

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

СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 4

2020

ЗАСНОВАНО У ЛИПНІ 2001 р.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор

М.З. ЗГУРОВСЬКИЙ, акад. НАН України

Заступник головного редактора

Н.Д. ПАНКРАТОВА, чл.-кор. НАН України

Члени редколегії:

П.І. АНДОН, акад. НАН України

А.В. АНІСІМОВ, чл.-кор. НАН України

Г.-В. ВЕБЕР, проф., Турція

О.Д. ГВІШАНІ, акад. РАН, Росія

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

В.М. КУНЦЕВИЧ, акад. НАН України

О.А. ПАВЛОВ, проф., д.т.н., Україна

Л. САКАЛАУСКАС, проф., Литва

А.М. САЛЕМ, проф., Єгипет

І.В. СЕРГІЄНКО, акад. НАН України

Х.-М. ТЕОДОРЕСКУ, акад. Румунської
Академії

Е.О. ФАЙНБЕРГ, проф., США

Я.С. ЯЦКІВ, акад. НАН України

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

03056, м. Київ,

просп. Перемоги, 37, корп. 35,

ННК «ІПСА» КПІ ім. Ігоря Сікорського

Тел.: 204-81-44; факс: 204-81-44

E-mail: journal.iasa@gmail.com

http://journal.iasa.kpi.ua

У номері:

• **Проблеми прийняття рішень та управління в економічних, технічних, екологічних і соціальних системах**

• **Теоретичні та прикладні проблеми інтелектуальних систем підтримання прийняття рішень**

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

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

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

• **Нові методи в системному аналізі, інформатиці та теорії прийняття рішень**

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

SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

№ 4

2020

IT IS FOUNDED IN JULY 2001

EDITORIAL BOARD:

The editor – in – chief

M.Z. ZGUROVSKY, Academician of
NASU

Deputy editor – in – chief

N.D. PANKRATOVA, Correspondent
member of NASU

Associate editors:

F.I. ANDON, Academician of
NASU

A.V. ANISIMOV, Correspondent
member of NASU

E.A. FEINBERG, Prof., USA

A.D. GVISHIANI, Academician of RAS,

P.O. KASYANOV, Prof., Ukraine

V.M. KUNTHEVICH, Academician of NASU

A.A. PAVLOV, Prof., Ukraine

L. SAKALAUSKAS, Prof., Lithuania

A.M. SALEM, Prof., Egypt

I.V. SERGIENKO, Academician of NASU

H.-N. TEODORESCU, Academician of
Romanian Academy

G.-W. WEBER, Prof., Turkey

Ya.S. YATSKIV, Academician of NASU

THE EDITION ADDRESS:

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

In the issue:

• **Decision making and control in economic, technical, ecological and social systems**

• **Theoretical and applied problems of intellectual systems for decision making support**

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

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

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

• **New methods in system analysis, computer science and theory of decision making**

Шановні читачі!

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

«СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ».

Журнал публікує праці теоретичного та прикладного характеру в широкому спектрі проблем, що стосуються системних досліджень та інформаційних технологій.

Провідні тематичні розділи журналу:

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

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

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

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

Статті публікуються українською, російською та англійською мовами.

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

Завідувачка редакції **С.М. Шевченко**

Редакторка **Р.М. Шульженко**

Молодша редакторка **Л.О. Тарин**

Комп'ютерна верстка, дизайн **А.А. Патіюхи**

Свідоцтво про реєстрацію КВ № 23234–13074 ПР від 22.03.2018 р.

Підписано до друку 29.12.2020. Формат 70x108 1/16. Папір офс. Гарнітура Times.

Спосіб друку – цифровий. Ум. друк. арк. 14,411. Обл.-вид. арк. 28,56. Наклад 124 пр. Зам. № 11/04

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Свідоцтво про державну реєстрацію: ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056.

ФОП Пилипенко Н.М., вул. Мічуріна, б. 2/7, м. Київ, 01014.

Виписка з Єдиного державного реєстру № 2 070 000 0000 0214697 від 17.05.2019 р.,

тел.: (044) 361 78 68.

Dear Readers!

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

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

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

The main thematic sections of the Journal are the following:

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

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

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

СИСТЕМНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

4 • 2020

ЗМІСТ

ПРОБЛЕМИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА УПРАВЛІННЯ В ЕКОНОМІЧНИХ, ТЕХНІЧНИХ, ЕКОЛОГІЧНИХ І СОЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ	
<i>Mokiy M.S., Gureev P.M.</i> The management of innovative processes in organizations. System-transdisciplinary approach	7
<i>Савастьянов В.В.</i> Розроблення інструментарію для аналізу текстів публічних та спеціалізованих джерел у завданнях передбачення та системного аналізу	15
ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ ПІДТРИМАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	
<i>Tyushnyakov V.N., Tkachenko Y.G.</i> Using cognitive maps to study issues concerning the improvement of the quality of life of population in the frame of inter-regional disparities	29
<i>Ткаченко Д.А., Круш І.В., Михалько В.Г., Петренко А.І.</i> Машинне навчання під час діагностування і моніторингу сонного апное	43
ПРОБЛЕМНО І ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНІ КОМП'ЮТЕРНІ СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖІ	
<i>Жураковська О.С., Кочубей І.Ю.</i> Використання медіани Кемені в алгоритмі формування рекомендацій	59
<i>Trofutova I., Menailov I., Chernysh S., Yepifanov S., Khustochka O., Ugryumov M., Myenyaylov A., Chumachenko D.</i> Methodology of non-linear robust estimation for the solutions synthesis of inverse and direct multidisciplinary problems in engineering dimensional chains calculation based on discrete analog data	70
МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ, ОПТИМАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ І ТЕОРІЯ ІГОР	
<i>Наконечний О.Г., Кудін Г.І., Зінько П.М., Зінько Т.П.</i> Наближені гарантовані оцінки матриць у задачах лінійної регресії з малим параметром	89
<i>Бейко І.В., Фуртель О.В., Снівак Ю.В.</i> Узагальнені розв'язки задач оптимального керування	104
<i>Конахович Г.Ф., Козлюк І.О., Коваленко Ю.Б.</i> Оптимізація показників ефективності організаційної системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден	115
МАТЕМАТИЧНІ МЕТОДИ, МОДЕЛІ, ПРОБЛЕМИ І ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ	
<i>Безпалько О.С.</i> Взаємодія моделей з реальними об'єктами як спосіб удосконалення доповненої реальності	132
НОВІ МЕТОДИ В СИСТЕМНОМУ АНАЛІЗІ, ІНФОРМАТИЦІ ТА ТЕОРІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ	
<i>Makarenko A.S.</i> Cellular automata models with complex valued transition functions	141
Відомості про авторів	148
Зміст журналу за 2020 р.	150
Автори статей за 2020 р.	152

SYSTEM RESEARCH AND INFORMATION TECHNOLOGIES

4 • 2020

CONTENT

DECISION MAKING AND CONTROL IN ECONOMIC, TECHNICAL, ECOLOGICAL AND SOCIAL SYSTEMS

- Mokiy M.S., Gureev P.M.* The management of innovative processes in organizations.
System-transdisciplinary approach 7
- Savastiyarov V.V.* Development of textual analytics tools for analysis of public
and specialized sources in the tasks of foresight and system analysis 15

THEORETICAL AND APPLIED PROBLEMS OF INTELLECTUAL SYSTEMS FOR DECISION MAKING SUPPORT

- Tyushnyakov V.N., Tkachenko Y.G.* Using cognitive maps to study issues concern-
ing the improvement of the quality of life of population in the frame of inter-
regional disparities 29
- Tkachenko D.A., Krush I.V., Mykhalko V.G., Petrenko A.I.* Machine learning for
diagnosis and monitoring of sleep apnea 43

PROBLEM- AND FUNCTION-ORIENTED COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS

- Zhurakovska O.S., Kochubey I.Yu.* Use of Kemeny median in the algorithm of
forming recommendation 59
- Trofymova I., Menailov I., Chernysh S., Yepifanov S., Khustochka O., Ugryumov
M., Myenyaylov A., Chumachenko D.* Methodology of non-linear robust esti-
mation for the solutions synthesis of inverse and direct multidisciplinary prob-
lems in engineering dimensional chains calculation based on discrete analog
data 70

METHODS OF OPTIMIZATION, OPTIMUM CONTROL AND THEORY OF GAMES

- Nakonechnyi O.G., Kudin G.I., Zinko P.M., Zinko T.P.* Approximate guaranteed
estimates for matrices in linear regression problems with a small parameter 89
- Beyko I.V., Furtel O.V., Spivak Ju.V.* Generalized solutions of optimal control
problems 104
- Konakhovych G.F., Kozlyuk I.O., Kovalenko Y.B.* Optimization of efficiency indica-
tors of organization systems of technical operation and updating of aircraft ra-
dio-electronic systems 115

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

- Bezpalko O.S.* Interaction of models with real objects as a way to improve aug-
mented reality 132

NEW METHODS IN SYSTEM ANALYSIS, COMPUTER SCIENCE AND THEORY OF DECISION MAKING

- Makarenko A.S.* Cellular automata models with complex valued transition func-
tions 141
- Information about the authors 148

THE MANAGEMENT OF INNOVATIVE PROCESSES IN ORGANIZATIONS. SYSTEM-TRANSDISCIPLINARY APPROACH

M.S. MOKIY, P.M. GUREEV

Abstract. The article justifies the application of a system-interdisciplinary approach to solving problems of managing innovative processes, especially in the field of planning, organizing and controlling innovative events. Such problems are the justification of innovative events and the selection of their dates. The article describes the principles of innovation classification based on the interdisciplinary model of the information unit of order. The development of the system can be represented as a multiplex of waves or as a set of *M*-waves. It is shown that the system at each stage of its development is predisposed to changes in a certain trait. The article describes the methodological principles for justifying the dates for planning, conducting and monitoring the implementation of measures in the innovation process.

Keywords: innovation management, system-interdisciplinary approach, innovation planning, multiplex waves (*M*-waves), normative parameters of the innovation process.

INTRODUCTION

The problem of innovative development of the economy is one of the most discussed in the last quarter century. A large number of works are devoted to this issue. An international community of scientists has been formed to work on innovations and the formation of competencies in the context of the economic development of GLOBELICS [13], where problems and solutions to innovative processes are discussed at annual international conferences. The problem of innovative development is of such importance that the issues of managing the innovation process are reflected in international and national regulatory documents. So, the European Organization for Economic Co-operation and Development, OECD adopted guidelines for managing the innovation process in 2005 [15]. In Russia, in April 2014, the State Program “Economic Development and Innovation Economy” was adopted [2]. Nevertheless, to date, a number of problems that reduce the effectiveness of innovative management remain unresolved. We completely agree with the opinion of Economist magazine: “... innovation has come out of the shadow to become a new industrial religion worshiped by public figures, investors and businessmen ... But despite being the cause of about 50% of the total economic growth and the subject of countless government research, innovation remains, in essence, a form of black magic” [14].

The implementation of any innovation requires the attraction of financial resources, specialists and time. According to a PDMA (Product Development and Management Association) study, “only one in nine concepts becomes commercially successful. Approximately 40% of all innovations fail at launch, or even at distant approaches to the market – at the stage of testing or creating prototypes. Almost half of the company resources allocated to development of new products are spent on unsuccessful projects” [9]. Given that the volume of investment in innovative development of only 1000 of the most developed companies in the world is annually about \$425 billion, the losses from failed innovations are very substantial.

Undoubtedly, the effectiveness of the innovation process depends, on the essence, the quality of the innovation itself (ideas, designs, schemes, etc.), which are to be implemented. However, one cannot fail to admit that there are situations when excellent innovations (ideas, designs, schemes, etc.) are poorly implemented or not implemented at all in business practice. There are many explanations for this, but the efficiency of managing any process depends on how justified are the action plans and the calendar dates of their implementation. Most often, if the essence, the direction of the changes necessary for the development of the organization is obvious, then there are problems with the determination of the calendar dates for conducting innovative activities.

For most natural objects or technological processes, the temporal patterns of development in the form of stages, periods and cycles are obvious. The nature and timing of the changes are predetermined by natural laws. For example, an experienced gardener knows at what stage of tree development and at what time of year the trees can be pruned, a mechanical engineer knows when to make changes to the machine, etc.

In socio-economic objects, such as organizations, these patterns are often less conspicuous. Many works indicate the presence of stages, periods, cycles in the development of enterprises and organizations [3], [6], [12]. In works devoted to the study of the temporal characteristics of development, various temporal characteristics of the development of organizations such as “youth”, “maturity”, “old age” [1], etc. are distinguished. However, at present, there is no unified theory or concept capable of linking steps (stages, phasing, periodicity) and polycyclicality in the development of economic and business systems and the nature of innovation. And the biggest problem is that no objective criteria are proposed for determining the calendar dates for innovative events. In other words, no criteria are proposed for when the “adolescence” or “maturity” of an organization ends. This leads to the fact that, in practice, management decisions in the field of the innovation process are made based on the experience and intuition of managers, and in small and medium-sized businesses, according to the National Federation of Independent Business and Wells Fargo (USA), “family consulting” prevails [5]. The consequence of the above facts is that a 50% success rate of innovation is considered a very good result.

Thus, if the innovation process is understood as the whole cycle of transformation of scientific knowledge (scientific ideas, discoveries and inventions) into a material result, then the main problems of the implementation of the planning function in the management of the innovation process are the substantiation of the type of innovations and the determination of the calendar dates for their implementation.

METHODS

To solve these problems, it is proposed to use the methodological apparatus of the system-transdisciplinary approach. According to the concept of the system-transdisciplinary approach, an idealized image called “system” is an order that determines the unity of elements and the integrity of the object. That is, an essential property of the system is order, a certain form of organization. The existence and development of the “system” object is a manifestation of its potential in space and time. Such a manifestation requires the implementation of the main function of the system – the transformation of matter and energy. The implementation of functions is possible only if there is a device in the system, a mechanism consisting of the corresponding elements and connections between them. This mechanism is called *system structure*. The task of the structure of the system is to ensure the transformation of matter and energy. For this, the system structure must have mechanisms for evaluating parameters:

- incoming matter and energy;
- the process of their transformation;
- the result of this process.

The discrepancy between the actual parameters and the given ones is assessed as dysfunction. Therefore, the system must have a mechanism for neutralizing dysfunctions.

The development of a system in time is a consistent change in its state. Changes in the operation of any objects can be caused either by the internal laws of the development of the object, or caused by a change in external conditions. Naturally, at each stage of development, changes in the structure and functions of the system are assumed. If such changes do not occur, then the system collapses. But in any case, these changes must correspond to the signs of the development period, otherwise these changes will not bring success.

The change in the state of the system in time is a strict sequence of time intervals (stages, periods and cycles), each of which characterizes the system’s predisposition only to certain changes. These patterns are objective, have a transdisciplinary (universal) character and are described by a time (temporal) unit of order [8] and it can be represented as a multiplex wave (fig. 1), the model of which was proposed by Vladimir Mokiya [7].

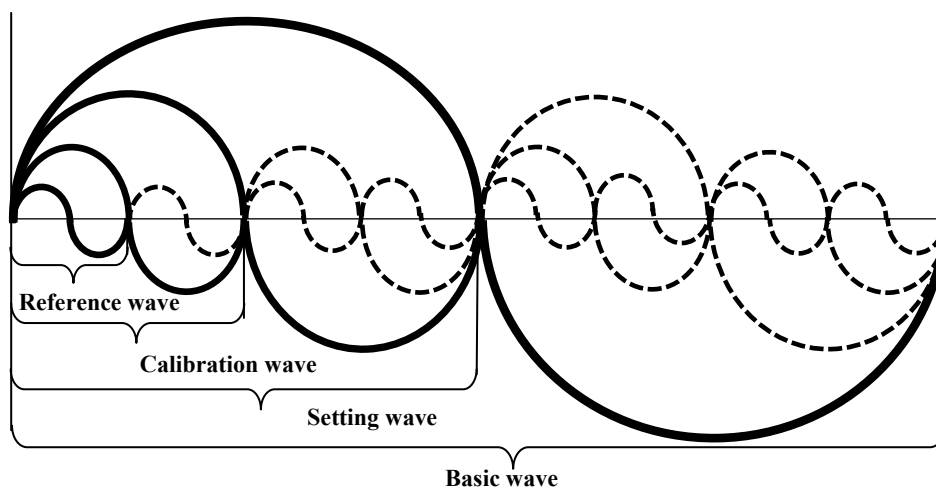


Fig. 1. Model of the development wave multiplex

“Multiplex (from lat. Multiplex – complex, multiple) is a natural complex of waves, logically fragmenting the development process, plays the role of a harmonious structure of the development of the object [7]. Waves of a multiplex (*M*-wave) indicate not the amplitude of the oscillation, but the calendar duration of the periods. For real objects, the temporal features are formed by duration.

Each wave is characterized by a certain set of quantitative and qualitative changes. In accordance with the multiplex model, the duration of each wave can be calculated by the formula:

$$M_n = 2^n a,$$

where a is the duration of the reference wave; n — takes the value 1,2,3.

RESULTS

Innovation as a feature of development of objects considered as systems

Thus, from the standpoint of the system-transdisciplinary approach, the concept of “innovative management” can be interpreted as purposeful (control) influences aimed at changing the structural and functional properties of an object.

In this case, we do not consider the characteristics of the innovation itself, ideas, etc. In other words, it doesn’t matter “good” or “bad” innovation. It is important for us to emphasize that the nature of structural and functional changes depends on the degree of radicalism of innovation. Therefore, at the first stage of classification of innovations, we distinguish:

- modifying innovations — as a rule, they require changes in the functions of system elements;
- radical innovations – cause qualitative changes in the main function of the economic system, and hence fundamental changes in the structure of the enterprise.

Applying the consistent differentiation of innovations, their system-transdisciplinary classification was developed. The basis of such a classification is Vladimir Mokiý’s order information unit model [8], on the basis of which the division of innovations into quantitative and qualitative and the classification of the Slovak researcher F. Valent [16] is assumed.

According to the developed classification, the radicalism of changes as a result of innovation gradually increases from the first to the eighth order (see table).

It should be noted here that if the implementation of innovations of lower orders (quantitative changes) can be relatively easy to ensure within the framework of the usual management system, then innovations of higher orders require either changes or the creation of a system of strategic and tactical management. The use and adaptation of this classification for the needs of a particular organization makes it possible to correctly determine the level (order) of required innovations.

However, determining the level of innovation (such as the radical nature of change) is a necessary, but not sufficient condition for managing innovation. For its successful implementation, it is imperative to determine the timing of the events.

System-transdisciplinary temporal features of the innovation process

To determine the timing of innovations, it is proposed to use the regularities that determine the temporal development of the system. Of course, for real objects,

these features are determined by the laws of development of this object. Obviously, it is different for organizations of different industries and its definition requires specific research.

In each of the time intervals of the corresponding attribute, the object is predisposed to innovations of a certain order.

Transdisciplinary classification of innovations

Innovation order	Innovation attribute	Innovation characteristic
1 order	Quantitative attribute Functional properties of the object remain	Change of the structural elements of the system, preserving existing functions
2 order		Simple target adaptation to quantitative requirements while maintaining the functions of the system or its part
3 order		Simple organizational changes to secure a better
4 order		Changes caused by the adaptation of the system's elements, which do not affect the quality of particular elements, but in complex lead to increase in efficiency of the system as a whole Partial functional changes within the system or its parts
5 order	Qualitative attribute the functional properties of an object are partially or completely changed	Partial functional changes within the system or part of it
6 order		Changes altering the initial concept but partially or entirely altered preserving the functional principle
7 order		Changes that change the original concept, but retain the functional principle
8 order		Changes altering the base functional principle of the system's

Then, the management of the innovation process looks like the preparation and implementation of a consistent transformation of the organization, based on its "internal readiness" to accept these transformations. Sign, the level of innovation must coincide with the sign of the period, otherwise the innovation process is doomed to failure. For example, the growing season for potatoes is 60 days. However, if one wanted to eat young potatoes at the end of November, then planting potatoes at the end of August will not be crowned with success.

The hypothesis about a similar structure of temporal development of organizations was put forward by the authors and verified back in the 1990's. Based on a retrospective analysis of development of IBM, confirmation of the existence of such a pattern was obtained [9]. Studies of the full set of *M*-waves (the entire multiplex) were carried out on the basis of data from Pfizer, Takeda Pharmaceutical Company Limited, Stada CIS, Novo Nordisk, Gedeon Richter [10] and five electronics companies – LG, Philips, Sony, Panasonic and Aiwa [4]. These studies made it possible to formulate guidelines for the temporal planning of innovative development and to determine the normative temporal parameters for the development of business systems. Regulatory temporal parameters for constructing an innovative map-graph of an object's development are:

- the calendar duration of the *M*-waves (the entire multiplex);
- calendar dates of development control points (calendar dates of beginning and end of the period).

Knowing the calendar dates for the beginning and end of individual development periods allows one to determine the direction of work on the development of innovations of the appropriate type, to determine the objective terms for the development of plans and terms for their implementation in advance. This will help to avoid financial losses that occur when innovation changes are delayed or if they are prematurely implemented.

With the classification of innovations and the determination of the timing of the onset and duration of the corresponding periods in the development of the enterprise, it becomes possible to increase the objectivity and effectiveness of innovation management.

