис. 2 представлено наявні дані щодо студентів.

**Результати розрахунків.** Усі розрахунки проводилися за методикою, наведеною в [10–12]. Результати прогнозування балів, отриманих студентами за ЄВІ за допомогою моделі MLP 7x10x10x1, а також фактичні бали наведені в табл. 1. Як можна побачити, результати лише одного студента виходять за межі, що може бути спричинене невідомим суб'єктивним фактором.

| Група   | Рік випуску | ПІБ              | Конкурсний бал | Іноземна мова 26 | Іноземна мова вільний вибір | Іноземна мова 86 | Середній рейтинг за попередню сесію | Наявність додаткових балів (0/1) | ср рейтинг | ЄВІ |
|---------|-------------|------------------|----------------|------------------|-----------------------------|------------------|-------------------------------------|----------------------------------|------------|-----|
| СМ-16-1 | 2020        | Андросов В.О.    | 157,7          | 75               | 75                          | 100              | 95,33                               | 0                                | 91,56      | 117 |
| СМ-16-1 | 2020        | Баштинська А.О.  | 152,4          | 90               | 85                          | 100              | 94,33                               | 0                                | 90,77      | 112 |
| СМ-16-1 | 2020        | Бриньов Д.В.     | 169,4          | 55               | 90                          | 100              | 94,67                               | 0                                | 82,88      | 158 |
| СМ-16-1 | 2020        | Венцель В.О.     | 152,2          | 90               | 90                          | 97               | 0                                   | 0                                | 61,90      | 141 |
| СМ-16-1 | 2020        | Гончаров І.В.    | 132,5          | 55               | 55                          | 100              | 0                                   | 0                                | 58,95      | 0   |
| СМ-16-1 | 2020        | Губін Є.О.       | 150,4          | 75               | 90                          | 100              | 85,67                               | 1                                | 85,41      | 0   |
| СМ-16-1 | 2020        | Дідевич К.С.     | 156,8          | 90               | 90                          | 90               | 91,17                               | 0                                | 88,11      | 0   |
| СМ-16-1 | 2020        | Кадацький М.А.   | 159,9          | 75               | 0                           | 100              | 94                                  | 1                                | 93,92      | 147 |
| СМ-16-1 | 2020        | Кузнецова А.Р.   | 142            | 90               | 90                          | 90               | 0                                   | 0                                | 85,69      | 0   |
| СМ-16-1 | 2020        | Носуля Е.О.      | 152,4          | 75               | 65                          | 100              | 88,33                               | 0                                | 77,18      | 153 |
| СМ-16-1 | 2020        | Рябікіна Д.О.    | 147,9          | 90               | 90                          | 95               | 0                                   | 0                                | 82,36      | 141 |
| СМ-16-1 | 2020        | Сокольський О.С. | 178,4          | 75               | 90                          | 100              | 98,17                               | 1                                | 94,45      | 158 |
| СМ-16-1 | 2020        | Соляник В.О.     | 158,7          | 90               | 90                          | 100              | 95                                  | 0                                | 92,12      | 134 |
| СМ-15-1 | 2019        | Баган С.В.       | 182,47         | 100              | 0                           | 97               | 99,5                                | 1                                | 97,45      | 169 |
| СМ-15-1 | 2019        | Колесников Д.В.  | 159,4          | 77               | 0                           | 81               | 86,5                                | 0                                | 79,60      | 148 |
| СМ-15-1 | 2019        | Сігіда О.О.      | 155,46         | 75               | 95                          | 96               | 95                                  | 1                                | 90,29      | 0   |
| СМ-15-1 | 2019        | Стульнев О.Г.    | 170,54         | 75               | 90                          | 90               | 0                                   | 0                                | 74,18      | 122 |
| СМ-15-1 | 2019        | Тушева А.А.      | 167,51         | 90               | 0                           | 93               | 94,5                                | 1                                | 92,83      | 106 |
| СМ-15-1 | 2019        | Шпаченко Н.О.    | 138,88         | 90               | 0                           | 95               | 92,17                               | 0                                | 89,22      | 117 |