DISCUSSION

From the standpoint of the above approach, the increase in the efficiency of management of the innovative development of an organization is due to the need to determine the order of innovation or to determine their sign. The problem is that these innovations can be both quantitative and qualitative. However, the scale of structural and functional changes depends on which waves we are considering. So, for example, first-order innovations can be produced in the calendar duration of the reference wave. However, the sign of innovation is given by the sign of the reference wave. In this sense, the methodology for determining the sign of innovation for each wave of the multiplex needs further research.

Another problem for drawing up an innovative development chart is to determine the duration of the reference wave for a specific object. There are eight such periods in the base wave. In addition, as can be seen from the multiplex figure, the object is predisposed to quantitative changes during the first two calibration waves. During the next two calibration waves, the object is prone to qualitative changes. However, the determination of the calendar duration of the reference wave makes it possible to determine with high accuracy the calendar dates of changes in the object's predisposition to innovations of a certain order.

CONCLUSION

Thus, the use of a system-transdisciplinary approach can improve the efficiency of managing the innovation process.

The interpretation of the innovation process as a change in the structural and functional properties of an object studied as a system, as well as transdisciplinarity, universality of the order of its development allows:

- to develop a transdisciplinary classification of the orders of innovation;
- to represent the development of an object as a set of M -waves – a multiplex of development.

The objective predisposition of an object at each stage of its development to innovations of a strictly defined type and the ability to determine the calendar dates for the onset of these stages makes it possible to build an innovative map-schedule of the object's development.

The presence of such a schedule allows us to more objectively and in advance set the nature of innovative events and the time parameters of their implementation. The presence of control points allows for more efficient implementa-

tion of control functions. An opportunity is provided to more effectively conduct analysis, planning activities, organizing their implementation, motivating and stimulating employees.

A retrospective analysis of the innovative development of organizations on the basis of the described methods-techniques of the system-transdisciplinary approach allows us to conclude about their representativeness. Consequently, the practice of their application in drawing up charts of the innovative development of organizations with a high degree of probability will reduce the losses from the incorrectly assessed nature of innovations and the delay in their implementation.

REFERENCES

1. Adizes Yitzhak, *Corporate lifecycle management*. SPb, PETER, 2007. pp. 12–25.
2. *Resolution of the Government of the Russian Federation of April 15, 2014 N 316 "On approval of the state program of the Russian Federation" Economic development and innovative economy*". Available: <https://base.garant.ru/70644224/>
3. L.E. Greiner, "Evolution and Revolution in the Process of Organizational Growth", *Bulletin of St. Petersburg University. Ser. Management*, no. 4, pp. 76–92, 2002.
4. M. Zhidkova, "Transdisciplinary model of the time unit of order in planning the development of an enterprise", *International Student Scientific Bulletin*. Available: <http://www.eduherald.ru/120-r11885>
5. "How the most important business decisions are made", *N-T.ru. Electronic library "Science and Technology"*. Available: <http://n-t.ru/nv/2003/1110.htm>
6. S.A. Klepova and Sh.I. Maksudova, *Organizational life cycle as an instrument of strategic anti-crisis management*. Available: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2012/0276.pdf>
7. V.S. Mokiy, "Fundamentals of the transdisciplinary theory of multiplex development waves", *Universum: Social Sciences: electron. scientific. zhurn.*, no. 1-2 (12), 2015. Available: <http://7universum.com/ru/social/archive/item/1974>
8. V.S. Mokiy, *Basics of Transdisciplinarity*. Nalchik: El-Fa, 2009, 368 p.
9. R. Cooper, *How to turn a new product development department into an efficient business unit and improve the efficiency of corporate innovation*. Available: <http://delovoyimir.biz/2013/01/16/kak-prevratit-otdel-razrabotki-novyh-produktov-v-effektivno-rabotayuschuyu-biznes-edinicu-i-povysit-kpd-korporativnyh-innovaciy.html>
10. G.A. Palamarenko, "Improving the process of formation of the innovation strategy of the enterprise", Dissertation of the Candidate of Economic Sciences. Moscow: RIIS, 1997, 157 p.
11. V.S. Filonchik, "Temporal factors in planning the innovative development of pharmaceutical companies", *Basic Research*, no. 11, 2014.
12. G.V. Shirokova, "Organizational life cycle: empirical research and theoretical approaches", *Russian Management Journal*, 5 (3), pp. 85–90, 2011.
13. *Globelics*. Available: <https://www.globelics.org/>
14. "Improving innovation", *Economist*. 29 Feb. 2008. Available: <http://www.economist.com/node/10787664>
15. Oslo Manual, "Guidelines for Collecting and Interpreting Innovation Data", 3rd edition. A Joint Publication of OECD and Eurostat. OECD/EC, 2005.
16. F. Valenta, *Inovace v manažerské praxi*. Praha: Velryba, 2001.

Received 11.11.2020

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

INFORMATION ON THE ARTICLE

Michael S. Mokiy, ORCID: 0000-0002-9504-0536, FSBEI “State University of Management”, FSBEI “Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation”, Russia, e-mail: mokiy2000@yandex.ru

Paul M. Gureev, ORCID: 0000-0002-9350-7964, FSBEI “State University of Management”, Russia, e-mail: pmg-dom@mail.ru

УПРАВЛІННЯ ІННОВАЦІЙНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ОРГАНІЗАЦІЯХ. СИСТЕМНО-МІЖДИСЦИПЛІНАРНИЙ ПІДХІД / М.С. Мокий, П.М. Гурєєв

Анотація. Обґрунтовано застосування системно-міждисциплінарного підходу до вирішення проблем управління інноваційними процесами, особливо у галузі планування, організації та контролю інноваційних подій. Такими проблемами є виправдання інноваційних подій та визначення календарних дат. Описано принципи класифікації інновацій на основі трансдисциплінарної моделі інформаційної одиниці порядку. Розвиток системи можна подати як мультиплекс хвиль або як сукупність *M*-хвиль. Показано, що система на кожному етапі свого розвитку схильна до змін певної ознаки. Описано методологічні принципи обґрунтування календарних дат планування, проведення та моніторингу реалізації заходів в інноваційному процесі.

Ключевие слова: управління інноваціями, системно-міждисциплінарний підхід, інноваційне планування, мультиплексні хвилі (*M*-хвилі), нормативні параметри інноваційного процесу.

УПРАВЛЕНИЕ ИННОВАЦИОННЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ОРГАНИЗАЦИЯХ. СИСТЕМНО-ТРАНСДИСЦИПЛИНАРНЫЙ ПОДХОД / М.С. Мокий, П.М. Гуреев

Аннотация. Обосновано применение системно-трансдисциплинарного подхода к решению задач управления инновационными процессами, особенно в области планирования, организации и контроля инновационных мероприятий. Такими проблемами являются обоснование новаторских мероприятий и определение календарных дат. Описаны принципы классификации инноваций на основе трансдисциплинарной модели информационной единицы порядка. Развитие системы можно представить как мультиплекс волн или как набор *M*-волн. Показано, что система на каждом этапе своего развития предрасположена к изменению определенного признака. Описаны методологические принципы обоснования календарных сроков планирования, проведения и мониторинга реализации мероприятий в инновационном процессе.

Ключевые слова: управление инновациями, системно-междисциплинарный подход, инновационное планирование, мультиплексные волны (*M*-волны), нормативные параметры инновационного процесса.

РОЗРОБЛЕННЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТЕКСТІВ ПУБЛІЧНИХ ТА СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ДЖЕРЕЛ У ЗАВДАННЯХ ПЕРЕДБАЧЕННЯ ТА СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ

В.В. САВАСТЬЯНОВ

Анотація. Розроблено комбінований підхід до вилучення понять і побудови класифікаторів та онтологій за допомогою відкритих і пропрієтарних пакетів програмного забезпечення. Досліджено сучасні підходи, методи та моделі збереження великих обсягів слабо структурованої інформації з наборів програмного забезпечення OpenSource. Побудовано онтологію, у листях якої реалізовано класифікатор на булевих правилах із застосуванням програмного забезпечення SAS(R) Content Categorization Software. Для побудови онтології використано підхід до побудови векторів близьких понять за допомогою бібліотеки OpenSource програмного забезпечення Gensim — модель Word2Vec. Розроблено типовий алгоритм щодо побудови класифікуючої онтології. Результати дослідження можуть бути використані для побудови онтології предметних галузей, створення класифікуючих онтологій та розмічення корпусів текстів.

Ключові слова: системний аналіз, передбачення, textmining, NLP, класифікатори, онтології, OpenSource, Python, Gensim.

ВСТУП

Сьогодні кожен з нас стикається із впливом різноманітних каналів надходження інформації різної природи: голосової, візуальної, текстової. Джерела інформації не завжди є надійними або такими, що не намагаються нав'язати чийсь суб'єктивну або комусь вигідну точку зору на ситуації або факти. Інформація сучасних інформаційних джерел викривлена, містить домисли, сплутує інформацію з гео-, спатіал- та причинно-наслідковими фактами.

На жаль, така інформація суттєво впливає не тільки на звичайних членів суспільства, а й на осіб, що приймають рішення. Особливо критичним такий вплив відчувається на території України, де є наслідки гібридних та інформаційних війн [1], тобто послідовного керованого інформаційного впливу. Іншим прикладом критичного впливу є ситуації глобальних катастроф або епіdemій, коли за швидкий проміжок часу виникає великий масив протилежних думок, знань, фактів, домислів, які поширюються медіаджерелами, особливо не офіційними, проте «соціально заразними», оскільки сформовані так, що викликають емоційні почуття, а тому швидко поширюються.

Однією з причин такого інформаційного впливу є наявність у джерелах у своєму масиві аналогу «методу брейншторму», коли у медіа конструюються будь-які «дивовижні» комбінації факторів, ситуацій, причин та наслідків. Така інформація, особливо текстова, може бути зібрана й оброблена сучасними машинними засобами оброблення мови для ідентифікації вияв-

лених факторів різної природи та використання цих знань у завданнях передбачення та системного аналізу. Пришвидшення вивчення предметної галузі, особливо у кризовій ситуації, дає змогу швидко побудувати платформу прийняття рішень, наприклад, на базі методології передбачення, для якісного супроводження проти кризових рішень та дій [2].

ЗМІСТОВНА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Завдання вилучення та ідентифікації факторів різної природи починається з лавиноподібного надходження інформації про ще не виявлену/формульовану предметну галузь з її взаємозв'язками, асоціативними поняттями та ситуаціями.

Інакше кажучи, потрібно виявити типові поняття, асоціації та взаємозв'язки стосовно масштабного явища чи проблеми з текстового масиву, що їх згадують або на них посилаються та обсяг яких швидко зростає. При цьому бракує експертів, або експертизи у досліджуваному явищі. Прикладом такого явища може слугувати ситуація глобальної епідемії COVID-19.

Іншим варіантом постановки завдання є типове завдання дослідницького характеру щодо змін у функціонуванні або структурі складного об'єкта/системи, як то, наприклад, мегаполіс. Вирішення питання проведення структурних/функціональних змін за наявності багатьох джерел централізованих, децентралізованих та самокерування/регулювання породжує багато явищ, сподівань, думок і спекуляцій, а також об'єктивних знань. Уся ця інформація висвітлюється у різноманітних джерелах і потребує швидкого вивчення з метою вилучення та ідентифікації факторів різної природи для побудови стратегії раціональних змін у функціонуванні або структурі складного об'єкта/системи.

Для аналізу текстів публічних та спеціалізованих джерел з метою ідентифікації факторів різної природи у завданнях передбачення та системного аналізу пропонується застосувати такі прийоми.

Етап 1. Класифікація та збирання джерел.

1. Збирання джерел (посилань на джерела).
2. Класифікація джерел.
3. Збирання примірників інформації з кожного джерела.
4. Визначення наборів метаданих, які можна вилучити з джерела.
5. Неперервне збирання інформації з джерел, вилучення змісту та метаданих, збереження.

Етап 2. Очищення та оброблення інформації з джерел.

1. Очищення текстів джерел.
2. Попереднє оброблення текстів.
3. Вилучення та вивчення концептів та понять.

Етап 3. Вилучення знань з текстів.

1. Побудова класифікуючої онтології.
2. Створення правил класифікації текстів на базі вилучених концептів та понять.
3. Статистичне оброблення результатів з метою подальшого вивчення впливу/згадування вилучених факторів на ситуації, що їх описано у текстах.

4. Передавання статистичної інформації та переліків факторів у методи якісного аналізу (наприклад, у методи якісного аналізу у складі методології передбачення).

КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ЗБИРАННЯ ДЖЕРЕЛ: ПОТЕНЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА СЛАБКО СТРУКТУРОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА ТИПИ ДОКУМЕНТІВ, ЩО МОЖУТЬ НАДХОДИТИ ЦИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Потенційними джерелами слабо структурованої інформації можуть бути:

- документи про аналіз стану досліджуваної системи;
- плани розвитку досліджуваної системи (у вигляді таблиці: проблема, захід, результат, бюджет);
- стенографовані аудіозаписи круглих столів та конференцій з питань розвитку;
- перелік інвестиційних проєктів для створення та/або розвитку;
- профільні публікації та огляди стану системи або схожих систем;
- витяги із засідань рад щодо системи або адміністративного чи законодавчого поля, що стосується об'єктів досліджуваної системи;
- плани розвитку об'єктів та підсистем схожих систем;
- план розвитку галузі у межах розглядуваної країни/регіону;
- паспорти передових інноваційних технологій, що застосовані або потенційно можуть бути застосовані у межах об'єктів та підсистем розглядуваної системи;
- переліки класифікаторів, статистичні таблиці характеристик та показників об'єктів та підсистем розглядуваної системи;
- новини з медіаресурсів;
- блоги компаній-розробників у досліджуваній галузі;
- патенти;
- сторінки соціальних мереж;
- публікації твітеру;
- стенограми відеоматеріалів;
- інші джерела.

Указаний набір матеріалів та звітів складається із чотирьох типів джерел:

А. Документи, які ідентифікують тип даних і переліки об'єктів, суб'єктів та систем (предметний домен).

В. Документи та звіти, що визначають, яким чином дані можуть зберігатися за допомогою стандартизованих метаданих, відомих баз даних, таксономій.

С. Документи та звіти, які визначають переліки можливих факторів, наслідків і наперед визначають тенденції у проблемних галузях.

Д. Інші документи, що мають спекулятивний характер, як то блоги, твіти, новини, інтерв'ю.

Документи типу А надають набір визначень для предметної галузі: типової термінології, типових ключових слів і описують:

- концепції, стратегії і фактори, важливі для опису ситуацій у досліджуваній галузі;
- показники основних характеристик досліджуваних систем;
- фактори ризику;
- стратегії та алгоритми дій;
- визначення та пояснення, надані організаціями, урядовими установами та науковцями.

Документи типу В надають набір класифікаторів та стандартів для метаданих під час дослідження проблемних галузей, серед яких:

- стандарти баз даних предметної галузі;
- коди об'єктів;
- класифікатор ІРТС;
- класифікатор КВЕД;
- класифікатори доменних галузей.

Документи типу С надають набір моделей, списків, факторів, наслідків і наперед визначають тенденції у проблемних галузях:

- моделі соціальної поведінки;
- економічні тренди;
- концепції про технологічні, соціальні та економічні уклади;
- інформаційні явища;
- негативні тренди та явища.

Документи типу D надають набір спекуляцій, що викликають явища інформаційного шуму або визначають передові ідеї у проблемних галузях:

- новини;
- спекуляції;
- інтерв'ю;
- твіти;
- негативні тренди та явища.

Документи типу D є важливими, саме вони є джерелом інформації як найбільш численне у глобальному інформаційному просторі.

АНАЛІЗ ЛЕГАЛЬНОСТІ ЩОДО ЗЧИТУВАННЯ ЗМІСТУ ДОКУМЕНТІВ ІЗ ДЖЕРЕЛ СЛАБКО СТРУКТУРОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Можливість вилучення знань з публічних джерел слабо структурованої інформації було завжди конфліктним питанням: чи легально вилучати, копіювати, оброблювати та/або зберігати інформацію, що захищена копірайтом, чи можна взагалі переміщувати контент не у браузері і читати, а у скрипті з метою оброблення даних.

Кримінальний та адміністративний кодекси встановлюють відповідальність за порушення авторських і суміжних прав [3]. Проте 9 вересня 2019 р. у Сан-Франциско суд прийняв важливе рішення, що скрапінг публічних

сайтів не суперечить закону CFAA (Computer Fraud and Abuse Act). Інцидент було створено у ході конфлікту компаній LinkedIn та hiQ, що скрапила дані профілей LinkedIn для аналізу та консалтингу HR-агентств [4].

Постанова суду є такою: не можна перешкоджати збиранню інформації. Це накладається і на новини, оскільки ця інформація має фактуальний, а не творчий характер. Крім того, інформація не перепублікується, а виконується аналіз та відбувається збагачення зібраної інформації.

ІНФОРМАЦІЙНА МОДЕЛЬ І КОНЦЕПТУАЛЬНА АРХІТЕКТУРА ПЛАТФОРМИ ЗБИРАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ВЕЛИКИХ ОБСЯГІВ СЛАБКО СТРУКТУРОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Створено інформаційну модель і концептуальну архітектуру платформи збирання та зберігання великих обсягів слабо структурованої інформації (рис. 1).

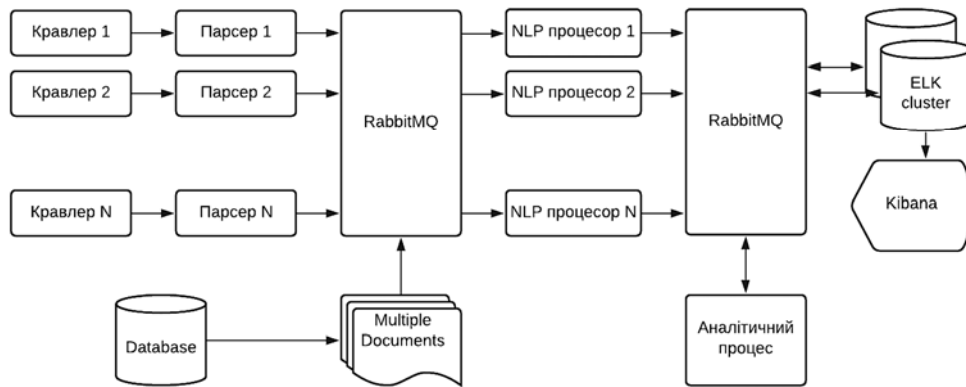


Рис. 1. Узагальнена архітектура платформи збирання та зберігання великих обсягів слабо структурованої інформації

Склад платформи:

1. Набір кравлерів — скрипти, що містять правила сканування сайтів, включаючи правила перебирання посилань.
2. Набір парсерів — скрипти будь-якою мовою програмування, що містять правила розбору текстів сайтів з метою перетворення тексту в набір первісних артефактів-метаданих: тему, текст, дату, реферат і т.ін.
3. Платформа розподілення інформаційних потоків (RabbitMQ) [5].
4. Платформа оброблення/сховище даних (Elasticsearch) [6].
5. Підсистема візуалізації даних (Elasticsearch Kibana).
6. Аналітичний процес та NLP-процесор: містить реалізацію етапів 2 і 3.

Інформація з джерел надходить:

- а) через кравлери, потім парсери;
- б) з бази даних.

Далі інформація надходить до черг платформи розподілення інформаційних потоків і розподілено обробляється. Потім вона знову надходить до черг і зберігається у сховищі. За необхідності візуалізація інформації відбувається через підсистему візуалізації даних (Elasticsearch Kibana).

Платформу RabbitMQ пропонується використовувати як універсальний механізм обміну та розподілення даних між модулями платформи. Вона забезпечує безпечний гнучкий механізм взаємодії між модулями, що добре масштабується за рахунок універсального механізму обміну на базі черг та джерел.

Платформа Elasticsearch — це розподілений механізм пошуку та аналітики, доступної через RESTful API. Програмне забезпечення у складі Elastic Stack централізовано зберігає дані для швидкого пошуку з широкими надбудовами релевантності, надає можливості для аналітики через додаток Kibana. Платформа Elastic Stack легко масштабується штатними вбудованими засобами і має вбудовані засоби контролю доступу.

Використовуються також засоби NLP та аналітичні процеси, що побудовані на базі бібліотек мови Python. Для аналізу використовуються пакети NLTK, Pandas, NumPy та інші, такі як gensim.

Для первісного анотування елементів слабо структурованої інформації застосовуються елементи метаданих та класи онтологій. Схема метаданих Dublin Core є найбільш вживаною і відомою [7]. Серед інших схем семантичного анотування елементів неструктурованих даних можна виокремити SIOC (Semantically-Interlinked Online Communities) [8] та SKOS (Simple Knowledge Organization System) [9]. Тому пропонується використовувати саме ці елементи метаданих та класи онтологій для первісного анотування елементів слабо структурованої інформації.

ОЧИЩЕННЯ ТА ОБРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ, ЩО НАДХОДИТЬ ІЗ ДЖЕРЕЛ

Очищення корпусу (скрипт мовою Python). Очищення корпусу є дуже важливим кроком. Експериментально опрацьовано три етапи, що надали найбільший результат за найменших затрат процесорного часу для різних корпусів. Ця процедура складається з таких етапів:

1. Розбиття за роздільниками — поділення тексту на фрагменти.
2. Очищення по довжині.
3. Вилучення зайвих букв.

Лематизація текстів корпусу (pymorphy2) з очищенням. У результаті процедури очищення видаляються обрані частини мови (за допомогою бібліотеки pymorphy2) [10], а саме: PREP, CONJ, PRCL, ПІНТІ. Приклад фрагмента обробленого тексту (у вигляді списків слів у реченнях):

['сталии', 'розвиток', 'київ', 'визначаймося', 'збалансовані', 'функціонування', 'забезпечення', 'економічні', 'зростання', 'потреба', 'населення', 'одночасні', 'поліпшення', 'екологічні', 'стан', 'міські', 'середовище', 'ціле', 'раціональні', 'використання', 'ресурс', 'число', 'природні', 'технологічні'], , ['розвиток', 'економічні', 'комплекс'], ['розвиток', 'ринкова', 'інфраструктура', 'необхідна', 'формування', 'забезпечення', 'ефективні', 'функціонування', 'ринкова', 'економіка']

На жаль, відкриті засоби оброблення текстів, навіть із застосуваннями власного розробленого набору словників української мови, не такі доскона-

лі, тому серед речень трапляються артефакти. Утім вдосконалення словників не є метою цієї роботи.

Побудова моделі Word2Vec (libgensim). За допомогою libgensim [11] побудовано та порівняно 6 моделей з різними параметрами фільтрації слів за частотою, довжиною контексту/вікна пошуку, кількістю термінів, кількістю ітерацій пошуку:

- 1) model1 = Word2Vec(txts, min_count=1);
- 2) model2 = Word2Vec(txts, min_count=3);
- 3) model3 = Word2Vec(txts, min_count=10, size=300, iter=50, window=12);
- 4) model4 = Word2Vec(bitxts, min_count=10) (на основі біграм);
- 5) model5 = Word2Vec(txt, min_count=30, size=300, iter=50, window=22) (з вилученням додаткових граем — ['INTJ', 'PRCL', 'CONJ', 'PREP', 'PRED', 'NPRO', None (не визначено)]);
- 6) model6 = Word2Vec(bitxts, min_count=3, size=300, iter=50, window=2) (біграми з вилученням додаткових граем — ['INTJ', 'PRCL', 'CONJ', 'PREP', 'PRED', 'NPRO', None (не визначено)]).

Порівняння моделей виконується експертним методом виділення асоціацій щодо понять обраного домену (коронавірус). Експерти назвали слово і перевірялись слова-асоціації, що їх згенерувала модель. Найбільш вдалою (корисною) щодо нагадування зв'язаних слів у формуванні таксономій/онтологій виявилась шоста модель model6.

ВИЛУЧЕННЯ ЗНАНЬ З ТЕКСТІВ

У ході дослідницьких робіт проаналізовано знання щодо двох предметних доменів:

- 1) підземна та наземна інфраструктури мегаполіса;
- 2) COVID-19.

Вилучення концептуальних понять домену «Підземна та наземна інфраструктури мегаполіса». Експериментально виявлено, що найбільш зрозумілі вихідні словосполучення припадають саме на біграми як концептуальні поняття:

bigram2 = phrases.Phrases(txt5, min_count=3, threshold=10).

Результат: ['автомобіль_стоянка', 'авторський_колектив', 'автостоянка_гараж', 'адміністративні_район', 'аналіз_дані', 'база_геодані', 'база_дані', 'баль_фактор', 'благоустрій_облаштування', 'бортницькоа_станції', 'ботанічний_сад', 'брикет_неутилізовані', 'будівельні_комплекс', 'будівельні_матеріал', 'будівництво_архітектура', 'будівництво_експлуатація',

....

'якість_вода', 'якість_життя', 'імовірнісні_метод', 'імітаційні_моделювання', 'індустріальне_домобудування', 'інженерне_захист', 'інженерне_обладнання', 'інженерноа_підготовка', 'інженерноа_інфраструктура', 'інженерні_підготовка', 'інститут_київгенплан', 'інтенсивність_використання', 'ініціація_зсувні', 'існуючоа_забудова', 'існуючі_межа', 'існуючі_забудова', 'історії_культура', 'грунтови_масив']

Результати виведення моделі model6 для вивчення асоціацій наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Деякі результати виведення моделі для вивчення асоціацій і концептів

ПОНЯТТЯ	АСОЦІАЦІЇ (ВАГИ)
ТРАНСПОРТНІ_ЗАСІБ	[('резервування', 0.7325636744499207), ('рівня_автомобілізації', 0.7049006223678589), ('паркування', 0.6886059641838074), ('менше', 0.6751060485839844), ('зберігання', 0.6734187602996826), ('постійного', 0.6668195724487305), ('тимчасові_зберігання', 0.629106879234314), ('розрахунок', 0.6270085573196411), ('легкові_автомобіль', 0.605026125907898), ('вимога', 0.6034138202667236)]
ТУНЕЛЬ	[('вплив_побудова', 0.9952846169471741), ('діоксид_азот', 0.770656943321228), ('економічність', 0.735840916633606), ('повітря', 0.7345056533813477), ('стабілізація', 0.7330552339553833), ('лення', 0.7189959287643433), ('деформація', 0.7173842191696167), ('відповідаймо_вимога', 0.7098426818847656), ('відсутні', 0.7091654539108276), ('існуючий', 0.7089160680770874)]
ПІДЗЕМНІ	[('гаражістоюнка', 0.8044840097427368), ('напівпідземні', 0.7562092542648315), ('гараж', 0.7020224332809448), ('наземні', 0.6915863752365112), ('паркінг', 0.6592525243759155), ('тощо', 0.6541709899902344), ('правові', 0.6475299596786499), ('відношення', 0.643531084060669), ('пішохідні', 0.6306630373001099), ('грунтові', 0.6259087324142456)]

Вилучення концептуальних понять домену «COVID-19». Для корпусу текстів домену «COVID-19» найбільш якісними після перегляду виявились моделі аналізу біграм з тими ж параметрами, що і для корпусу домену «Підземна та наземна інфраструктури мегаполіса»:

`bigram2 = phrases.Phrases(txt5, min_count=3, threshold=10).`

Результат: ['боротися_пандемія', 'борімося_життя', 'випадок_захворювання', 'володимир_ватрас', 'встановлено_перш', 'віко_група', 'віко_рік', 'голови_київські', 'госпіталізація_хворий', 'допомога_хворий', 'ексзаступник_голови', 'ексзаступник_київські', 'закарпаття_тест', 'закупімо_тест', 'київські_ода', 'клінічні_сортування', 'коронавірусні_хвороба', 'країна_носімо', 'кількість_підтверджені', 'кількість_хворий', 'кіровоградські_область', 'лабораторно_підтверджені', 'легкі_форма', '.....', 'людина_контактуймо', 'міські_клінічні', 'надання_медичні', 'нардеп_скороход', 'нардеп_слуга', 'офіційні_дан', 'перевищмо_тисяча', 'повернути_квиток', 'позитивні_результат', 'помрімо_ексзаступник', 'приватні_клініка', 'підтверджені_випадок']

Результати виведення моделі model6 для вивчення асоціацій наведено у табл. 2.

Таблиця 2. Результати виведення моделі model6 для вивчення асоціацій і концептів

ПОНЯТТЯ	АСОЦІАЦІЇ (ВЕСА)
КОРОНАВІРУС	[('година', 0.9996013641357422), ('пишімо', 0.9995890855789185), ('мена', 0.9995628595352173), ('повернімо', 0.9995517134666443), ('заходи', 0.9995511174201965), ('медицина', 0.9995511174201965), ('зайві', 0.9995459914207458), ('кашель', 0.9995441436767578), ('коронавірусні_хвороба', 0.999543309211731), ('апарат', 0.999542236328125)]
ЛІКУВАТИСЯ	[('сидімо', 0.9997162818908691), ('легкі_форма', 0.9996713399887085), ('друз', 0.9996439218521118), ('лікуймося', 0.9996432662010193), ('нея', 0.9996223449707031), ('просто', 0.9996215105056763), ('смертність', 0.9996176362037659), ('тварина', 0.9996176362037659), ('пандемія', 0.9996066093444824), ('тип', 0.9996057152748108)]
МАСКА	[('захист', 0.9989341497421265), ('пройдімо', 0.9989300966262817), ('смертність', 0.9989254474639893), ('новий', 0.9989224672317505), ('медицина', 0.9989136457443237), ('фейсбук', 0.9988991618156433), ('кордон', 0.9988906383514404), ('епідемія', 0.9988903403282166), ('легкі_форма', 0.9988902807235718), ('імунітет', 0.9988836050033569)]
КІЛЬКІСТЬ_ПІДТВЕРДЖЕНІ	[('сягнімо_тисяча', 0.999620795249939), ('сша', 0.9995124936103821), ('київщина', 0.9994584321975708), ('катастрофа', 0.999439001083374), ('відомо', 0.9994375705718994), ('троя', 0.9994269609451294), ('країна', 0.9994232654571533), ('українське', 0.9994181394577026), ('відома', 0.9994150400161743), ('апарат', 0.9994133710861206)]
ВЛАДА	[('держслужбовець', 0.9997319579124451), ('київські', 0.9997277855873108), ('дружина', 0.9997268319129944), ('вирішімо', 0.9997234344482422), ('уряд', 0.9997172355651855), ('заразімося', 0.9997122287750244), ('більш', 0.9997105002403259), ('дорога', 0.9997104406356812), ('грош', 0.9997095465660095), ('коронавірусні_хвороба', 0.9997024536132812)]

Побудова класифікуючої онтології. Під час побудови класифікуючої онтології вирішується проблема формування структури домену нової проблеми зі словами-синонімами та асоціаціями для розміщення їх у правилах класифікатора.

Приклад виведення асоціацій і концептів, що зв'язані зі словом «захворювання» у проблемному домені «коронавірус», ілюструє рис. 2.

```
In [336]: 1 model6.wv.most_similar('захворювання')
Out[336]: [('інфекція', 0.7220960855484009),
('смерть', 0.7193725109100342),
('зараження', 0.7098100185394287),
('інфіковані', 0.6770030856132507),
('коронавірус', 0.6726216077804565),
('стан_березень', 0.6338338851928711),
('тестування', 0.6336660385131836),
('вірус', 0.6335515975952148),
('випадок', 0.6324660181999207),
('хвороба', 0.6273006200790405)]
```

Рис. 2. Асоціації зі словом «захворювання» у проблемному домені «коронавірус».

На основі запитів до моделі можна досить швидко побудувати класифікуючу онтологію (табл. 3) у проблемному домені «коронавірус» для подальшої генерації правил класифікації.

Таблиця 3. Приклад аналізу для побудови класифікуючої онтології

Клас	Слова/поняття/концепти
Захворювання	інфекція, зараження, вірус, хвороба, інфіковані, пандемія, поширення, спалах
Смерть	смерть, померти, вмирати
Паніка	захворіймо, помремо, черга, закупай
Обмеження	карантин, транспорт, режим, закон, заборона, поліція, надзвичайні стан, міжнародні перевезення

Імплементація правил у SAS® Content Categorization Studio. Приклад формування правил для класифікації у SAS® Content Categorization Studio [12] наведено на рис. 3, 4. За допомогою моделі model6 виявлено найближчі асоціації та синоніми щодо понять із предметної галузі «Епідемія коронавірусу».

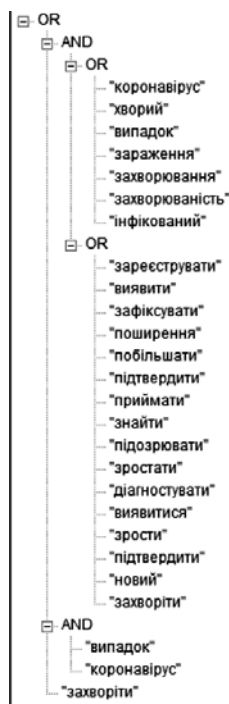


Рис. 3. Правило класифікації нових випадків захворювання

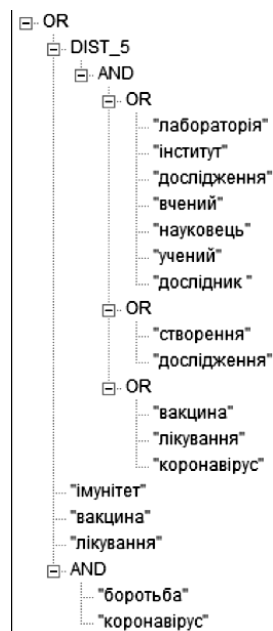


Рис. 4. Правило класифікації ситуацій щодо розроблення вакцини

Завантаження моделі до SAS® Content Categorization Server. Після формування моделі її можна скопіювати у бінарний вигляд та завантажити до SAS® Content Categorization Server.

Це робиться через меню у SAS® Content Categorization Studio.

Маркування текстів. Кожний текст з корпусу передається до SAS® Content Categorization Server, який згідно з моделлю категоризує тексти.

Кожне правило моделі зіставляється із завантаженим текстом відповідно до моделі вилучення фактів, а потім скорингується. На виході отримуємо тексти, марковані метаданими.

Приклад роботи категоризатора на базі згенерованих правил ілюструє рис. 5.

Пандемія коронавірусу призвела до безпрецедентних заходів у всьому світі. Від Іспанії до США уряди намагаються за їхньої допомоги зменшити поширення вірусу. Окрім обмеження міжнародних поїздок, деякі країни також намагаються обмежити рух у власних кордонах та заборонити публічні зібрання.

Як перевіритися на коронавірус?

Метро, ТРЦ та сполучення між регіонами: що саме хоче закрити МОЗ

Місяць без школи: як вчитися на карантині

Київ закриває кафе і сполучення з іншими містами: які ще будуть обмеження

Експерти з питань охорони здоров'я та правозахисники попереджають, що при цьому постає складне питання балансу між охороною здоров'я та порушенням особистої свободи.

Тож як країни впроваджують обмежувальні заходи, зокрема карантин та ізоляцію?

Протягом тижнів Китай, де розпочався спалах Covid-19, зазнав важкого удару через поширення вірусу. Лунала критика дій влади на початку епідемії, дехто звинувачував Пекін у замовчуванні серйозності спалаху.

Коли ситуація почала погіршуватись, влада ізолювала місто Ухань, епіцентр спалаху та одне з найбільших міст країни. Вжиті заходи, включно із зупинкою громадського транспорту, згодом поширилися на інші регіони й заторкнули десятки мільйонів людей.

Щонайменше двоє громадянських журналістів, які намагалися поділитися інформацією про спалах в інтернеті, зникли безвісти.

На вулицях людям перевіряли температуру, і навіть надходили повідомлення про те, що охоронці взагалі не давали людям виходити з будинків. Китай звинувачували у застосуванні системи відеоспостереження для обмеження пересування та моніторингу стану здоров'я людей.

Як коронавірус шириться планетою. Mapa

Як подорожувати під час епідемії

Як перевіритися на коронавірус?

Чи захищають медичні маски від вірусу?

Після того, як ситуація почала покращуватися, життя у Китаї поступово починає повертатися до норми.

Водночас деякі правозахисні гільї, такі як Human Rights Watch, критикували неажібно Російській організації охорони здоров'я (ВООЗ) на дії Пекіна під час спалаху - йшлося про те, що Росія не надавала достовірної інформації про стан здоров'я та деталі подорожі під час спалаху.

Після шведського погіршення жорсткі обмеження щодо країн, а згодом поширилися на інші країни. Італія, яка ввела найбільш суворі обмеження, згодом змінювала курс. Італія, яка ввела найбільш суворі обмеження, згодом змінювала курс. Італія, яка ввела найбільш суворі обмеження, згодом змінювала курс.

Уряд закликав 60-мільйонну країну вжити заходів, включно із штрафом у розмірі 206 євро, а також заборонити виходити на вулицю лише за нагальної потреби - і попередили, що на країну чекають "дуже важкі тижні".

Повідомляють, що за дотримання правил стягнуть 100 тис. євро. Франція заявила, що накладе штраф у розмірі до 133 тис. євро за ненадання достовірної інформації про стан здоров'я та деталі подорожі під час візду до країни.

Деякі країни взагалі заборонили в'їзд, закривши сухопутні та повітряні кордони. Інші запровадили обов'язковий 14-денний карантин для тих, хто прибуває до країни, зокрема накази про самоізоляцію вдома чи у готелі.

Кожному, хто не дотримується нових правил ізоляції в Австралії, загрожуватимуть великі штрафи, а у деяких районах - навіть ув'язнення. Наприклад, у Західній Австралії порушники будуть змушені заплатити до 50 тис. євро США.

Прем'єр-міністерка Нової Зеландії Джасінда Ардерн попередила, що мандрівникам, які не дотримуються правил самоізоляції, загрожуватимуть штрафи або навіть депортація. "Якщо ви приїжджаєте сюди і не маєте наміру виконувати наші прохання про самоізоляцію, відверто кажучи, вам тут не рад, і ви маєте виїхати, перш ніж вас депортують", - сказала вона.

Копірайт зображення

Category	Relevancy
Top/impact/international_affairs	1.73
Top/impact/order_justice_rights	1.54
Top/situation/quarantine_general	1.25
Top/impact/politics	1.21
Top/situation/politics	1.17
Top/impact/transport_travel	1.07
Top/impact/health_care	1.00
Top/impact/leisure_culture	1.00
Top/impact/community	1.00
Top/test	1.00
Top/stats/new_cases	0.889

Рис. 5. Приклад роботи категоризатора: маркування тексту категоріями предметного домену «коронавірус»

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПІДХОДУ НА ВЕЛИКИХ ОБСЯГАХ ДАНИХ (НА ПРИКЛАДІ ПРЕДМЕТНОГО ДОМЕНУ COVID)

Використання мови Python, у тому числі як клієнтської частини API до SAS® Content Categorization Server, дозволяє побудувати будь-яку архітектуру для оброблення вхідних текстів. Вихідний формат після оброблення категоризатором на базі синтезованої моделі має такий формат:

Кількість категорій, що увійшла у документ:

Numberofcategories = 7.

Виявлена релевантна категорія із скорингом:

Category: Нові зараження (new_cases) (relevance = 11.0). Ключові слова, що було виявлено із їхніми позиціями у документі: Match (1429-1438): "вірус", Match (1429-1447): "коронавірусна хвороба", Match (1622-1632): "заразився", Match (2383-2393): "випадок", Match (2509-2519): "інфіковано".

Category: Одужали (recovered) (relevance = 9.0): Match (203-215): "одужало", Match (679-696): "побороти", Match (806-822): "побороти", Match (1131-1143): "перехворіти", Match (1317-1329): "Перехворіти ", Match (3304-3325): " одужали", Match (3378-3392): "виліковано", Match (3503-3514): "Побороти", Match (4521-4533): "виписані".

Зручний вихідний формат дає змогу не тільки класифікувати фрагменти, а ще й локалізувати номери символів у тексті.

У підсумку всі дані (текст, клас, скоринговий бал) заносяться до таблиці у базу даних.

ВИСНОВКИ

Розроблено методики та прийоми щодо аналізу текстів публічних та спеціалізованих джерел з метою ідентифікації факторів різної природи у завданнях передбачення та системного аналізу. Розроблено комбінований підхід до вилучення понять і побудови класифікаторів та онтологій за допомогою відкритих і пропріетарних пакетів програмного забезпечення.

Досліджено сучасні підходи, методи та моделі збереження великих обсягів слабо структурованої інформації з наборів програмного забезпечення OpenSource. Вивчено останні публікації за три роки за тематикою підходів до структуризації джерел слабо структурованої інформації.

Вивчено та структуровано потенційні джерела слабо структурованої інформації та типи документів, що можуть надходити цими джерелами. Вивчено можливості щодо зчитування змісту документів з джерел слабо структурованої інформації та сформовано вимоги й обмеження відповідно до форматів, способів доступу та авторських прав/ліцензій щодо легальності зчитування та копіювання інформації.

Як засоби побудови онтологій використовується ієрархічний класифікатор із набору SAS® Textual Analytics, а саме SAS® Content Categorization Studio. У складі пакета SAS® Textual Analytics є також пакет SAS® Ontology Management Studio, проте він дозволяє побудувати тільки загальну онтологію, але не має можливості застосовувати її як класифікуючу систему.

У відкритому програмному забезпеченні для класифікації, що має у складі підходи ML, є проблеми наявності початкового розміченого корпусу для тренування класифікатора й обмеженість потужності понять та концептів у корпусі типу «що маємо, те й на виході».

Досліджений комбінований підхід має переваги використання навіть малого корпусу (спеціально для дослідження на прикладі COVID-19 взято всього 300 текстів новин). Побудовано онтологію, у листя якої імplementовано класифікатор на булевих правилах. Для побудови онтології використано підхід побудови векторів близьких понять за допомогою бібліотеки OpenSource програмного забезпечення Gensim — модель Word2Vec. Протестовано декілька предметних галузей, зокрема тематику COVID-19 і «Підземну та наземну інфраструктури мегаполіса».

Розроблено типовий алгоритм побудови класифікуючої онтології.