Рис. 2. Наявні дані щодо студентів

Таблиця 1 – Результати прогнозування

| ПІБ              | ЄВІ | ЄВІ_OUT     | ЄВІ_ERR  |
|------------------|-----|-------------|----------|
| Андросов В.О.    | 117 | 141,3501798 | 0,020760 |
| Баштинська А.О.  | 112 | 111,9955868 | 0,000000 |
| Бриньов Д.В.     | 158 | 157,9921731 | 0,000000 |
| Венцель В.О.     | 141 | 141,0072885 | 0,000000 |
| Гончаров І.В.    | 0   | 0,334828625 | 0,000004 |
| Губін Є.О.       | 0   | 0,152254285 | 0,000001 |
| Дідевич К.С.     | 0   | 0,301027585 | 0,000003 |
| Кадацький М.А.   | 147 | 151,4217553 | 0,000685 |
| Кузнецова А.Р.   | 0   | 0,749577958 | 0,000020 |
| Носуля Е.О.      | 153 | 153,0133341 | 0,000000 |
| Рябікіна Д.О.    | 141 | 140,9696281 | 0,000000 |
| Сокольський О.С. | 158 | 157,9993941 | 0,000000 |
| Соляник В.О.     | 134 | 134,0146453 | 0,000000 |
| Баган С.В.       | 169 | 168,679197  | 0,000004 |
| Колесников Д.В.  | 148 | 147,9956348 | 0,000000 |
| Сігіда О.О.      | 0   | 0,057951982 | 0,000000 |
| Стульнев О.Г.    | 122 | 122,000689  | 0,000000 |
| Тушева А.А.      | 106 | 106,003495  | 0,000000 |
| Шпаченко Н.О.    | 117 | 116,9979045 | 0,000000 |

**Висновки.** Використання апарату штучних нейронних мереж при роботі зі студентами випускного курсу бакалаврату дозволить, по-перше, визначити відсоток випускників, здача якими єдиного вступного іспиту з іноземної мови мало ймовірна, а по-друге, активізувати роботу з такими випускниками, для підвищення цієї ймовірності.

#### Список літератури

1. Наказ Міністерства освіти і науки України від 15 жовтня 2020 р. № 1274 «Про затвердження умов прийому на навчання для здобуття вищої освіти в 2021 році». URL: <https://mon.gov.ua/ua/npa/pro-zatverdzhennya-umov-prijomu-na->

navchannya-dlya-zdobuttya-vishoyi-osviti-v-2021-roci (дата звернення: 16.03.2021).

2. Махмутова Л. Р. Факторы влияния на успеваемость студентов в вузе. *Организация работы с молодежью*. 2018. № 1. URL: <http://www.es.rae.ru/ovv/282-1208> (дата обращения: 16.03.2021).
3. Блохина М. В., Вахитов Ш. М., Сытник В. В. Анализ и оценка академической успеваемости студентов вузов – одна из функций педагогического менеджмента. *Успехи современного естествознания*. 2008. № 2. С. 52–54.
4. Шмарихина Е. С. Исследование факторов успеваемости обучающихся. *Вестник НГТУ*. 2018. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-faktorov-uspevaemosti-obuchayuschisya> (дата обращения: 16.04.2020).
5. Прошкина Е. Н., Балашова И. Ю. Анализ и прогнозирование успеваемости студентов на основе радиальной базисной нейронной сети. *Технические науки: традиции и инновации: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Казань, март 2018 г.)*. Казань: Молодой ученый, 2018. С. 24–28. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/287/13683/> (дата обращения: 16.03.2021; 16.04.2020).
6. Каллан Р. *Основные концепции нейронных сетей*. Москва: Вильямс, 2001. 288 с.
7. Хайкин С. *Нейронные сети: полный курс, 2-е издание* / Пер. с англ. Москва: Вильямс, 2006. 1104 с.
8. Ковалевский С. В., Гитис В. Б. Создание и применение нейронных сетей для решения прикладных задач: Учебно-методическое пособие для студентов специальности «Интеллектуальные системы принятия решений». Краматорск: ДГМА, 2008. 75 с.
9. *BaseGroup Labs: официальный сайт*. URL: <https://basegroup.ru/community/articles/intro> (дата обращения: 16.03.2021).
10. Мельников А. Ю., Шевченко Н. Ю. Моделирование влияния НИРС на результаты итоговой аттестации студентов. *Информатика, управления та штучний інтелект. Тези сьомої міжнародної науково-технічної конференції*. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. С. 52.
11. Мельников О. Ю., Шевченко Н. Ю. Застосування нейронних мереж для прогнозування результатів підсумкової атестації студентів закладу вищої освіти в залежності від ефективності їх науково-дослідної роботи. *Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2020: збірник наукових праць XIX Міжнародної наукової конференції «Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2020»* / за заг. ред. С.В.Ковалевського. Краматорск: ДГМА, 2020. С. 111–115.
12. Melnykov A.Yu., Shevchenko N.Yu., Isakova Ye.P., Bobkova E.Yu. *Modeling the impact of University students research work on the results of their final certification* J. Phys.: Conf. Ser., 2020, Vol.