Результати дослідження можуть використовуватись для побудови онтології предметних галузей, створення класифікуючих онтологій та марку-

вання корпусів текстів для подальшого використання для моделювання та дослідження предметних галузей, зокрема для завдань планування та передбачення в різних предметних галузях в умовах надходження великих обсягів слабо структурованої інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. I.V. Feskov, “NU “OUA” Basic methods of hybrid warfare in the modern information society”, *Current policy issues*, vol. 58, pp. 66–76, 2016.
2. Mikhail Z. Zgurovsky and N.D. Pankratova, *System Analysis: Theory and Applications*. Springer, 2007.
3. *Articles 164-9, 164-13 Code of Ukraine on Administrative Offenses*.
4. Judge Berzon, “hiQ Labs, Inc. vs. LinkedIn Corporation Opinion”, *United States Court of Appeals for the Ninth Circuit*, September 9, 2019. Available: <http://cdn.ca9.uscourts.gov/datastore/opinions/2019/09/09/17-16783.pdf>.
5. *RabbitMQ*. Available: <https://www.rabbitmq.com>
6. *Elasticsearch*. Available: <https://www.elastic.co>
7. *DCMI Dublin Core Metadata Initiative*. Available: <http://dublincore.org>.
8. *SIOC Project*. Available: <http://sioc-project.org>.
9. *SKOS Simple Knowledge Organization System*. Available: <http://www.w3.org/2004/02/skos/>.
10. M. Korobov, “Morphological Analyzer and Generator for Russian and Ukrainian Languages”, *Analysis of Images, Social Networks and Texts*, pp. 320–332, 2015.
11. R. Rehu^аrek and P. Sojka, “Software framework for topic modelling with large corpora”, *LREC*, 2010.
12. G. Chakraborty, M. Pagolu, and S. Garla, *Text Mining and Analysis. Practical Methods, Examples, and Case Studies Using SAS®*. SAS Institute Inc., 2013.

Надійшла 16.11.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Volodymyr V. Savastyanov, ORCID: 0000-0002-2052-0420, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: vvs.in.ua@gmail.com

DEVELOPMENT OF TEXTUAL ANALYTICS TOOLS FOR ANALYSIS OF PUBLIC AND SPECIALIZED SOURCES IN THE TASKS OF FORESIGHT AND SYSTEM ANALYSIS / V.V. Savastyanov

Abstract. A combined approach to extracting concepts and constructing classifiers and ontologies using open and proprietary software packages has been developed. Modern approaches, methods and models of storing large amounts of poorly structured information from Open Source software sets are studied. An ontology was built, in the leaves of which a classifier based on Boolean rules was implemented using SAS(R) Content Categorization Software. To build the ontology, the approach of constructing vectors of related concepts is employed using the Open Source library of Gensim software, namely the Word2Vec model. A typical algorithm for constructing a classifying ontology has been developed. The results of the research can be used to build an ontology of subject areas, create classification ontologies and mark corpora of texts.

Keywords: systems analysis, foresight, text mining, NLP, classifiers, ontologies, Open Source, Python, Gensim.

РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕКСТОВ ПУБЛИЧНЫХ И СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ЗАДАЧАХ ПРЕДВИДЕНИЯ И СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА / В.В. Савастьянов

Аннотация. Разработан комбинированный подход по извлечению понятий и построения классификаторов и онтологий с помощью открытых и проприетарных пакетов программного обеспечения. Исследованы современные подходы, методы и модели хранения больших объемов слабоструктурированной информации из наборов программного обеспечения OpenSource. Построена онтология, в листях которой реализован классификатор на булевых правилах с применением программного обеспечения SAS (R) Content Categorization Software. Для построения онтологии используется подход построения векторов близких понятий с помощью библиотеки Open Source Gensim, а именно модель Word2Vec. Разработан типовой алгоритм построения классифицирующей онтологии. Результаты исследования могут быть использованы для построения онтологий предметных областей, создания классифицирующих онтологий и разметки корпусов текстов.

Ключевые слова: системный анализ, предвидение, text mining, NLP, классификаторы, онтологии, OpenSource, Python, Gensim.



**USING COGNITIVE MAPS TO STUDY ISSUES CONCERNING
THE IMPROVEMENT OF THE QUALITY OF LIFE OF POPULA-
TION IN THE FRAME OF INTERREGIONAL DISPARITIES**

V.N. TYUSHNYAKOV, Y.G. TKACHENKO

Abstract. This paper studies issues of the rise in the standards of living and improvement of the quality of life of the population in the frame of intermunicipal disparities. Simulation and modelling are examined in relation to research of standards of living and quality of life. Tools of cognitive modelling and simulation are used to acquire new knowledge on the regional social and economic, ecological, and political system which determines the standards of living and quality of life. A cognitive model studying the quality of life was designed and its structural properties were analyzed. Scenarios were created to model possible developments of the situation under the influence of various factors. The novelty of the work is in applying a new informational technology of cognitive modelling to studying the improvement of the quality of life in the frame of intermunicipal disparities.

Keywords: cognitive modelling, quality of life of population, standards of living, regional development, intermunicipal disparities.

INTRODUCTION

With the RF pursuing the innovative socially-oriented development of economy in accordance with [1], it will be necessary to carry out a number of reforms inter-related in terms of resource and time limitations. In respect of human potential, it is supposed that an enabling environment should be created to develop an individual's talents and skills, improve people's quality of life and social welfare, provide a competitive edge to people and develop the related supporting socially-oriented economic sectors.

These reforms in accordance with the concept aim at 'overcoming negative demographic trends, stabilizing the population and providing for its growth, improving the population's quality of life; ensuring steady pay rise; providing access to quality education and medical care, ensuring safety and order; providing affordable and quality housing for people, creating comfortable urban environment and efficient public utility sector, developing a flexible population relocation system taking into account regional and national diversity...

A greater number of scientists have recently been using the notion of social stratification which refers to a society's categorization into groups based on such

criteria as income level or lifestyle, the existence or absence of privileges. Based on the social stratification, the standard of living indicator may be represented as the part of people who belong to a certain social stratum.

It is a rather complex and painstaking process to study and estimate people's standards of living and quality of life. Development and implementation of innovative tools analyzing the quality of life would solve a number of complex tasks while estimating the population's quality of life [2–4]. This paper suggests using cognitive techniques to study issues of the people's quality of life improvement, scientific prediction, and cognitive analysis of socioeconomic development of the region amid interregional disparities [5–8].

Cognitive modelling of complex objects includes development of a cognitive model of the system under the study (signed directed graph, functional graph); analysis of the developed model properties (complexity, stability, sensitivity); analysis of paths and cycles; scenario modelling; making the decision on the selection of the scenario most feasible for the implementation [9–16].

The cognitive study of the issues of the population's quality of life improvement in the frame of interregional disparities yielded the Standards of Living and Quality of Life (SL&QL) model as a hierarchical cognitive map which generalizes causal relations between socioeconomic development indicators at the regional level [17–27].

DEVELOPMENT OF THE SL&QL COGNITIVE MODEL

To develop the SL&QL model, the theory and practical provisions on the quality of life, as well as statistics, expert surveys, and results of a SWOT analysis [2, 3, 28] were used.

During the initial modelling phase, the research objective was formulated and approved; theoretical evidence and statistics were collected, and expert surveys were carried out. As a result of data processing, a set of vertices $V = \{v_i\}$ was created and relationships $E = \{e_{ij}\}$, $j = 1, 2, \dots, k$ between the vertices were mapped $G = \langle V, E \rangle$. The relationships can be defined as weighting factors w_{ij} and functions $F = \{f_{ij}\}$.

Table 1 contains the vertices which are the influences affecting the people's standards of living and quality of life in the region.

Table 1. Vertices of the cognitive map G_0 "The Standards of Living and Quality of Life"

Code	Vertex name	Vertex assignment
V_1	Quality of life in the region	Target
V_2	Living standards in the region	Target
V_3	Gross Regional Product	Indicative
V_4	Regional and municipal budgets	Basic
V_5	Ecological situation	Basic
V_6	State of education	Basic
V_7	Health status	Basic
V_8	Social environment	Basic
V_9	Social inequality	Outrageous
V_{10}	Demographic indicators	Indicative

Continued tabl. 1

Code	Vertex name	Vertex assignment
V_{11}	Industrial production	Manager
V_{12}	Agricultural production	Manager
V_{13}	Labor market	Outrageous
V_{14}	The salary	Managed
V_{15}	Population income	Basic
V_{16}	Inter-municipal differentiation	Outrageous
V_{17}	Regional migration	Outrageous
V_{18}	Investment climate	Basic
V_{19}	State policy in the field of improving the quality of life	Manager
V_{20}	Security (economic, social, environmental, legal)	Outrageous
V_{21}	Geopolitical situation	Outrageous

For the SL&QL cognitive map G , see Fig. 1. To create cognitive map G , the tools of the information-analytical Cognitive Modeling Software System (CMSS) were used [29]. In Fig.1, positive links are shown as solid lines. When the value of the signal at vertex V_i increases or vice versa, the value of the signal at V_j increases or decreases. Negative links are shown as dashed lines. When the value of the signal at vertex V_i increases or vice versa, the value of the signal at V_j decreases or increases.

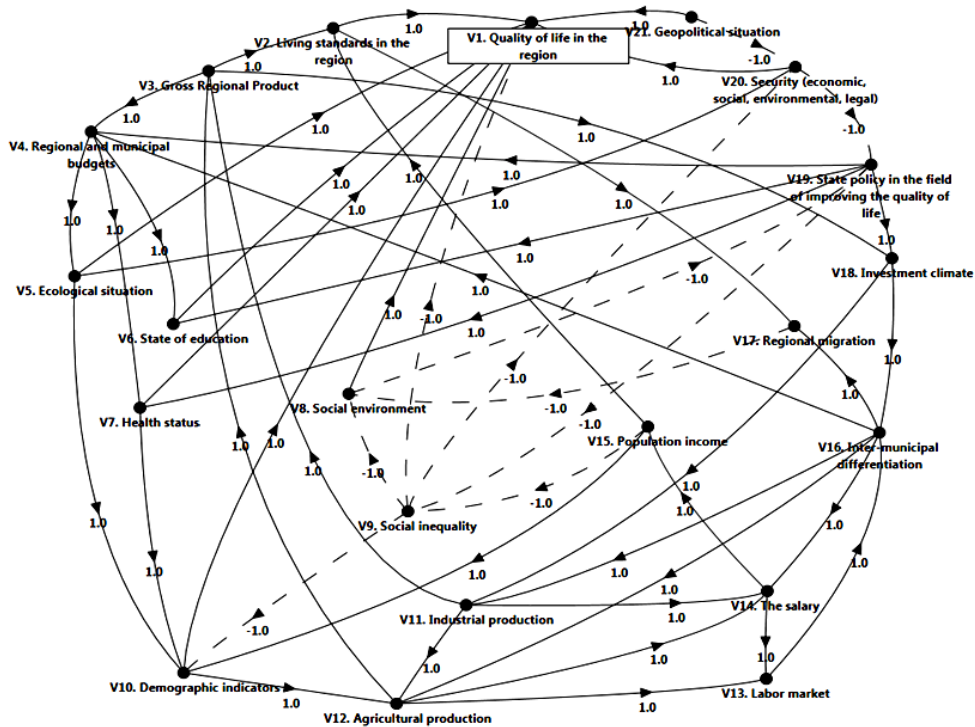


Fig. 1. The cognitive map G

During the second phase, the system stability for disturbances as well as the structural stability were analyzed.

When analyzing the system stability for disturbances, the roots were found for a characteristic equation of the relational matrix of SL&QL graph G . Solving the characteristic equation is shown in Fig. 2. As the maximum absolute value of $|M| = 2 > 1$, then in accordance with the accepted criterion [30, 31], the system under study is unstable for disturbances and requires control.

Eigenvalues			
#	Real part	Imaginary part	Module (2,0007)
0	2,0007	0,0	2,0007
1	-0,1004	1,5721	1,5721
2	-0,1004	-1,5721	1,5721
3	0,7457	1,1233	1,1233
4	0,7457	-1,1233	1,1233
5	-1,1555	0,6208	1,1555
6	-1,1555	-0,6208	1,1555
7	-0,2267	0,9673	0,9673
8	-0,2267	-0,9673	0,9673
9	0,4402	0,5623	0,5623
10	0,4402	-0,5623	0,5623
11	-1,029	0,0	1,029

Fig. 2. The roots for a characteristic equation of the graph G

The analysis of positive and negative cycles of graph G allows concluding the model is structurally stable [9, 10, 30, 31]. For results of the computing experiment, see Fig. 3.

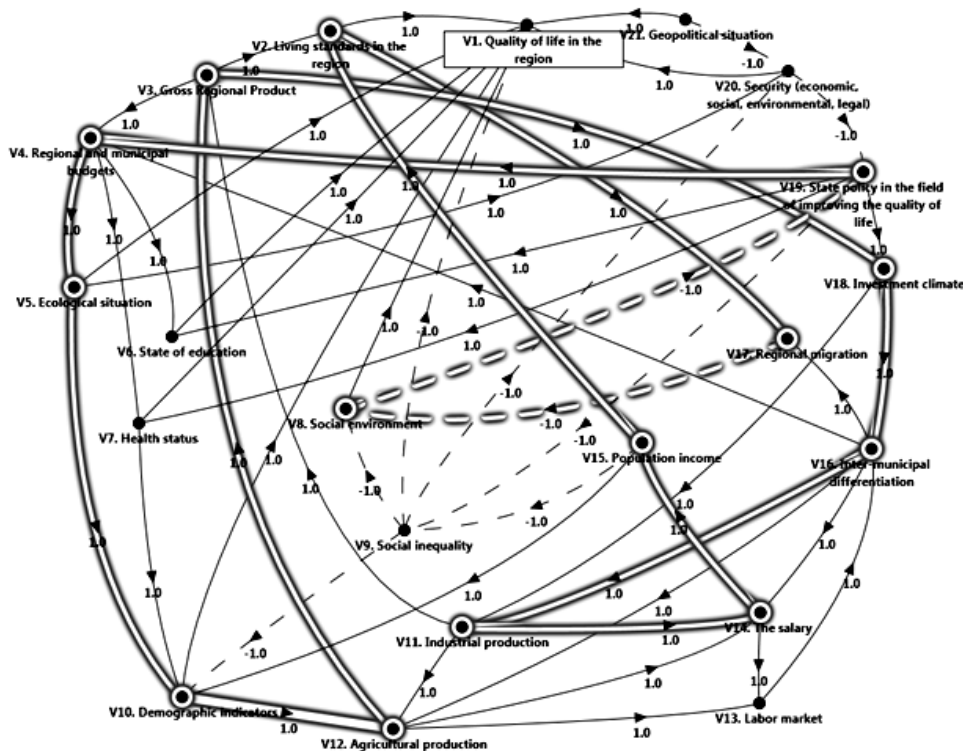


Fig. 3, a. The cycle of the graph G

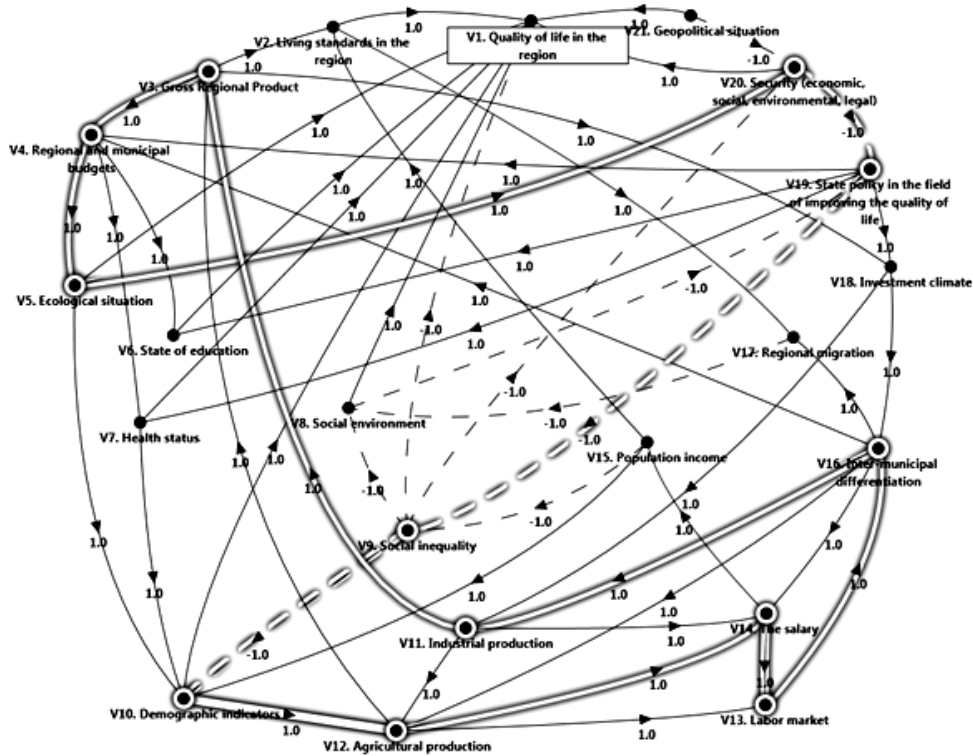


Fig. 3, b. The cycle of the graph G

In Fig. 3, as an example, the negative cycle which stabilizes the system (the upper graph) and the positive cycle which accelerates processes (the lower graph) are highlighted. SL&QL graph G includes 232 cycles, of which 101 are negative. An odd number of negative feedback cycles in graph G proves the system under consideration is structurally stable [30, 31].

SCENARIO MODELLING IN GRAPH G

The next step in the cognitive study involves pulse modeling of possible situation development scenarios on the regional level with the various controlling, restricting, and disturbing influences considered. When simulating possible system behavior scenarios, in the cognitive map at moment n signals are added as pulses q_i , at vertices V_i , the combination of which forms disturbance and control vector $Q(n) = \{q_1, \dots, q_k\}$.

Prior to modelling scenarios in the SL&QL cognitive map, the computing experiment plan was worked out, which is a set $\{Q(n)\}$ which represents possible system behavior trends when the relevant control or disturbance influences are added.

Fig. 4 illustrates how the situation develops under conditions of a pulse process in accordance with scenario 1. Let us assume the state's social welfare policies are improving: $q_{19} = +1$.

Scenario 1. $Q_1(n) = \{q_1 = 0, \dots, q_{19} = +1, \dots, q_{21} = 0\}$.

Table 2 contains results of the computing experiment.

The acquired results are represented in the respective line charts which are drawn based on the results of the pulse process calculation (see Table 2). For the line charts most demonstrable in respect of the situation development trends at some vertices of graph G , see Fig. 4.

Table 2. Calculation of impulse processes in accordance with the scenario 1

Vertex	Step									
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
V_1 . Quality of life in the region	0,0	0,0	0,0	3,0	10,0	13,0	10,0	10,0	10,0	41,0
V_2 . Living standards in the region	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	8,0	16,0	18,0	18,0
V_3 . Gross Regional Product	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	6,0	9,0	8,0	21,0	21,0
V_4 . Regional and municipal budgets	0,0	0,0	1,0	1,0	2,0	1,0	5,0	14,0	28,0	28,0
V_5 . Ecological situation	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	2,0	1,0	5,0	14,0	14,0
V_6 . State of education	0,0	0,0	1,0	2,0	2,0	1,0	-1,0	4,0	16,0	16,0
V_7 . Health status	0,0	0,0	1,0	2,0	2,0	1,0	-1,0	4,0	16,0	16,0
V_8 . Social environment	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	0,0	-2,0	-2,0	-8,0	-8,0
V_9 . Social inequality	0,0	0,0	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	0,0	-6,0	-12,0	-12,0
V_{10} . Demographic indicators	0,0	0,0	0,0	2,0	4,0	4,0	4,0	7,0	25,0	25,0
V_{11} . Industrial production	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	2,0	1,0	10,0	26,0	26,0
V_{12} . Agricultural production	0,0	0,0	0,0	0,0	4,0	7,0	7,0	11,0	35,0	35,0
V_{13} . Labor market	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,0	14,0	17,0	25,0	25,0
V_{14} . The salary	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	7,0	10,0	14,0	39,0	39,0
V_{15} . Population income	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	7,0	10,0	14,0	14,0
V_{16} . Inter-municipal differentiation	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	6,0	18,0	25,0	25,0
V_{17} . Regional migration	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	2,0	14,0	34,0	34,0
V_{18} . Investment climate	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	0,0	4,0	8,0	10,0	10,0
V_{19} . State policy in the field of improving the quality of life	0,0	1,0	1,0	1,0	-1,0	-2,0	-1,0	2,0	2,0	2,0
V_{20} . Security (economic, social, environmental, legal)	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	2,0	1,0	1,0	11,0	11,0
V_{21} . Geopolitical situation	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

In accordance with Table 2 and Fig. 4, adding pulse $q_{19} = +1$ at vertex V_{19} (the state’s social welfare policies) will yield positive results. Positive growing trends may be traced at the vertices of interest, e.g., at V_1 and V_2 . At the same time, processes at ‘undesirable’ vertices tend to decrease, e.g., social inequality is reducing (vertex V_9) as well as intermunicipal disparities are narrowing (vertex V_{16}). However, the quality of life though tending to improve slightly during the 2nd modelling step then decreases, and a considerable improvement of the trend can only be observed during step 10. This indicates that a single influence at a vertex might not be enough to achieve the goal of improving the functioning of the SL&QL system in whole.

Now let us get to scenario 2 and assume that intermunicipal integration is developing $q_{16} = +1$.

Scenario 2. $Q_2(n) = \{q_1 = 0, \dots, q_{16} = +1, \dots, q_{21} = 0\}$.

For results of the computing experiment carried out under scenario 2, see Table 3.

For the line charts most demonstrable in respect of the situation development trends at some vertices of graph G , scenario 2 see Fig. 5.

Table 3. Calculation of impulse processes in accordance with the scenario 2

Vertex	Step									
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	
V_1 . Quality of life in the region	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	10,0	29,0	52,0	76,0	
V_2 . Living standards in the region	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	6,0	7,0	18,0	51,0	
V_3 . Gross Regional Product	0,0	0,0	0,0	2,0	3,0	3,0	12,0	31,0	52,0	
V_4 . Regional and municipal budgets	0,0	0,0	1,0	1,0	3,0	7,0	11,0	21,0	43,0	
V_5 . Ecological situation	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	3,0	7,0	11,0	21,0	
V_6 . State of education	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	4,0	7,0	9,0	16,0	
V_7 . Health status	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	4,0	7,0	9,0	16,0	
V_8 . Social environment	0,0	0,0	0,0	-1,0	-1,0	0,0	-2,0	-10,0	-14,0	
V_9 . Social inequality	0,0	0,0	0,0	0,0	-1,0	-4,0	-4,0	-4,0	-15,0	
V_{10} . Demographic indicators	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	6,0	15,0	24,0	44,0	
V_{11} . Industrial production	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	5,0	12,0	14,0	27,0	
V_{12} . Agricultural production	0,0	0,0	1,0	2,0	2,0	7,0	19,0	38,0	55,0	
V_{13} . Labor market	0,0	0,0	0,0	2,0	5,0	6,0	13,0	39,0	80,0	
V_{14} . The salary	0,0	0,0	1,0	3,0	4,0	6,0	20,0	42,0	69,0	
V_{15} . Population income	0,0	0,0	0,0	1,0	3,0	4,0	6,0	20,0	42,0	
V_{16} . Inter-municipal differentiation	0,0	1,0	1,0	1,0	3,0	8,0	11,0	17,0	50,0	
V_{17} . Regional migration	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	6,0	14,0	18,0	35,0	
V_{18} . Investment climate	0,0	0,0	0,0	0,0	2,0	4,0	3,0	10,0	26,0	
V_{19} . State policy in the field of improving the quality of life	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	-2,0	-5,0	-1,0	
V_{20} . Security (economic, social, environmental, legal)	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	2,0	7,0	11,0	15,0	
V_{21} . Geopolitical situation	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

Adding pulse $q_{16} = +1$ at vertex V_{16} (intermunicipal disparities) also gives positive results: production is developing and people's income is growing.

Let us consider a more complex scenario where social and economic security is declining $q_{20} = -1$ but intermunicipal integration is developing $q_{16} = +1$ and the state's social welfare policies are improving $q_{19} = +1$.

Scenario 3. $Q_3(n) = \{q_1 = 0, \dots, q_{16} = +1, \dots, q_{19} = +1, q_{20} = -1, \dots, q_{21} = 0\}$.

The calculation of the pulse processes under scenario 3 is given in Table 4.

Table 4 contains results of the calculation experiment carried out under scenario 3.

Table 4. Calculation of impulse processes in accordance with the scenario 3

Vertex	Step									
	0,0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	
V_1 . Quality of life in the region	0,0	0,0	-1,0	2,0	14,0	32,0	51,0	71,0	126,0	
V_2 . Living standards in the region	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	7,0	16,0	42,0	85,0	
V_3 . Gross Regional Product	0,0	0,0	0,0	2,0	4,0	10,0	27,0	48,0	81,0	
V_4 . Regional and municipal budgets	0,0	0,0	2,0	3,0	6,0	10,0	17,0	40,0	85,0	
V_5 . Ecological situation	0,0	0,0	0,0	2,0	3,0	6,0	10,0	17,0	40,0	
V_6 . State of education	0,0	0,0	1,0	4,0	5,0	7,0	7,0	12,0	36,0	
V_7 . Health status	0,0	0,0	1,0	4,0	5,0	7,0	7,0	12,0	36,0	

Continued tabl. 4

Vertex	Step									
V_8 . Social environment	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0	-4,0	-14,0	-24,0	
V_9 . Social inequality	0,0	0,0	-1,0	-2,0	-3,0	-4,0	-3,0	-10,0	-33,0	
V_{10} . Demographic indicators	0,0	0,0	0,0	2,0	9,0	14,0	23,0	35,0	76,0	
V_{11} . Industrial production	0,0	0,0	1,0	2,0	4,0	9,0	15,0	25,0	63,0	
V_{12} . Agricultural production	0,0	0,0	1,0	2,0	6,0	18,0	33,0	56,0	101,0	
V_{13} . Labor market	0,0	0,0	0,0	2,0	5,0	12,0	33,0	70,0	122,0	
V_{14} . The salary	0,0	0,0	1,0	3,0	6,0	15,0	37,0	66,0	122,0	
V_{15} . Population income	0,0	0,0	0,0	1,0	3,0	6,0	15,0	37,0	66,0	
V_{16} . Inter-municipal differentiation	0,0	1,0	1,0	2,0	5,0	10,0	18,0	41,0	93,0	
V_{17} . Regional migration	0,0	0,0	1,0	1,0	2,0	8,0	17,0	34,0	83,0	
V_{18} . Investment climate	0,0	0,0	1,0	2,0	4,0	5,0	7,0	22,0	44,0	
V_{19} . State policy in the field of improving the quality of life	0,0	1,0	2,0	2,0	1,0	-3,0	-5,0	-4,0	3,0	
V_{20} . Security (economic, social, environmental, legal)	0,0	-1,0	-1,0	0,0	3,0	5,0	9,0	12,0	26,0	
V_{21} . Geopolitical situation	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	

For the line charts most demonstrable in respect of the situation development trends at some vertices of graph G , scenario 3 see Fig. 6.

Scenario 3 shows how events in the system will develop if, with the deterioration of the heopolytic situation ($q_{20} = -1$), inter-municipal differentiation $q_{16} = +1$ and sound State policy in the field of improving the quality of life ($q_{19} = +1$).

In this case, perturbations are introduced into three vertices.

As can be seen from Fig. 6, joint action successfully resists the deterioration of the geopolitical situation.

The trend of the development of situations at all peaks can be considered positive. All indicators, with the exception of negative ones, increase, negative ones (reduced security, social inequality) decrease.

At the same time, if we compare the results of modeling according to scenario 2, it can be seen that the processes are developing more intensively.

CONCLUSIONS

Cognitive modelling tools are a good management decision support instrument when complex systems are studied. This was proved by the cognitive analysis of the standards of living and quality of life. Analysis of the results of modelling the complex system's properties and behavior allows studying its desirable and undesirable features, developing and validating control strategies for a system containing a great number of objects and interrelations under circumstances of uncertainty and lack of empirical data.

Using cognitive simulation modelling, this paper studies how different factors affect people's standards of living and quality of life. The designed cognitive model allowed analyzing scenarios of the situation evolution when various factors affecting the standards of living and quality of life change in the frame of interregional disparities.

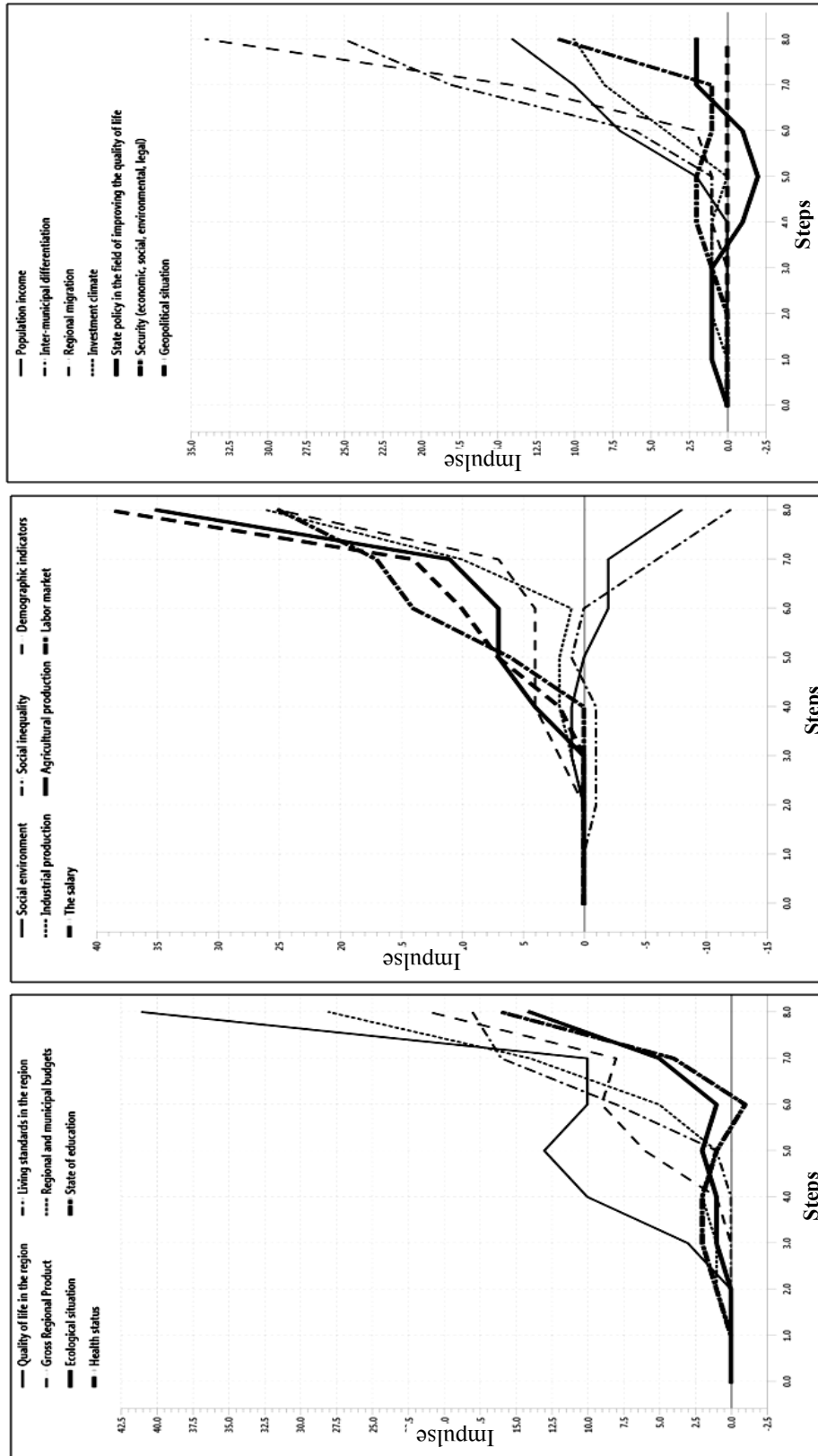


Fig.4. Graphs of impulse processes at the vertices of the cognitive map, scenario 1

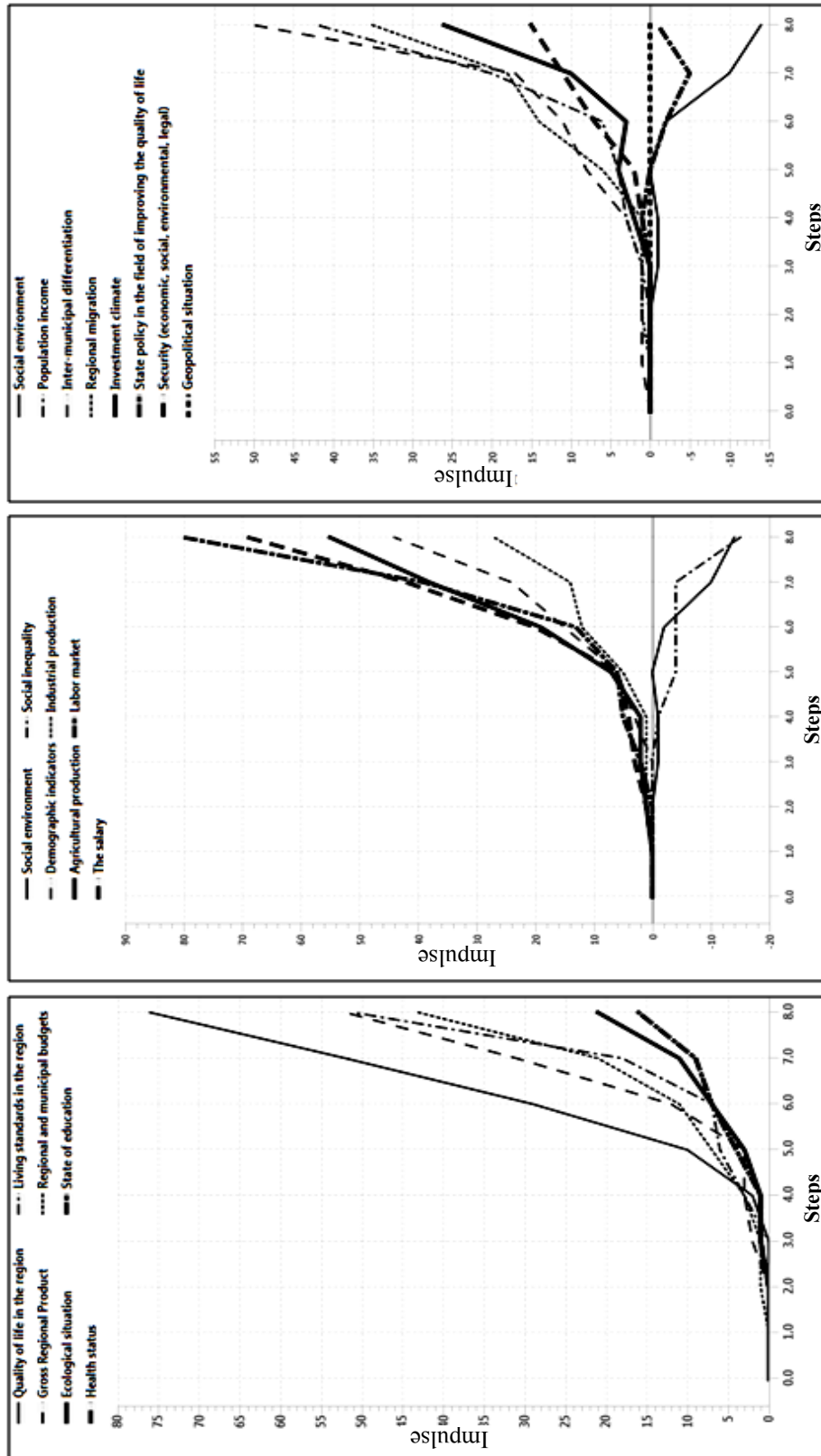


Fig.5. Graphs of impulse processes at the vertices of the cognitive map, scenario 2

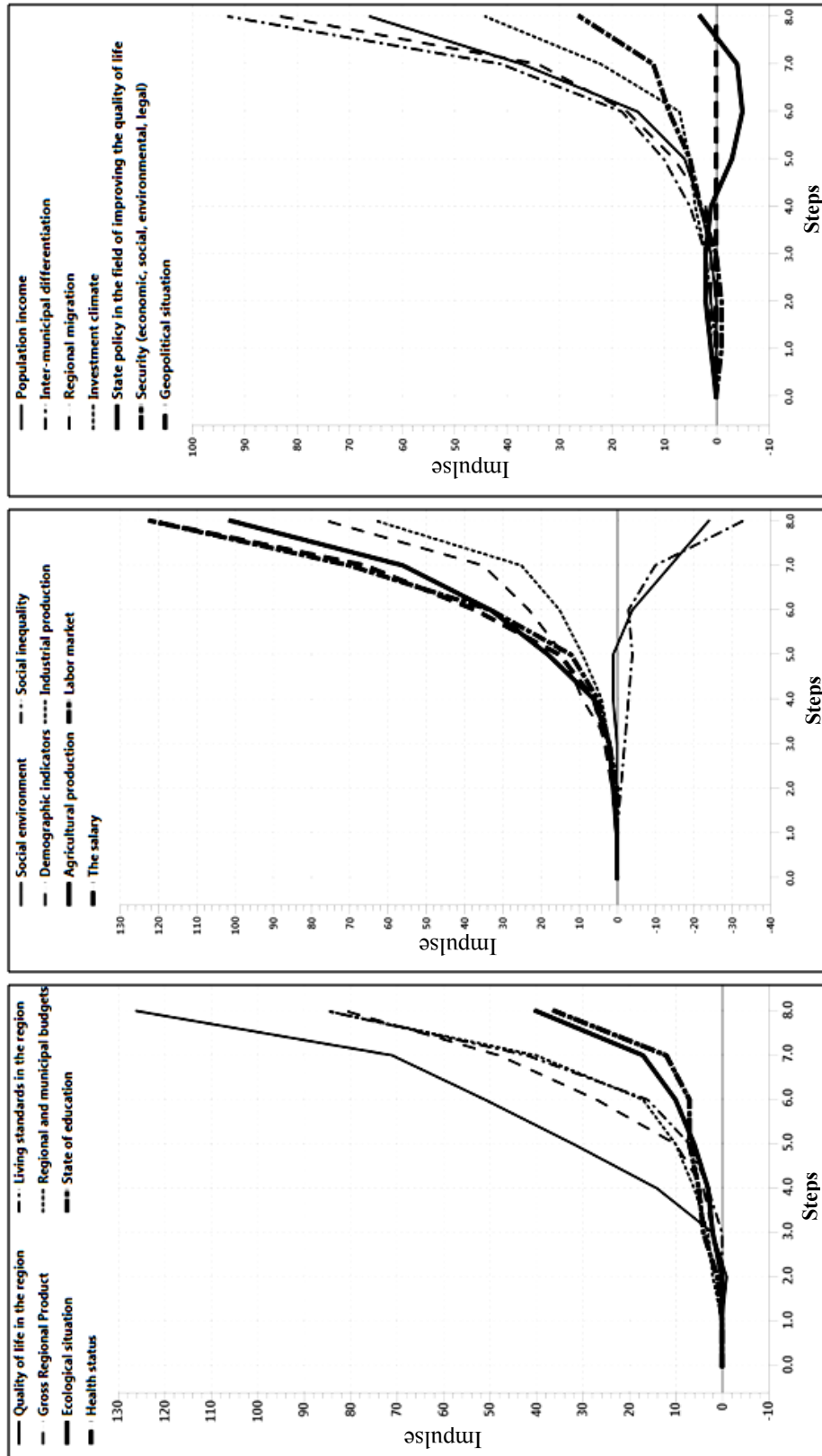


Fig. 6. Graphs of impulse processes at the vertices of the cognitive map, scenario 3

It demonstrates that the local authorities need to participate in improving the people's quality of life and rising the standards of living to overcome negative demographic trends, reduce poverty, narrow the gap between the poor and the rich. As it has been noted earlier, the agricultural support slightly reduced disparity between the region's districts but the outpacing growth of the industry and commerce sector increases the income inequality of those employed in different sectors of economy. It is proposed that local authorities, taking into consideration municipal initiatives, should establish growth areas in relatively depressed territories by actively motivating the people and businesses. The long-term development concept should be the single basis for the measures, which incorporates estimates and suggestions of professional economists, managers, financial experts, industrialists, farmers, and social workers.

FUNDING

The study was carried out with funding from RFBR, project #20-010-00815 A "Development of the Concept of the Quality of Life Improvement and Standards of Living Rising for the Region's Population in the Frame of Intermunicipal Disparities, in Line with Economy Digitalization Trends".

REFERENCES

1. Order of the Government of the Russian Federation of November 17, 2008 No. 1662 "On the Concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period up to 2020" (as amended on September 28, 2018).
2. P.I. Ibragimova and B.Sh. Dadaeva, "The quality of life of the population as the main indicator of the socio-economic development of the country", *Modern trends in education and science*. Tambov, 2013, pp. 74–76.
3. A.A. Kisurkin, *Quality of life of the population: regional socio-economic aspects*. Abakan: GOU VPO "Khakass State University named after N.F. Katanova", 2010, 216 p.
4. T.N. Kozlova, "The quality of life of the population as an important indicator of the state of society", *Materials of the All-Russian NPK "Economics and Management: Problems and Development Prospects"*. Makhachkala: Mavraev, 2012, pp. 165–175.
5. Z.K. Avdeeva, G.V. Gorelova, and S.K. Kovriga, "Cognitive studies of the quality of life of the city population", *Proceedings of the VII International Forum on Cognitive Modeling (IFCM-2019)*, pp. 206–214.
6. G.V. Gorelova and V.N. Tyushnyakov, "Application of digital technologies in state and municipal administration", *ASU Bulletin "Economy"*, no. 4 (250), pp. 134–145, 2019.
7. E.V. Zhertovskaya, M.V. Yakimenko, and V.N. Tyushnyakov, "Simulation modeling of innovative development of regions of southern Russia based on the composition of cognitive modeling and methods of program-project management for solving strategic management problems", *Basic research*, no. 12-5, pp. 1017–1023, 2015.
8. Yu.G. Tkachenko and V.N. Tyushnyakov, "Simulation modeling of the living standards of the region's population", *System analysis in design and management: collection of scientific papers of the XXIV International scientific and educational-practical conference*, October 13–14, 2020. SPb.: POLITECH-PRESS, 2020, pp. 96–103.
9. G.V. Gorelova, "On cognitive modeling of complex systems, research tools", *Izvestiya TTI SFU*, issue 6. Taganrog: TTI SFU, 2012, pp. 236–240.
10. G.V. Gorelova, E.N. Zakharova, and S.A. Radchenko, *Study of semi-structured problems of socio-economic systems: a cognitive approach*. Rostov-on-Don: RGU, 2006, 332 p.
11. *Innovative development of socio-economic systems based on foresight and cognitive modeling methodologies. Collective monograph*; ed. G.V. Gorelova, N.D. Pankratova. Kiev: Publishing house "Naukova Dumka", 2015, 464 p.