1691, 012187. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012187> (дата обращения: 16.03.2021).

## References (transliterated)

1. Nakaz Ministerstva osvity i nauky Ukrainy vid 15 zhovtnya 2020 r. # 1274 «Pro zatverdzhennya umov pryjomu na navchannya dlya zdobuttya vyshchoyi osvity v 2021 roci». [Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine of October 15, 2020 № 1274 "On approval of the conditions of admission to higher education in 2021." Available at: <https://mon.gov.ua/ua/npa/pro-zatverdzhennya-umov-prijomu-na-navchannya-dlya-zdobuttya-vishchoyi-osvity-v-2021-roci> (accessed 16.03.2021).
2. Makhmutova L. R. Faktory vliyaniya na uspevaemost' studentov v vuzе [Factors influencing student performance at the university]. *Organization of work with youth*. 2018. № 1. URL: <http://www.es.rae.ru/ovv/282-1208> (accessed 16.03.2021).
3. Blokhina M. V., Vakhitov Sh. M., Sytnik V. V. Analiz i otsenka akademicheskoy uspevaemosti studentov vuzov – odna iz funktsiy pedagogicheskogo menedzhmenta [Analysis and assessment of the academic performance of university students is one of the functions of pedagogical management]. *Advances in modern natural science*. 2008. № 2. PP. 52–54.
4. Shmarikhina E. S. Issledovanie faktorov uspevaemosti obuchayushchikhsya [Study of the factors of student achievement]. *NSUE Bulletin*. 2018. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-faktorov-uspevaemosti-obuchayushchikhsya> (accessed 16.04.2020).
5. Proshkina E. N., Balashova I. Yu. Analiz i prognozirovanie uspevaemosti studentov na osnove radial'noy bazisnoy neyronnoy seti [Analysis and prediction of student performance based on a radial basic neural network]. *Technical sciences: traditions and innovations: materials of the III Intern. scientific. conf. (Kazan, March 2018)*. Kazan: Young Scientist, 2018, pp. 24–28. URL: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/287/13683/> (accessed 16.03.2021: 16.04.2020).
6. Kallan R. *Osnovnye kontseptsii neyronnykh setey* [Basic concepts of neural networks]. Moscow: Williams Publ., 2001. 288 p.
7. Khaykin S. *Neyronnye seti: polnyy kurs, 2-e izdanie* [Neural Networks: Complete Course, 2nd Edition] / Translation from English. Moscow: Williams Publ., 2006. 1104 p.
8. Kovalevskiy S. V., Gitis V. B. Sozdanie i primeneniye neyronnykh setey dlya resheniya prikladnykh zadach: Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov spetsial'nosti «Intel'kual'nye sistemy prinyatiya resheniy» [Creation and application of neural networks for solving applied problems: Study guide for students of the specialty "Intelligent decision-making systems"]. Kramatorsk: DSEA, 2008. 75 p.
9. *BaseGroup Labs: ofitsial'nyy sayt* [BaseGroup Labs: official site]. Available at: <https://basegroup.ru/community/articles/intro> (accessed 16.03.2021).
10. Mel'nikov A. Yu., Shevchenko N. Yu. Modelirovanie vliyaniya NIRS na rezul'taty itogovoy attestatsii studentov [Modeling the influence of research work on the results of the final certification of students]. *Informatics, management and artificial intelligence. Abstracts of the seventh international scientific and technical conference*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, p. 52.
11. Mel'ny'kov O. Yu., Shevchenko N. Yu. Zastosuvannya nejronny'x merezh dlya prognozuvannya rezul'tativ pidsumkovoyi atestatsiyi studentiv zakladu vyshchoyi osvity v zalezhnosti vid efekty'vnosti yix naukovy-doslidnoyi roboty [The use of neural networks to predict the results of the final certification of students of higher education depending on the effectiveness of their research work]. *Neural network technologies and their application NMTiZ-2020: collection of scientific works of the XIX International scientific conference "Neural network technologies and their application NMTiZ-2020" / for general. ed. SV Kovalevsky*. Kramatorsk: DSEA, 2020, pp. 111–115.
12. Melnykov A. Yu., Shevchenko N. Yu., Isakova Ye. P., Bobkova E. Yu. *Modeling the impact of University students research work on the results of their final certification* J. Phys.: Conf. Ser., 2020, Vol. 1691, 012187. Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1691/1/012187> (accessed 16.03.2021).