12. V.V. Kulba, D.A. Kononov, I.V. Chernov, and S.S. Yanich, "State administration scenarios (on the example of the Union of Serbia and Montenegro)", *Management problems*, no. 5, pp. 33–41, 2005.
13. R. Axelrod, *The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites/Princeton*. University Press, 1976, 395 p.
14. G.V. Gorelova and N.D. Pankratova, "Scientific Foresight and Cognitive Modeling of Socio-Economic Systems", *18th IFAC Conference on Technology, Culture and International Stability*, pp. 145–149, 2018.
15. G.V. Gorelova, N.D. Pankratova, and D.V. Borisova, "Problems of interregional integration, cognitive modeling", *Proceedings Paper of 19th International-Federation-of-Automatic-Control (IFAC) Conference on Technology, Culture and International Stability (TECIS)*, vol. 52, no. 25, pp. 168–173, 2019.
16. P. Langley, "Cognitive architectures: Research issues and challenges", *Cognitive Systems Research*, vol. 10, no. 2, pp. 141–160, 2009.
17. G.V. Gorelova, E.V. Zhertovskaya, V.N. Tyushnyakov, and M.V. Yakimenko, "Development of a regional development strategy based on the synthesis of foresight and cognitive modeling methodologies", *Proceedings of the International Multiconference "Networking Partnership in Science, Industry and Education"*, pp. 59–66, 2016.
18. Z. Avdeeva and S. Kovriga, "The technology of the strategic goal-setting and monitoring of a system development on the basis of cognitive mapping", *Procedia Computer Science*, 122, pp. 977–984, 2017.
19. Y. Chen, "Research on differences evaluation of economic development level between cities", *International Conference on Management and Service Science 2011*. doi: 10.1109/ICMSS.2011.5998764.
20. M.H.A.-G. Fawzi and T.A.-L. Aboul-Atta, "Determine the indicators that influence for measuring development at the regional level", *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 12, no. 7, pp. 1100–1109, 2019.
21. H. Garretsen, P. McCann, and R. Martin, "The future of regional policy", *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, vol. 6, no. 2, pp. 179–186, 2013.
22. J. Harrison and I. Turok, "Universities, knowledge and regional development", *Regional Studies*, vol. 51, no. 7, pp. 977–981, 2017. doi: 10.1080/00343404.2017.1328189.
23. K. Kourtit and P. Nijkamp, "Introduction: Regional innovation hotspots and spatial development", *Journal of Regional Science*, vol. 53, no. 5, pp. 745–748, 2013. doi: 10.1111/jors.12078.
24. F. Leriche and S. Daviet, "Cultural economy: An opportunity to boost employment and regional development", *Regional Studies*, vol. 44, no. 7, pp. 807–811, 2010. doi: 10.1080/00343401003732639.
25. D. Mocuța, C. Burcea, and M. Cernușcă-Mițariu, "Theoretical and practical indicators of life quality", *European Journal of Science and Theology*, vol. 10, no. 5, pp. 63–69, 2014.
26. A. Pike, A. Rodríguez-Pose, and J. Tomaney, "Shifting horizons in local and regional development", *Regional Studies*, vol. 51, no. 1, pp. 46–57, 2017. doi: 10.1080/00343404.2016.1158802.
27. B. Webb, "Shape and be shaped: The future dynamics of regional development", *Town Planning Review*, vol. 84, no. 6, pp. 795–799, 2013. doi: 10.3828/tp.2013.40.
28. J.K. Galbraith, "Economics and the quality of life", *Science*, vol. 145, no. 3628, pp. 117–123, 1964. doi: 10.1126/science.145.3628.117.
29. Program for cognitive modeling and analysis of socio-economic systems at the regional level. Certificate of state registration of computer programs No. 2018661506 dated 09/07/2018.
30. J. Casti, *Connectivity, complexity and catastrophe in large-scale systems*. Chichester-New-York-Brisbane-Toronto, 1979, 216 p.

31. F. Roberts, *Discrete Mathematical Models with Applications to Social, Biological, and Environmental Problems*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1976, 559 p.

Received 15.11.2020

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

INFORMATION ON THE ARTICLE

Vitaly N. Tyushnyakov, ORCID: 0000-0002-4460-5672, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: gimutvn@gmail.com

Yulia G. Tkachenko, ORCID: 0000-0002-0024-3534, Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation, e-mail: julikatka@yandex.ru

ЗАСТОСУВАННЯ КОГНІТИВНИХ КАРТ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЖИТТЯ НАСЕЛЕННЯ В УМОВАХ МІЖРЕГІОНАЛЬНОЇ ДИФЕРЕНЦІАЦІЇ / В.М. Тюшняков, Ю.Г. Ткаченко

Анотація. Роботу присвячено дослідженню питань підвищення рівня і якості життя населення в умовах міжмуниципальної диференціації. Розглянуто питання імітаційного моделювання під час дослідження рівня та якості життя населення. Інструменти когнітивного імітаційного моделювання використано для отримання нових знань про регіональну соціально-економічну, екологічну, політичну системи, що визначають рівень і якість життя населення. Розроблено когнітивну модель для дослідження якості життя, виконано аналіз її структурних властивостей, проведено сценарне моделювання можливого розвитку ситуацій під впливом різних факторів. Новизна роботи полягає в застосуванні нової інформаційної технології когнітивного моделювання до вивчення питань підвищення якості життя громадян в умовах міжмуниципальної диференціації.

Ключові слова: когнітивне моделювання, якість життя населення, рівень життя, регіональний розвиток, міжмуниципальна диференціація.

ПРИМЕНЕНИЕ КОГНИТИВНЫХ КАРТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОБЛЕМ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ МЕЖРЕГИОНАЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЦИИ / В.Н. Тюшняков, Ю.Г. Ткаченко

Аннотация. Работа посвящена исследованию вопросов повышения уровня и качества жизни населения в условиях межмуниципальной дифференциации. Рассмотрены вопросы имитационного моделирования при исследовании уровня и качества жизни населения. Инструменты когнитивного имитационного моделирования использованы для получения новых знаний о региональной социально-экономической, экологической, политической систем, определяющих уровень и качество жизни населения. Разработана когнитивная модель для исследования качества жизни, выполнен анализ ее структурных свойств, проведено сценарное моделирование возможного развития ситуаций под воздействием различных факторов. Новизна работы состоит в применении новой информационной технологии когнитивного моделирования к изучению вопросов повышения качества жизни граждан в условиях межмуниципальной дифференциации.

Ключевые слова: когнитивное моделирование, качество жизни населения, уровень жизни, региональное развитие, межмуниципальная дифференциация.

МАШИННЕ НАВЧАННЯ ПІД ЧАС ДІАГНОСТУВАННЯ І МОНІТОРИНГУ СОННОГО АПНОЕ

Д.А. ТКАЧЕНКО, І.В. КРУШ, В.Г. МИХАЛЬКО, А.І. ПЕТРЕНКО

Анотація. Розглянуто та проаналізовано використання сучасних підходів машинного навчання для визначення рівня тяжкості апное уві сні шляхом локалізації епізодів апное в часі та передбачення наступних епізодів апное. Продемонстровано, що за допомогою сигналів від доступних і портативних сенсорів можна з відносно високою точністю розв'язувати типові задачі з визначення апное уві сні, а також розглянуто основні публічні набори даних для тренування відповідних моделей машинного навчання та варіанти їх можливого використання. Зокрема, доведено, що застосування глибинного навчання може підвищити точність класифікації, локалізації та передбачення апное, особливо за допомогою використання більш складних моделей глибинного навчання, які враховують мультимодальні дані від декількох сенсорів.

Ключові слова: моніторинг, респіраторні хвороби, глибинне навчання, полісомнографія, сонне апное, CNN.

ВСТУП

Сонне апное (апное уві сні) є загальним захворюванням, яке вражає як дітей, так і дорослих. Воно характеризується періодами припинення дихання (апное) і періодами зниження дихання (гіпопное). Обидва типи подій мають подібну патофізіологію і, як правило, вважаються однаковими щодо їх впливу на пацієнтів. Найпоширенішу форму апное уві сні, що називається обструктивним апное уві сні, зумовлено частковим або повним колапсом верхніх дихальних шляхів. Обструктивний апное спричиняється механічними напруженнями на горлі, центральний апное сну — нездатністю мозку відсилати сигнал діафрагмі. Існує кілька методів кількісного оцінювання тяжкості розладу дихання, таких як вимірювання кількості апное та гіпопное за одну годину сну (тобто індекс апное-гіпопное (АHI), тяжкістю кисневого голодування під час сну (оксиметрія, SpO₂) або ступенем денної сонливості [1]. Поширеність АHI ≥ 5 становить 24% у чоловіків та 9% у жінок у віці від 30 до 60 років у пацієнтів, що підозрюються на апное сну.

Найточнішим методом для діагностування апное уві сні є полісомнографія [2]. Під час полісомнографії зазвичай записується принаймні 12 сигналів і використовуються щонайменше 22 дротові під'єднання до пацієнта, що проходить таку процедуру. Основним недоліком використання полісомнографії для визначення апное уві сні є те, що цей метод є відносно дорогим і незручним для пацієнта. Для виконання полісомнографії пацієнту необхідно провести ніч у спеціально обладнаній лабораторії або це потребує встановлення приладу вдома, а результати має визначити лікар. Крім цього, велика кількість під'єднаних дротів може впливати на поведінку під час сну.

Оскільки полісомнографія відносно дорогою і важкодоступний метод, вважається, що більшість людей із середнім або важким ступенем тяжкості апное не знає про свій діагноз, зокрема, у праці [3] виконано розрахунки і з'ясовано, що 93% жінок і 82% чоловіків не знають про наявність у них апное.

Останнім часом дедалі більшого поширення набувають мобільні і недорогі пристрої, які містять сенсори для вимірювання сигналів, що пов'язані з диханням, зокрема, сенсори для вимірювання ECG, рівня насиченості крові киснем, сенсори для фіксації та вимірювання різних респіраторних рухів та деякі інші. У багатьох працях показано, як за допомогою використання машинного навчання і даних від сенсорів можна визначати апное:

- бінарна класифікація та визначення індексу апное-гіпопное;
- локалізація апное у часі;
- передбачення наступного епізоду апное.

У цій роботі розглянуто і проаналізовано:

- основні сенсори і сигнали, що можна використовувати для визначення апное;
- наявні набори даних для тренування моделей машинного навчання;
- найбільш передові підходи і методи машинного навчання, які можна використовувати для розв'язування типових задач, пов'язаних з визначенням апное.

СИГНАЛИ ТА СЕНСОРИ

Розглянемо основні типи сигналів, які можна використовувати для визначення апное.

Електрокардіографія

Електрокардіографія дає змогу вимірювати електричну активність серця за допомогою електродів, які прикріплюються до тіла. Будь-яка пара таких електродів дозволяє вимірювати різницю їх потенціалів. Результатом електрокардіографії є електрокардіограма, що по суті є графіком напруги за часом. В електрокардіограмах у лікарнях і лабораторіях зазвичай наявні 10 електродів, але в портативних пристроях для вимірювання електрокардіограми може бути тільки два електроди. Кожна з вимірюваних різниць потенціалів електродів називається відведеннями (leads).

Один цикл кардіограми складається з Р-хвилі, QRS-комплексу, Т-хвилі (інколи і U-хвилі) (рис. 1).

Застосовуючи традиційні техніки машинного навчання, зазвичай спочатку обробляють ECG для отримання похідних сигналів, таких як кількість серцевих скорочень за хвилину (heart rate), варіативність серцевого ритму (heart rate variability), амплітуда QRS комплексу [5].

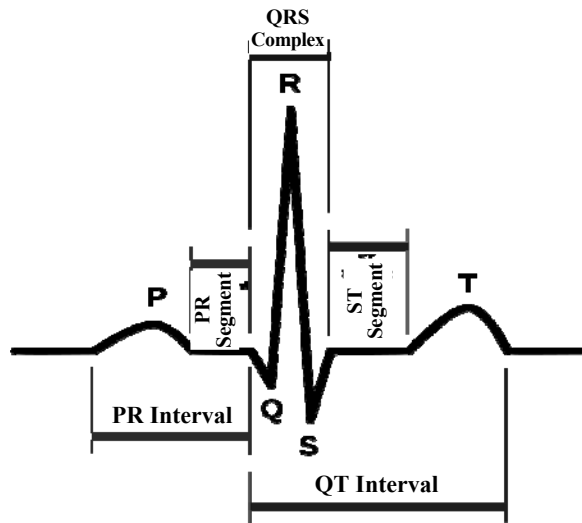


Рис. 1. Цикл кардіограми

За допомогою ECG можна визначати і респіраторні події, як наприклад у праці [6]. Як відрізняються RR-інтервали і площа QRS ділянок для нормального сну і для сну з апное показано на рис. 2 [7].

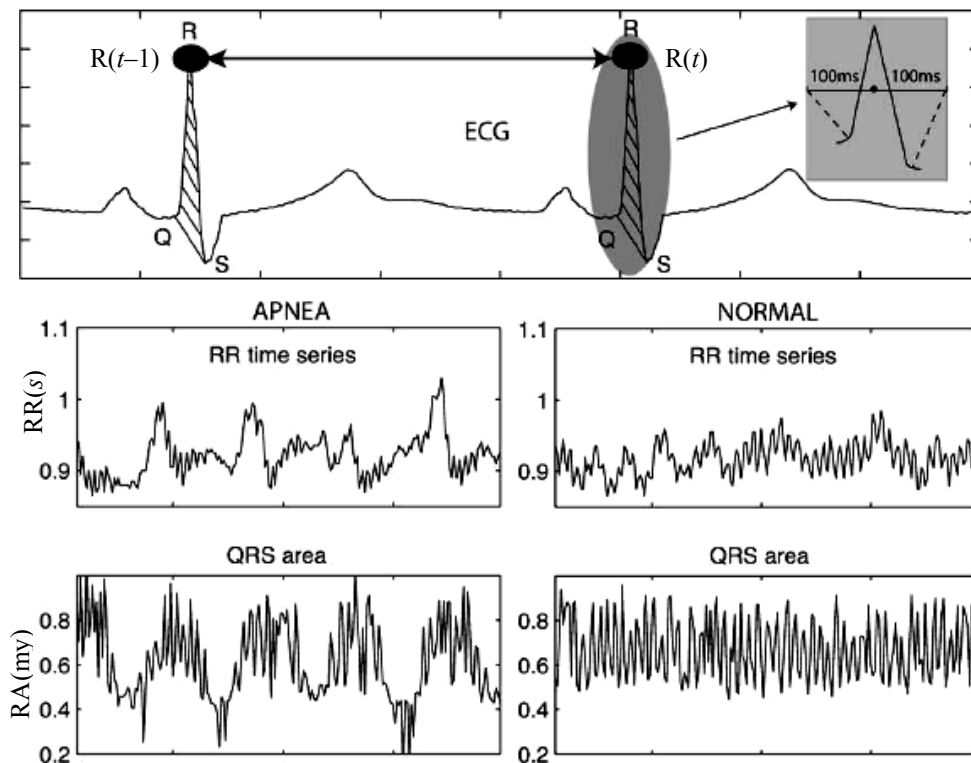


Рис. 2. RR-інтервали і площа QRS ділянок для нормального сну і для сну з апное

Для використання deep learning подібний ручний вибір ознак уже не застосовують, оскільки більш складні моделі здатні самостійно виділяти високорівневі характеристики.

В останнє десятиліття з'явилося багато портативних і доступних пристроїв для вимірювання ECG вдома, при цьому є пристрої як з одним відведенням, так і з декількома. Огляд основних таких пристроїв наведено у праці [8].

Фотоплетизмографія та рівень насиченості крові киснем

Фотоплетизмографія (PPG) використовується для вимірювання зміни об'єму крові, що проходить через певну тканину в тілі. Для цього застосовують фотоплетизмограф, що є простим пристроєм, який складається з джерела світла і світлочутливого сенсора. Кількість світла, що доходить до сенсора, залежить від довжини хвилі світла та від середовища, через яке це світло проходить. Розрізняють два види фотоплетизмографів: перші вимірюють кількість світла, що проходить крізь тканину, а другі — кількість світла, що відбивається від тканини [9].

Одним з основних застосувань фотоплетизмографії є пульсоксиметрія, що дозволяє вимірювати рівень насиченості крові киснем. Рівень насиченості крові киснем показує відношення кількості гемоглобіну, насиченого киснем, до сумарної кількості гемоглобіну в крові. Найбільш точним вимірюванням цього показника є тест артеріальної крові на газовий склад (SaO_2), але для цього необхідно взяти зразок крові і виконати її аналіз в лабораторії. Більш простим і доступним способом є застосування пульсоксиметрів, які використовують властивості крові по-різному пропускати світло залежно від рівня насиченості крові киснем. Пульсоксиметри дозволяють вимірювати периферійний рівень насиченості крові киснем (SpO_2), що є наближенням SaO_2 . Приклад сигналу з пульсоксиметра ілюструє рис. 3.

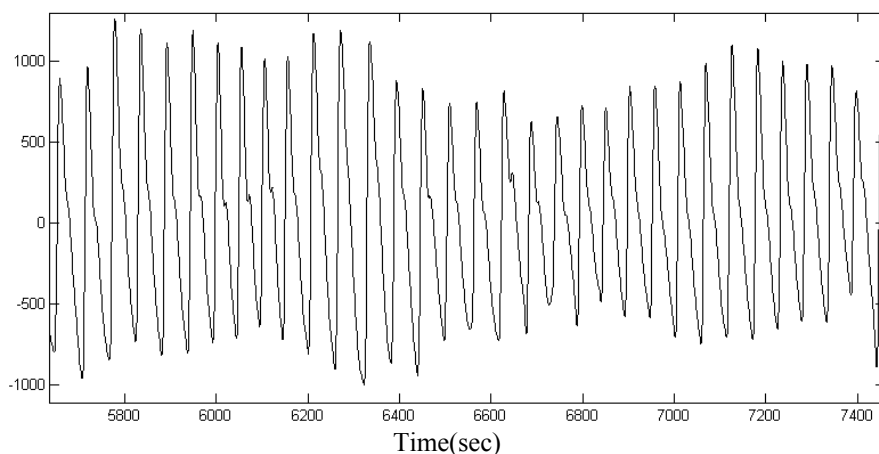


Рис. 3. Сигнал з пульсоксиметра [10]

Для застосування традиційних технік машинного навчання із сирих даних PPG спочатку конструюють відповідні характеристики, зокрема кількість часу із SpO_2 , що менший за певний рівень [11]. Крім цього, SpO_2 сенсори використовують для обчислення HRV [12]. За глибинного навчання низькорівневі характеристики із SpO_2 виокремлюються вже самою моделлю.

Актиграфія

Ще один вид сигналів, які дозволяють діагностувати апное уві сні, — це різні респіраторні рухи під час дихання. Основним сенсором у цьому випадку є акселерометр, що зазвичай вимірює прискорення вздовж трьох осей. Пристрій з акселерометром може розміщуватись на грудній клітці [13] або на трахеї. Здебільшого застосовують окремі малогабаритні пристрої з акселерометром, але можна скористатись і звичайними смартфонами, прикріпивши їх до спеціального респіраторного пояса.

Аудіо- та відеосигнали

Для роботи з аудіосигналами є два основні підходи.

1) Розв'язувати задачу класифікації про наявність апное за розмовною мовою, оскільки з мови можна визначати багато інформації, що стосується статі, віку, рис особистості та її здоров'я. Цей підхід використано у праці [14].

2) Визначати наявність апное за звуками дихання під час сну, оскільки вони різнитимуться для нормального дихання та для епізодів апное. Такий підхід використано у праці [15].

Можна також записувати звук і відео сну людини, що дає змогу визначати і рухи грудної клітки [16].

Однією з основних переваг використання аудіо- та відеосигналів є те, що відповідні сенсори (мікрофон і камера) є майже у будь-якому смартфоні, що робить використання зазначених підходів досить доступним. Іншою важливою перевагою є те, що до пацієнта не потрібно прикріплювати жодних додаткових пристроїв, а отже, це не буде впливати на сон.

Ороназальний потік повітря

Іншим сигналом для визначення апное може бути кількість повітря, яке проходить через дихальні шляхи. Для цього необхідно одягати спеціальну маску, яка містить сенсори для вимірювання кількості і тиску повітря, що проходить через ротову та носову порожнини. Такий підхід використано у праці [17]. Недолік таких сенсорів — вони можуть заважати сну більше ніж ті, що описано вище.

НАБОРИ ДАНИХ

Розглянемо набори даних, які збирались для дослідження апное уві сні та характеристики сигналів у них. Апное уві сні є досить дослідженим захворюванням, однак набори даних, які вже існують, часто містять у собі доволі багато різних сигналів з полісомнографії, зокрема EOG, EMG щелепи, які неможливо зняти з носимих пристроїв. Для побудови моделей, які працювали б із сигналами з носимих пристроїв, запропоновано орієнтуватись на сигнал ECG і SpO₂. Однак варто зауважити, що сигнали полісомнографії є також важливими для побудови якісних просторів ознак та алгоритмів автоматичного виділення ознак, навіть коли вони доступні лише під час тренування, а не під час використання моделі. Таку архітектуру моделі

з умовним змішуванням сигналів описано на прикладі з домену відеоаналізу у праці [18].

Нижче розглядаються шість наборів даних, п'ять з яких містять сигнал ECG, три — SpO₂ сигнал, що дозволяє застосовувати дані з них під час дослідження.

Sleep Heart Health Study PSG Database

Це найбільший набір даних, що містить 9736 сигналів полісомнографії [19]. У дослідженні брали участь 6441 людина. Дані знімалися у два підходи. У першому підході отримано дані 6441 полісомнографій, у другому підході брали участь 3295 з них.

Усі 9736 записів містять такі сигнали:

- EEG сигнал частотою 125 Гц;
- EOG сигнал частотою 50 Гц;
- EMG сигнал щелепи частотою 125 Гц;
- ECG сигнал, знятий з першого підходу частотою 125 Гц; ECG сигнал, знятий з другого підходу, — 250 Гц;
- анотації.

Набір містить детальну статистику популяції, на якій були зібрані дані. Набір даних містить ще декілька сигналів, однак наведені сигнали можна використати для вивчення ефективних просторів ознак.

Apnea-ECG Database

Цей набір даних для дослідження проблеми детекції апное [20] містить 70 записів — 35 навчальних, 35 тестових — довжиною від семи до десяти годин кожен. Крім цього, набір містить детальну статистику популяції, на якій були зібрані дані.

Усі 70 записів містять:

- ECG сигнал частотою 100 Гц;
- анотацію апное;
- автоматичну QRS анотацію.

Набір містить 8 записів SpO₂ сигналу, а також кілька сигналів, які не є релевантними для дослідження.

Sleep-EDF Database Expanded

Є дуже повним набором даних з 197 записами від 74 людей, однак він не містить сигналу ECG [21]. Утім цей набір даних можна використовувати для поліпшення вивчених просторів ознак.

Усі 197 записів містять:

- EEG сигнал частотою 100 Гц;
- EOG сигнал частотою 100 Гц;
- EMG щелепи частотою 100 Гц;
- анотації-маркери апное частотою 1 Гц.

Набір містить також детальну статистику популяції, на якій були зібрані дані.

St. Vincent's University Hospital / University College Dublin Sleep Apnea Database

Містить 25 записів нічного сну [22]. Усі 25 записів містять сигнали полісомнографії — EEG, EOG, EMG, а також ECG і SpO₂ сигнал з пульсоксиметра на пальці. Цей набір даних також надає досить детальну статистику популяції, з якої отримано сигнали.

Apnea HRV Dataset

Є найновішим — дані були зібрані у 2014 р. [23]. Набір містить 77 записів від 77 людей з детальними статистиками популяції. Кожен запис містить ECG сигнал частотою 200 Гц, а також сигнали EEG, EOG, EMG.

MIT-BIH Polysomnographic Database

Має 18 записів, 1:18–6:30 годин кожен [24]. Набір містить 18 ECG сигналів з апное анотацією та сигналами полісомнографії — EEG, EOG, EMG щелепи; для 5 записів є сигнал SpO₂, однак пульсоксиметр тут використовувався на мочці вуха. Статистики ознак популяції також наведено в описі даних з цього набору.

МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АПНОЕ УВІ СНІ

Розглянемо методи машинного навчання, що застосовувалися для виявлення апное уві сні. Частина з розглянутих нижче праць стосується безпосередньо автоматичного аналізу сигналів, які можна отримати з носимих сенсорів; інші праці містять більш загальний аналіз сигналів, за якими можна діагностувати епізод апное уві сні, тобто такими, які корисні для розуміння динаміки пов'язаних фізіологічних процесів, або ж для огляду інших сигналів, які потенційно можуть мати діагностичну цінність.

Праця [25] не фокусується на використанні сигналів, зазвичай доступних з носимих сенсорів (ECG, PPG, SpO₂). Натомість використовуються всі сигнали PSG. Таким чином, оцінюється можливість застосування методів машинного навчання для встановлення діагнозу за записами PSG — що наразі виконується відповідними експертами вручну.

Це дослідження є цікавим з точки зору використання мультимодальних комбінованих архітектур нейронних мереж: CNN застосовуються для моделювання локальних просторово-часових характеристик 30-секундних фрагментів PSG, а отримані в результаті ознаки (репрезентації) потім подаються на вхід RNN, які моделюють довготривалі часові залежності. Розроблену RCNN архітектуру показано на рис. 4.

У результаті отримано рівень точності класифікації, близький до людського в таких категоріях: визначення стадій сну, апное та рухів кінцівок. Це показує перспективність методів машинного навчання, які враховують необроблені сигнали різних модальностей, а також у цілому можливості автоматично аналізувати сон та діагностувати апное уві сні.

Далі розглянемо дослідження, які використовують непрямі ознаки апное уві сні, записані з неконтактних сенсорів.

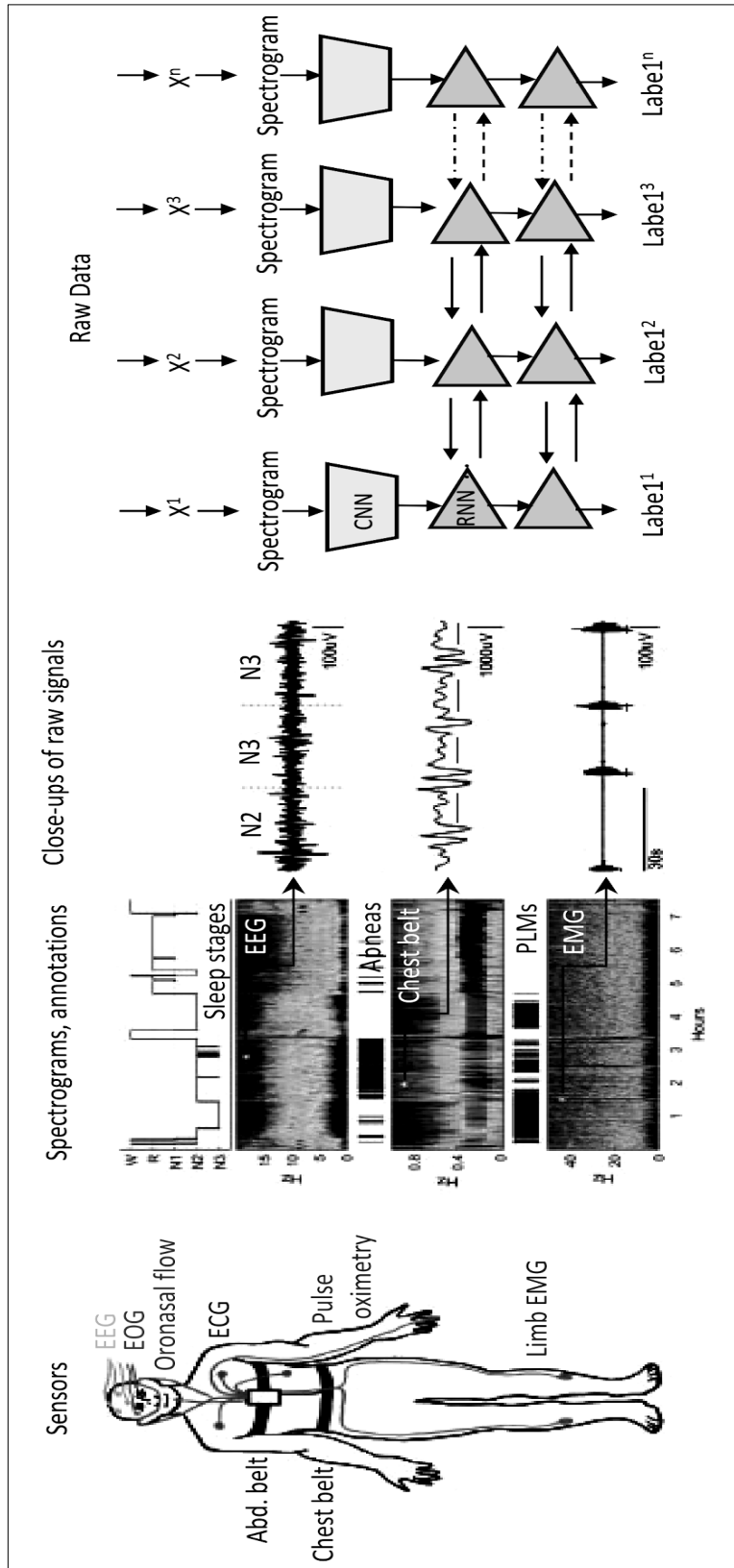


Рис. 4. Комбінована архітектура RCNN, запропонована у праці [25]

У статті [14] пропонується модель передбачення обструктивного апное уві сні за записами мови (спонтанними та записаними у спеціалізованій медичній установі).

У ході цього дослідження отримано результати, що вказують на ефективність використання мови як біомаркера для виявлення апное: досягнуто TPR 88% і TNR 80%.

Використання запису мови обґрунтовується тим, що до OSA призводять анатомічні та функціональні зміни верхніх дихальних шляхів, які можуть проявлятися під час говоріння.

Модель натреновано на наборі даних, що містять записи розмови португальською мовою, і цілком можливо, що перенесення результатів на інші мови потребуватиме перетреновування або дотреновування моделі відповідною мовою через можливі фонетичні особливості. Варто зазначити, що, незважаючи на використання контрольного набору даних (записи мови людей без апное), вибірка є надто малою і може бути упередженою. Більш переконливі результати можна було б отримати, порівнюючи записи мови однієї і тієї самої людини до та після виникнення захворювання, але збирання таких даних потребуватиме великої кількості часу та участі більшої кількості суб'єктів.

У новішій праці [26] на більшому наборі даних отримано нижчу точність (76,6%), незважаючи на застосування більш сучасних підходів (моделювання акустичних підпросторів, вивчення репрезентацій нейронною мережею). Основний внесок цієї праці — використання доменно-змагального тренування (domain-adversarial training) для зменшення ефекту джерел мінливості, таких як вік або BMI пацієнта. Утім такі результати показують певний вплив апное уві сні на голос, хоча поточні дослідження не досягають достатньої точності для надійної діагностики.

У праці [15] також використовується звуковий сигнал, але такий, який містить запис звуків (дихання) безпосередньо під час сну. Автори отримали достатню точність, щоб показати, що за таким сигналом можна діагностувати OSA з певною точністю: вони досягли точності 92,5% у бінарній класифікації і 88,3% у класифікації за ступенем розладу сну (чотири класи). Автори зазначають, що використовували мікрофон невисокої якості, що може спростити розгортання такої системи моніторингу.

Під час дослідження застосовувався закритий набір даних, що робить відтворення результатів неможливим і ускладнює удосконалення запропонованого методу. Варто відзначити, що у відкритому доступі немає жодного набору даних із записами аудіовізуальних сигналів, записаних під час сну. Імовірно це пояснюється підвищеною необхідністю захистити приватність пацієнтів під час запису таких даних.

На відміну від попереднього дослідження автори [16] використовували ширший набір даних: вони запропонували метод детекції різних респіраторних подій за допомогою відео- та аудіозапису сплячої людини. Це досягається за рахунок оптимізації параметрів моделі двох еліпсів (один з яких визначає позицію грудної клітки, другий — черевної порожнини). Отримані ознаки комбінуються з аудіоінформацією. Із результуючого набору ознак визначаються респіраторні події за допомогою SVM класифікатора.

Автори використали інфрачервоний сенсор системи Microsoft Kinect для отримання об'ємного відео. Як і інші системи безконтактної детекції апное це вирішення має переваги, оскільки традиційні системи полісомнографії дуже дорогі і використовують контактні сенсори, які можуть погіршити якість сну.

Результати експериментів було порівняно із вручну розміченими даними полісомнографії і отримано близькі до ідеальних результати (0,4% похибки). Оскільки отримані результати кращі за отримані у дослідженні [15], видається, що відео (і отримані з нього позиції грудної клітки та черевної порожнини) додають корисний сигнал. Однак варто зазначити, що незрозуміло, чи стійкий даний метод до змін у розташуванні камери. Для збирання даних камеру було розташовано в одній і тій самій позиції; у разі розгортання системи, якщо користувачі встановлюватимуть камеру вдома самостійно, кут огляду пацієнта може бути іншим.

Перейдемо до огляду методів, безпосередньо релевантних щодо використання сигналів, записаних з носимих сенсорів.

Основним внеском [27] є використання моментального пульсу (IHR) як єдиної ознаки для класифікації апное уві сні за допомогою LSTM. У ході експериментів отримано F1 score = 1,0 на наборі даних Apnea-ECG. Це показує перспективи використання моментального пульсу як стійкої ознаки для детекції апное уві сні. Іншим цікавим аспектом є те, що автори використали набір даних із записами ECG пацієнтів з аритмією як контрольний, таким чином, навчивши модель відрізняти зміни в пульсі, що притаманні аритмії, від викликаних апное уві сні.

Це дослідження показує перспективність використання носимих сенсорів для діагностики апное уві сні. Утім застосовність цієї єдиної ознаки на даних з носимих сенсорів потребує подальшого дослідження. У цьому дослідженні пульс визначався за даними ECG, записаними в медичній установі за допомогою якісного обладнання. Носимі сенсори (такі як фітнес-трекери) мають набагато нижчу точність (можливо різну залежно від діапазону значень; скажімо, фітнес-трекери можуть бути оптимізовані для високих значень пульсу, які спостерігаються під час занять спортом). До того ж, крім якості апаратного забезпечення таких приладів, на вимірювання впливають інші фактори (наприклад, наручний вимірник може нещільно прилягати до зап'ястя) та випадковий шум. Цілком можливо, що для застосування машинного навчання для виявлення апное уві сні за сигналами з носимих приладів буде корисним застосування мультимодальних сигналів, урахування яких компенсуватиме зазначені систематичні похибки та випадкові шуми.

Праця [28] є ще одним прикладом дослідження, у якому використовується лише одна ознака для класифікації апное уві сні. У наведених експериментах використання SpO₂ переважало за точністю IHR, даючи майже ідеальні результати. Використання комбінації SpO₂ + IHR продовжує покращувати результати. Таким чином, застосовуючи пристрої, які вимірюють PPG, можна виділити обидві ці ознаки та отримати прийнятну точність класифікації.

Ще одним дослідженням, у якому використано похідну ознаку, отриману з ECG, є [29]. У цій праці використовуються LSTM, що навчаються на RR інтервалах (тобто часових інтервалах між R-хвилями на ECG). При цьому використовувалися досить короткі часові вікна, результати з яких агрегувалися.

Незважаючи на високу точність (97,80%), отриману на наборі даних Арпеа-ECG, видається, що на більших вибірках можуть знадобитися моделі, що враховують більш довгостроковий контекст. Це потенційно можна виконати за допомогою архітектур типу Transformer, або комбінації CNN + RNN (у яких одновимірні CNN виокремлюють ознаки з невеликих часових вікон, і послідовність цих ознак потім обробляється RNN) аналогічно праці [25].

Праця [30] є прикладом застосування мультимодального машинного навчання для аналізу сигналів, отриманих з найбільшої кількості носимих сенсорів: ECG, SpO₂, сигнали з респіраторних ременів. У ній описується новий підхід (Branched Fusion Method with Backward Shortcut Connections (BFM-SC)) до детекції апное за даними з багатьох сенсорів, що використовує зворотні обхідні з'єднання (Backward Shortcut Connections) в архітектурі нейронної мережі. Цю архітектуру показано на рис. 5 (діаграма *г*); у роботі цей підхід порівнюється з архітектурами (*а*)–(*в*).

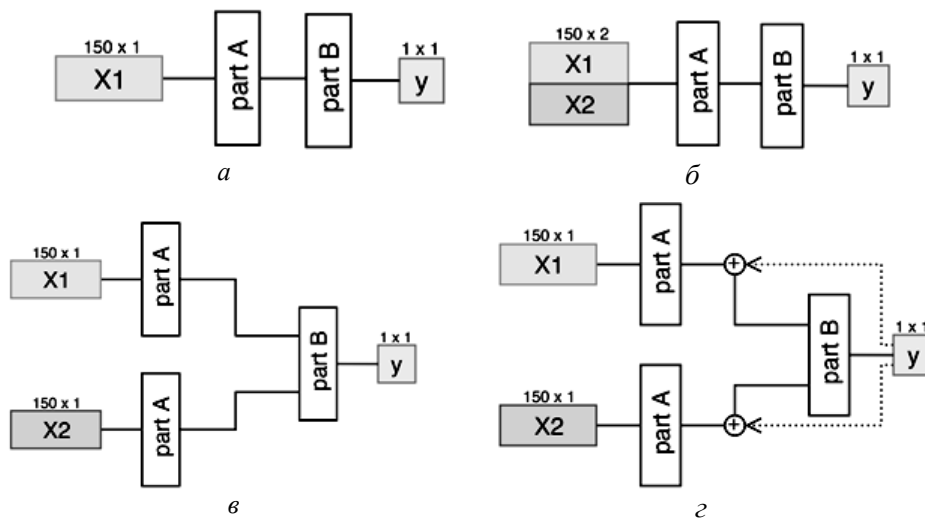


Рис. 5. Архітектури сенсорного синтезу [30]: *а* — Single Input Method (SIM); *б* — Multi Input Method (MIM); *в* — Branched Fusion Method (BFM); *г* — Branch Fusion Method with Backward Shortcut Connection (BFM-SC)

Запропонований метод BFM-SC переважає BFM, оскільки під час тренування нейронної мережі максимізується використання даних з кожного сенсора одночасно, у той час як у BFM можлива ситуація, коли один з каналів надаватиме достатньо інформації, а інші матимуть нульову вагу.

Цей підхід, як стверджується, дає кращі результати (перевірено на наборі даних Sleep-Heart-Health-Study-1) порівняно з двома простішими підходами до сенсорного синтезу:

1) конкатенація декількох сигналів в один, який подається на вхід нейронної мережі (Multi Input Method, MIM) — метод раннього синтезу (early fusion);

2) поділ нейронної мережі на дві частини, де перша частина отримує на вхід сигнали від сенсорів і повертає їх репрезентації, які, у свою чергу, подаються на вхід другій частині, яка вже повертає результат (Branched Fusion Model, BFM) — метод пізнього синтезу (late fusion).

Авторами отримано AUPR від 0,61 до 0,78 залежно від групи пацієнтів у наборі даних Sleep-Heart-Health-Study-1. Ця робота є найновішою з розглянутих і містить найкращі результати; тому бачимо, що ці результати далекі від ідеальних, а набір даних Sleep-Heart-Health-Study-1 більший і складніший для класифікації порівняно з Арпеа-ECG. Це показує, що проблему автоматичного визначення апное уві сні за сигналами з носимих сенсорів ще не вирішено, і це обґрунтовує необхідність подальших досліджень з пошуку ефективніших методів машинного навчання, або ж методів їх поєднання з класичними методами з галузей цифрового оброблення сигналів і статистики.

Більшість підходів до детекції апное є реактивними: вони визначають епізод апное через деякий час після його виникнення, або навіть після закінчення. У праці [31] автори застосували непараметричну статистичну модель Dirichlet-Process Mixture-Gaussian-Process (DPMG) для прогнозування часу, що залишається до переходу з нормального стану до епізоду обструктивного апное уві сні.

Під час тестування підходу на наборі даних, що містить дані з відкритих джерел, а також деякі закриті дані, автори виявили ймовірності правильного визначення передбачення апное на рівні від 61,1% (упродовж наступних п'яти хвилин) до 83,6% (упродовж наступної хвилини).

Це дослідження корисне для вивчення динаміки виникнення епізодів апное, а також для побудови систем, що допомагають проводити медичні інтервенції до виникнення гострих симптомів.

Нещодавні успіхи моделей, що базуються на архітектурах нейронних мереж з увагою та архітектурі типу Transformer у різних галузях машинного навчання — починаючи від оброблення природної мови і закінчуючи передбаченням часових рядів — дозволяють припустити успішне застосування таких моделей для проблеми детекції апное. Ураховуючи мультимодальну природу даних дослідження, можна застосовувати підхід типу суміш експертів просторів вивчених ознак, які використовують архітектуру трансформер та механізм самоуваги для вирішення проблеми класифікації [18], де експертами у розгляданому випадку можуть бути простори вивчених ознак різних сигналів. Цей підхід дуже гнучкий; він дозволяє проводити класифікацію із застосуванням лише тих сигналів, які доступні в конкретний момент часу для конкретного запису, а не всі.

Узагальнений огляд проаналізованих методів наведено в таблиці.