Надійшла (received) 26.03.2021

## Відомості про автора / Сведения об авторе / About the Author

**Мельников Олександр Юрійович** – кандидат технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, доцент кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень; м. Краматорськ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>; e-mail: [alexandr@melnikov.in.ua](mailto:alexandr@melnikov.in.ua)

**Мельников Александр Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, доцент кафедры интеллектуальных систем принятия решений; г. Краматорск, Украина; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>; e-mail: [alexandr@melnikov.in.ua](mailto:alexandr@melnikov.in.ua)

**Melnykov Oleksandr Yuriyovich** – candidate of technical sciences, docent, Donbas State Engineering Academy, Associate Professor of the Department of Intelligent Decision Making Systems; Kramatorsk, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2701-8051>; e-mail: [alexandr@melnikov.in.ua](mailto:alexandr@melnikov.in.ua)

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І ТЕОРІЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.....                                                                                                                                                                          | 3   |
| <b>Bieliaiev O. I., Liutenko I. V., Stratienco N. K.</b> Algorithmic support for multicriteria assessment of retail information systems.....                                                                             | 3   |
| <b>Мельников А. Ю.</b> Система поддержки принятия решений для определения оптимального состава команды исполнителей на примере спортивного варианта игры «Что? Где? Когда?» .....                                        | 10  |
| <b>Іващенко Д. С., Куценко О. С.</b> Огляд і аналіз методів моделювання процесу розвитку епідемії .....                                                                                                                  | 16  |
| <b>Павлов О. А., Вознюк О. В., Жданова О. Г.</b> Задача дробово-лінійного програмування в умовах невизначеності.....                                                                                                     | 20  |
| УПРАВЛІННЯ В ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....                                                                                                                                                                                     | 29  |
| <b>Александров Е. Е., Александрова Т. Е., Григорьев А. Л., Моргунов Я. Ю.</b> О влиянии колебаний транспортируемой жидкости на область устойчивости замкнутой системы автоматического управления курсом автомобиля ..... | 29  |
| <b>Товажнянский В. И.</b> Алгоритмическое и программное обеспечение оптимального управления прерывистым тепловым режимом зданий .....                                                                                    | 42  |
| УПРАВЛІННЯ В ОРГАНІЗАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....                                                                                                                                                                                | 47  |
| <b>Прончаков Ю. Л.</b> Моделювання розташування віртуального розподіленого виробництва в умовах обмежених можливостей розвитку підприємства.....                                                                         | 47  |
| МАТЕМАТИЧНЕ І КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ .....                                                                                                                                                                              | 52  |
| <b>Orehov S. V., Malyhon H. V.</b> Modelling semantic kernel of web resource .....                                                                                                                                       | 52  |
| <b>Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В., Бубнов А. І.</b> Моделювання теплових процесів парогенератора АЕС для інформаційної технології оптимізації управління.....                                               | 56  |
| <b>Мазманишвили А. С., Решетняк Н. Г.</b> Продольная ловушка электронного пучка в потенциальной яме магнитного соленоидального поля.....                                                                                 | 62  |
| <b>Маринич І. А., Сердюк О. Ю.</b> Моделювання системи автоматичного регулювання режиму натягу в чорновій групі клітей неперервного сортового стану.....                                                                 | 67  |
| <b>Зайцева Т. А., Шмельов І. І.</b> Сучасні підходи до розв'язання контактної задачі про втиснення двозв'язного штампу в пружний півпростір .....                                                                        | 74  |
| ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ .....                                                                                                                                                                                            | 80  |
| <b>Павленко Є. П., Бутенко В. М., Губін В. О., Лубенець С. В.</b> Дослідження методів класифікації типів даних при розробці програмного забезпечення комп'ютерної інженерії.....                                         | 80  |
| <b>Петрасова С. В., Хайрова Н. Ф., Колесник А. С.</b> Технологія визначення інформаційного порядку денного в потоках новинних даних .....                                                                                | 86  |
| <b>Гамзаєв Р. О., Ткачук М. В.</b> Застосування методів і технологій рекомендаційних систем для конфігурування динамічних лінійок програмних продуктів .....                                                             | 91  |
| <b>Yamkovyi K. S.</b> Development and comparative analysis of semi-supervised learning algorithms on a small amount of labeled data .....                                                                                | 98  |
| <b>Мельников О. Ю.</b> Прогнозування результатів складання єдиного вступного іспиту з іноземної мови випускниками-бакалаврами закладу вищої освіти при вступі до магістратури.....                                       | 104 |

## CONTENT

|                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| SYSTEM ANALYSIS AND DECISION-MAKING THEORY .....                                                                                                                                                                                        | 3   |
| <b>Bieliaiev O. I., Liutenko I. V., Stratienco N. K.</b> Algorithmic support for multicriteria assessment of retail information systems .....                                                                                           | 3   |
| <b>Melnykov O. Yu.</b> Decision support system for determining the optimal composition of the team of performers on the example of the sports version of the game "What? Where? When?" .....                                            | 10  |
| <b>Ivashchenko D. S., Kutsenko O. S.</b> Overview and analysis of methods for modeling the epidemic development process.....                                                                                                            | 16  |
| <b>Pavlov A. A., Vozniuk O. V., Zhdanova O. G.</b> The linear-fractional programming problem under uncertainty conditions .....                                                                                                         | 20  |
| CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....                                                                                                                                                                                                       | 29  |
| <b>Aleksandrov Y. Y., Aleksandrova T. Y., Grigoriev A. L., Morhun Y. Y.</b> About the influence of vibrations of the conveyed liquid on the area of stability of a closed system automatic vehicle course control .....                 | 29  |
| <b>Tovazhnyanskyy V. I.</b> Algorithms and software of buildings intermittent thermal conditions optimal control .....                                                                                                                  | 42  |
| MANAGEMENT IN ORGANIZATIONAL SYSTEMS.....                                                                                                                                                                                               | 47  |
| <b>Pronchakov Yu. L.</b> Simulation of virtual distributed production location under conditions of limited possibilities of enterprise development.....                                                                                 | 47  |
| MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING .....                                                                                                                                                                                                | 52  |
| <b>Orehov S. V., Malyhon H. V.</b> Modelling semantic kernel of web resource .....                                                                                                                                                      | 52  |
| <b>Nikulina O. M., Severyn V. P., Kotsuba N. V., Bubnov A. I.</b> Simulation of thermal processes of a NPP steam generator for information technology optimized control.....                                                            | 56  |
| <b>Mazmanishvili O. S., Reshetnyak M. G.</b> Longitudinal trap of electron beam in potential pit magnetic solenoidal field .....                                                                                                        | 62  |
| <b>Marynych I. A., Serdiuk O. Y.</b> Modeling of a system for automatic regulation of the tension mode in the roughing group of stands of a continuous section mill .....                                                               | 67  |
| <b>Zaytseva T. A., Shmelov I. I.</b> Modern approaches to solving the contact problem of pressing a double-stamp stamp into an elastic half-space .....                                                                                 | 74  |
| INFORMATION TECHNOLOGY .....                                                                                                                                                                                                            | 80  |
| <b>Pavlenko Y. P., Butenko V. M., Gubin V. O., Lubenets S. V.</b> Research of data type classification methods when developing computer engineering software Using cloud platforms to build distributed learning management systems ... | 80  |
| <b>Petrasova S. V., Khairova N. F., Kolesnyk A. S.</b> Technology for identification of information agenda in news data stream .....                                                                                                    | 86  |
| <b>Gamzayev R. O., Tkachuk M. V.</b> Using methods and technologies of recommendation systems for dynamic software product lines configuration.....                                                                                     | 91  |
| <b>Yamkovyi K. S.</b> Development and comparative analysis of semi-supervised learning algorithms on a small amount of labeled data.....                                                                                                | 98  |
| <b>Melnykov O. Yu.</b> Forecasting the results of the single entrance exam in a foreign language by bachelors of the institution of higher education.....                                                                               | 104 |

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ».  
СЕРІЯ: СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ, УПРАВЛІННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ**

*Збірник наукових праць*

*№ 1 (5) 2021*

Наукові редактори: М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна  
О. С. Куценко, д-р техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна  
Технічний редактор: М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор, НТУ «ХПІ», Україна

Відповідальний за випуск М. І. Безменов, канд. техн. наук, професор

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ:** 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ».  
Кафедра системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій  
Тел.: (057) 707-61-03, (057) 707-66-54; e-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

Підп. до друку 05.07.2021 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,5. Облік.-вид. арк. 10.  
Тираж 100 пр. Зам. № 49. Ціна договірна.

---

Друкарня «ФОП Пісня О. В.»

Свідоцтво про державну реєстрацію ВО2 № 248750 від 13.09.2007 р.  
61002, Харків, вул. Гіршмана, 16а, кв. 21, тел. (057) 764-20-28