Узагальнений огляд методів

Дослідження	Мета	Сигнали	Висновки / результати
[25]	Визначення стадій сну, апное та рухів кінцівок за даними PSG	Усі сигнали PSG: ECG, EMG, SaO ₂ та ін.	Близький до людського рівень точності в разі автоматичного аналізу
[14]	Визначення ефективності використання запису мови як біомаркера OSA	Аудіо (запис) людської мови	Мова має певні ознаки, які корелюють з OSA. Точність недостатня для надійної діагностики
[26]	Визначення ефективності використання запису мови як біомаркера OSA	Аудіо (запис) людської мови.	Використання доменно-змагального тренування (domain-adversarial training) для зменшення ефекту джерел мінливості, таких як вік або BMI пацієнта, підвищує точність класифікації
[15]	Визначення апное уві сні за звуками дихання під час сну	Аудіо (запис звуків дихання під час сну)	За звуками дихання під час сну можна діагностувати OSA з певною точністю
[16]	Детекція різних респіраторних подій за допомогою відео- та аудіозапису сплячої людини	Аудіо + відеозапис сплячої людини	Висока точність класифікації, відповідно відео (і отримані з нього позиції грудної клітки та черевної порожнини) додає корисний сигнал (порівняно з використанням лише аудіо)
[27]	Класифікація апное уві сні моделлю LSTM за єдиною ознакою — пульсом (IHR)	Пульс, визначений за ECG	Пульс є інформативною ознакою для детекції апное. Застосовність моделей, що використовують лише одну ознаку, потребує подальших досліджень
[28]	Огляд поодиноких ознак, за якими можна класифікувати апное уві сні	IHR, SpO ₂ та ін.	Використання SpO ₂ дає високу точність. Застосування комбінації SpO ₂ + IHR надалі покращує результати. Показує перспективність використання сенсорів, що вимірюють PPG
[29]	Визначення апное уві сні за RR інтервалами	RR інтервали, розраховані з ECG	Ця ознака корелює з апное; класифікація за нею дає високу точність. Урахування більш довгострокового контексту може дати кращі результати
[30]	Розроблення нового методу сенсорного синтезу	Велика кількість сигналів, отриманих з носимих сенсорів: ECG, SpO ₂ , сигнали з респіраторних ременів	Дослідження архітектур нейронних мереж, що найкращим чином ураховують мультимодальні сигнали, перспективні. Є прикладом передових результатів, які не досягають точності, достатньої для якісної діагностики, відповідно, задача класифікації апное уві сні не є повністю вирішеною
[31]	Прогнозування апное уві сні	Вручну створені ознаки, що базуються на HRV (з ECG)	Прогнозування апное уві сні за сигналом ECG можливе з прийнятною точністю за одну–три хвилини до епізоду апное

ВИСНОВКИ

Апноє уві сні є складним захворюванням, яке наразі недостатньо діагностоване через складності отримання аналізів пацієнта. У роботі розглянуто підходи діагностування апноє уві сні за допомогою сигналів з носимих сенсорів у домашніх умовах, а також наявні набори даних, які можна використати для побудови і тестування розроблених моделей та алгоритмів. Описані методи (для класифікації, локалізації та прогнозування апноє уві сні) та набори даних дозволяють очікувати, що детекція апноє за допомогою сигналів з носимих сенсорів можлива і дасть змогу діагностувати хворобу у великій кількості людей, що уможливить їх лікування та поліпшення рівня життя. Огляд опублікованих методів показує, що перспективним напрямом дослідження є розроблення складніших моделей машинного навчання, які ефективніше використовують мультимодальні сигнали.

ЛІТЕРАТУРА

1. L. Almazaydeh, K. Elleithy, and M. Faezipour, "A Panoramic Study of Obstructive Sleep Apnea Detection Technologies", *28th International Conference on Computers and Their Applications*, 2013.
2. F.W. Ward et al., "Home Diagnosis of Sleep Apnea: A Systematic Review of the Literature", *Chest*, no. 124(4), pp. 1543–1579, 2003.
3. T. Young, L. Evans, L. Finn, and M. Palta, "Estimation of the Clinically Diagnosed Proportion of Sleep Apnea Syndrome in Middle-aged Men and Women", *Sleep*, no. 20(9), pp. 705–706, 1997.
4. *Electrocardiography* [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Electrocardiography>.
5. C. Varon et al., "A Novel Algorithm for the Automatic Detection of Sleep Apnea From Single-Lead ECG", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, no. 62(9), pp. 2269–2278, 2015.
6. M. Bsoul, H. Minn, and L. Tamil, "Apnea MedAssist: Real-time Sleep Apnea Monitor Using Single-Lead ECG", *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, no. 15(3), pp. 416–427, 2011.
7. M. Mendez et al., "Sleep Apnea Screening by Autoregressive Models From a Single ECG Lead", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, no. 56(2), pp. 2838–2850, 2009.
8. A. Bansal and R. Joshi, "Portable out-of-hospital electrocardiography: A review of current technologies", *Journal of Arrhythmia*, no. 34(2), pp. 129–138, 2018.
9. T. Tamura, "Current progress of photoplethysmography and SPO2 for health monitoring", *Biomedical Engineering Letters*, no. 9(1), pp. 21–36, 2019.
10. *Photoplethysmogram* [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photoplethysmogram>
11. A. Burgos, A. Goñi, A. Illarramendi, and J. Bermúdez, "Real-time detection of apneas on a PDA", *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, no. 14, pp. 995–1002, 2010.
12. G. Angius and L. Raffo, "A sleep apnoea keeper in a wearable device for continuous detection and screening during daily life", *2008 Computers in Cardiology*, pp. 433–436, 2008.
13. A. Petrenko, R. Kyslyi, and I. Pysmennyi, "Detection of human respiration patterns using deep convolution neural networks", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 4, pp. 6–13, 2018.

14. C.M. Botelho, I. Trancoso, A. Abad, and T. Paiva, "Speech as a Biomarker for Obstructive Sleep Apnea Detection", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 5851–5855, 2019.
15. T. Kim, J. Kim, and L. Kyogu, "Detection of sleep disordered breathing severity using acoustic biomarker and machine learning techniques", *BioMedical Engineering OnLine*, no. 17, 2018.
16. C. Yang et al., "Sleep Apnea Detection via Depth Video & Audio Feature Learning", *IEEE Transactions on Multimedia*, no. 19, pp. 822–835, 2017.
17. Rohan S. Puri et al., "Design and preliminary evaluation of a wearable device for mass-screening of sleep apnea", *2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 1870–1873, 2016.
18. A. Miech, I. Laptev, and J. Sivic, "Learning a Text-Video Embedding from Incomplete and Heterogeneous Data", *ArXiv*, 2018.
19. Guo-Qiang Zhang et al., "The National Sleep Research Resource: towards a sleep data commons", *Journal of the American Medical Informatics Association: JAMIA*, no. 25, pp. 1351–1358, 2018.
20. T. Penzel, G. Moody, and R. Mark, "The apnea-ECG database", *Computers in Cardiology 2000*, no. 27, pp. 255–258, 2000.
21. B. Kemp et al., *The Sleep-EDF Database [Expanded]*, 2018. [Online]. Available: <https://physionet.org/content/sleep-edfx/1.0.0/>. doi: 10.13026/C2X676
22. W. McNicholas et al., *St. Vincent's University Hospital / University College Dublin Sleep Apnea Database*. 2004. [Online]. Available: <https://physionet.org/content/ucddb/1.0.0/>. doi: 10.13026/C26C7D.
23. A.G. Ravelo-García, "APNEA HRV DATASET", *Mendeley*, 2018. [Online]. Available: <https://data.mendeley.com/datasets/vv6wdpbrsh/1>.
24. A. Goldberger et al., "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals", *Circulation*, no. 101, pp. E215–20, 2000.
25. S. Biswal, H. Sun, and B. Goparaju, "Expert-level sleep scoring with deep neural networks", *Journal of the American Medical Informatics Association: JAMIA*, no. 25, pp. 1643–1650, 2018.
26. J.M. Perero-Codosero et al., "Modeling Obstructive Sleep Apnea Voices Using Deep Neural Network Embeddings and Domain-Adversarial Training", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, no. 14, pp. 240–250, 2020.
27. R.K. Pathinarupothi et al., "Instantaneous heart rate as a robust feature for sleep apnea severity detection using deep learning", *IEEE EMBS International Conference on Biomedical & Health Informatics (BHI)*, pp. 293–296, 2017.
28. R.P. Krishnan et al., "Single Sensor Techniques for Sleep Apnea Diagnosis using Deep Learning", *IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI)*, pp. 524–529, 2017.
29. M. Cheng et al., "Recurrent Neural Network Based Classification of ECG Signal Features for Obstruction of Sleep Apnea Detection", *IEEE International Conference on Computational Science and Engineering (CSE) and IEEE International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing (EUC)*, no. 2, pp. 199–202, 2017.
30. T. Van Steenkiste, D. Deschrijver, and T. Dhaene, "Sensor Fusion using Backward Shortcut Connections for Sleep Apnea Detection in Multi-Modal Data", *Machine Learning for Health Workshop*, pp. 112–125, 2020.
31. T.Q. Le and S.T. Bukkapatnam, "Nonlinear Dynamics Forecasting of Obstructive Sleep Apnea Onsets", *PLoS ONE*, no. 11, 2016.

Надійшла 22.09.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Dmytro A. Tkachenko, ORCID: 0000-0003-2804-7305, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: me@dmitriytkachenko.com

Ihor V. Krush, ORCID: 0000-0001-7083-1799, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: ihor@kroosh.me

Vitalii G. Mykhalko, ORCID: 0000-0002-1811-8344, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: vitalii.mykhalko@gmail.com

Anatolii I. Petrenko, ORCID: 0000-0001-6712-7792, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: tolja.petrenko@gmail.com

MACHINE LEARNING FOR DIAGNOSIS AND MONITORING OF SLEEP APNEA / D.A. Tkachenko, I.V. Krush, V.G. Mykhalko, A.I. Petrenko

Abstract. This paper contains a review and analysis of applications of modern machine learning approaches to solve sleep apnea severity level detection by localization of apnea episodes and prediction of the subsequent apnea episodes. We demonstrate that signals provided by cheap wearable devices can be used to solve typical tasks of sleep apnea detection. We review major publicly available datasets that can be used for training respective deep learning models, and we analyze the usage options of these datasets. In particular, we prove that deep learning could improve the accuracy of sleep apnea classification, sleep apnea localization, and sleep apnea prediction, especially using more complex models with multimodal data from several sensors.

Keywords: monitoring, respiratory illnesses, deep learning, polysomnography, sleep apnea, CNN.

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ И МОНИТОРИНГЕ СОННОГО АПНОЭ / Д.А. Ткаченко, И.В. Круш, В.Г. Михалько, А.И. Петренко

Аннотация. Рассмотрено и проанализировано использование современных подходов машинного обучения для решения задач определения уровня сложности апноэ во сне путем локализации эпизодов апноэ во времени и предсказании последующих эпизодов апноэ. Продемонстрировано, что с помощью сигналов от доступных портативных сенсоров можно с относительно высокой точностью решать типичные задачи для определения апноэ во сне, а также рассмотрены основные публичные наборы данных для тренировки соответствующих моделей глубинного обучения и варианты их возможного использования. В частности, доказано, что использование глубинного обучения может повысить точность классификации, локализации и предсказания апноэ, особенно с помощью использования более сложных моделей глубинного обучения с учетом мультимодальных данных из нескольких сенсоров.

Ключевые слова: мониторинг, респираторные заболевания, глубинное обучение, полисомнография, сонное апноэ, CNN.

ВИКОРИСТАННЯ МЕДІАНИ КЕМЕНІ В АЛГОРИТМІ ФОРМУВАННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ

О.С. ЖУРАКОВСЬКА, І.Ю. КОЧУБЕЙ

Анотація. Розглянуто актуальне питання розроблення алгоритмічного забезпечення рекомендаційних систем. Роботу присвячено вирішенню проблеми формування рекомендацій для нових користувачів, в основі якого лежать ідеї переходу від матриці «користувач–предмет» до ранжувань предметів та формування рекомендацій для користувача активного кластера на основі побудови результуючого ранжування, що являє собою медіану Кемені на множині ранжувань. Обґрунтовано вибір медіани Кемені як результуючого ранжування, а також вибір алгоритму її побудови. Для зменшення складності обчислень запропоновано здійснювати агрегацію інформації та використовувати під час формування рекомендації ранжування, побудовані для множини «узагальнених експертів» для даного кластера. Досліджено ефективність розробленого алгоритмічного забезпечення, наведено результати та рекомендації.

Ключові слова: рекомендаційна система, узгоджене колективне ранжування, медіана Кемені.

ВСТУП

У зв'язку з поширенням та розвитком електронної комерції, зумовленої розвитком всесвітньої мережі Інтернет, актуальною постала проблема розроблення методів побудови рекомендаційних систем для завдань електронної комерції, метою яких є підвищення лояльності користувачів суб'єкта електронної комерції та максимальне забезпечення потреб користувачів. Однією з найбільш поширених у світі моделей електронної комерції є модель бізнес–споживач (Business–to–Consumer, B2C), до якої належать такі суб'єкти електронної комерції, як інтернет-магазини, електронні дошки оголошень тощо, які мають свої рекомендаційні системи [1].

Аналіз сучасного стану методів побудови рекомендаційних систем показує [2], [3], що актуальною залишається проблема формування рекомендацій для нових користувачів, особливо для нових рекомендаційних систем з огляду на велику розмірність та розрідженість матриці «предмет–користувач». Крім цього, зумовлене збільшенням кількості користувачів та предметів значне зростання розмірності рейтингової матриці «користувач–предмет», у свою чергу, впливає на істотне ускладнення обчислень.

Зазвичай рекомендації часто формуються із застосуванням методів колаборативної фільтрації, асоціативних правил [4, 5, 6].

У випадку формування рекомендацій для нового користувача можна або спочатку прогнозувати початкове наближення профілів оцінок, або сформувати рекомендації, використовуючи узагальнений профіль оцінок користувачів активного кластера. Для реалізації цього підходу необхідно виконати перехід від матриці «користувач–предмет» до ранжувань предметів і перейти до побудови узгодженого колективного ранжування на множині користувачів активного кластера. З огляду на достатньо велику кількість користувачів та предметів, на які повинні бути орієнтовані сучасні рекомендаційні системи (наприклад, кількість користувачів може лежати в інтервалі 10^3-10^7 , кількість предметів — 10^2-10^3 [7, 8]), актуальною залишається також агрегація використовуваної інформації та підвищення швидкодії алгоритмічного і програмного забезпечення як основи рекомендаційної системи.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Є множина користувачів системи, яка в результаті попереднього етапу класифікації розбита на множину кластерів за певними параметрами користувачів [9, 10]. Для існуючих користувачів на основі виставлених ними оцінок предметів сформовано матрицю «користувач–предмет». Розглядається задача формування рекомендацій для нового користувача активного кластера у вигляді ранжування на множині предметів на основі інформації про оцінювання предметів користувачами цього кластера.

Розв’язання поставленої задачі може бути реалізоване виконанням таких етапів:

- побудувати розбиття на множині користувачів активного кластера для агрегації інформації про переваги користувачів;
- для кожної підмножини користувачів з побудованого на попередньому етапі розбиття сформувати ранжування на множині предметів, яке під час формування рекомендацій буде враховуватись як ранжування «узагальненого експерта», який є представником вказаної підмножини користувачів;
- для множини ранжувань, отриманої на попередньому етапі, сформувати результуюче ранжування, яке виражає колективну думку «узагальнених експертів» і може бути використане як рекомендації для нового користувача.

Уведемо ряд позначень:

$r_i = (A_{i_1}, A_{i_2}, \dots, A_{i_n})$ — ранжування на множині альтернатив $A = \{A_i\}$, $i = \overline{1, n}$, для якого виконується умова: $\forall j = \overline{1, n}, \forall k = \overline{1, n} | j < k : A_{i_j} \succ A_{i_k}$, де i_j — номер альтернативи, що в ранжуванні r_i займає позицію j ; ранжуванню r_i відповідає відношення, задане матрицею $P_i = (p_{jk}^i)$, $j = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, n}$, де

$$p_{jk}^i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } A_j \succ A_k, \\ 0, & \text{якщо } A_j \approx A_k, \\ -1, & \text{якщо } A_j \prec A_k; \end{cases} \quad (1)$$

$d(r_1, r_2)$ — відстань між довільними ранжуваннями r_1 і r_2 :

$$d(r_1, r_2) = \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n |p_{ij}^1 - p_{ij}^2| = \sum_{i < j} |p_{ij}^1 - p_{ij}^2|; \quad (2)$$

d_{\max} — максимально можлива відстань між ранжуваннями:

$$d_{\max} = \max_{i,j} d(r_i, r_j) = n(n-1), \quad (3)$$

де n — кількість альтернатив;

d_r — сумарна відстань між ранжуванням r і ранжуваннями користувачів множини M :

$$d_r = \sum_{i=1}^m d(r, r_i), \quad (4)$$

де $d(r, r_i)$ — відстань між ранжуваннями r і r_i , визначається за формулою (2).

Отже, наведемо математичну постановку задачі.

Задано множини M — користувачів активного кластера, $m = |M|$ — кількість користувачів, $A = \{A_i\}$, $i = \overline{1, n}$ — множини альтернатив (предметів) і матрицю «користувач–предмет» $T = (t_{ij})$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, де t_{ij} — оцінка користувачем i альтернативи j . Кожному користувачу $k \in M$ відповідає вектор оцінок альтернатив $v_k = (t_{k1}, t_{k2}, \dots, t_{kn})$. Необхідно:

1) за множиною векторів оцінок $\{v_i\}$, $i = \overline{1, m}$ сформувані множини ранжувань $\{r_i\}$, $i = \overline{1, m}$ на множині A для всіх користувачів множини M ;

2) визначити узгоджене колективне ранжування, розташоване на мінімальній сумарній відстані від ранжувань для всіх користувачів множини M :

$$r^* = \arg \min_{r \in \Omega} \sum_{i=1}^m d(r, r_i), \quad (5)$$

де Ω — множина всіх можливих ранжувань на множині A ; $d(r, r_i)$ — відстань між ранжуваннями r і r_i , визначається за формулою (2).

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДУ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Вибір медіанного ранжування. Для пошуку групового консенсусного ранжування ставиться задача знаходження ранжування, яке було б найближчим до всіх індивідуальних ранжувань за деякою введеною мірою відстані. У випадку, коли розв'язок такої задачі визначається співвідношенням (5), він є медіаною Кемені [11, 12]. Оскільки медіана Кемені вважається одним з найбільш коректних результуючих ранжувань, бо вона задовольняє умови 2–5 [11] узгодженого колективного вибору Ерроу (тобто умови універсальності множини допустимих відношень, монотонності, ненав'язуваності та відсут-

ності диктатора), а також задовольняє принцип вибору Кондорсе, не приводячи до парадоксу Кондорсе [11], пропонується на третьому етапі запропонованої вище схеми (побудови консенсусного медіанного ранжування) як результуючого ранжування будувати медіану Кемені.

Задача знаходження медіани Кемені є важкорозв'язуваною комбінаторною задачею і належить до класу NP-повних задач [13, 14, 15, 16]. Існує ряд алгоритмів розв'язання цієї задачі, які базуються на методи гілок і меж, або належать до наближених та евристичних алгоритмів [11, 16, 17, 18, 19].

Оскільки необхідною умовою для алгоритму розв'язання поставленої задачі є можливість розв'язання задач великих розмірностей в режимі реального часу, в запропонованому алгоритмі формування рекомендацій на етапі побудови результуючого ранжування використано евристичний алгоритм, наведений у праці [11]. В алгоритмі для пошуку результуючого ранжування за критерієм мінімізації сумарної відстані до ранжувань множини користувачів M необхідно сформувати матрицю втрат $R = (r_{ij})$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, n}$, елементи якої визначаються співвідношенням

$$r_{ij} = \sum_{k=1}^m d_{ij}^k(r, r_k), \quad (6)$$

$$\text{де } d_{ij}^k(r, r_k) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } p_{ij}^k = 1, \\ 1, & \text{якщо } p_{ij}^k = 0, \\ 2, & \text{якщо } p_{ij}^k = -1, \end{cases} \quad p_{ij}^k \text{ — елемент матриці відношення, що ві-}$$

дповідає ранжуванню r_k , визначається за формулою (1).

Тоді для довільного ранжування r сумарна відстань до всіх ранжувань користувачів множини M (4) може бути визначена за матрицею втрат:

$$d_r = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n r_{ij} p_{ij},$$

де r_{ij} — елемент матриці втрат (6); p_{ij} — елемент матриці відношення, що відповідає ранжуванню r (1).

Оцінювання отримуваних розв'язків. Досліджуючи роботу алгоритму побудови медіанного ранжування для задач великої розмірності, доцільно оцінити:

- відхилення значення критерію (4) для розв'язку задачі (5), отриманого на множині ранжувань «узагальнених експертів» (які отримано в результаті агрегації інформації під час розбиття множини M на підмножини) від значення цього критерію для розв'язку, отриманого на множині ранжувань усіх користувачів з множини M . Значення відхилення дозволить оцінити доцільність агрегації інформації в межах підмножин розбиття, а також оцінити кількість таких підмножин;
- відносну відстань між вказаними ранжуваннями, використовуючи міру (2) і значення максимально можливої відстані (3). Це дозволить оцінити схожість розв'язків;
- відхилення значення критерію (4) для розв'язку задачі (5), отриманого на множині ранжувань «узагальнених експертів» від значення нижньої

границі критерію (4), яка визначається за матрицею втрат [11] таким співвідношенням:

$$\sum_{i=1}^m d(r, r_i) \leq H_{\min} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \min \{ r_{ij}, r_{ji} \}. \quad (7)$$

ДОСЛІДЖЕННЯ

Опис алгоритму формування рекомендацій новому користувачу на основі побудови колективного ранжування

На вхід алгоритму подається інформація:

- M — множина користувачів кластера ($m = |M|$);
- $A = \{A_i\}$, $i = \overline{1, n}$ — множина альтернатив;
- $T = (t_{ij})$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$ — матриця «користувач–предмет»;
- k — кількість підмножин, на які розбивається множина користувачів M з метою агрегації даних за користувачами. Визначається за результатами проведеного дослідження.

Крок 1. Побудувати на множині користувачів M розбиття $M = \{M_i\}$, $i = \overline{1, k}$, де k — кількість підмножин, що визначається кількістю користувачів у кожній підмножині розбиття.

Крок 2. Для кожної підмножини M_i , $i = \overline{1, k}$, сформувати вектор MY_i узагальнених оцінок як середнє арифметичне оцінок користувачів даної підмножини.

Крок 3. Упорядкувати альтернативи множини A за спаданням їх оцінок у векторах MY_i і за цим упорядкуванням сформувати ранжування MR_i , $i = \overline{1, k}$, на кожній підмножині M_i . Позначимо отриману множину ранжувань $MR = \{MR_i\}$, $i = \overline{1, k}$.

Крок 4. Для кожного ранжування MR_i , $i = \overline{1, k}$ побудувати матрицю відношення MP_i за формулою (1).

Крок 5. На основі матриць MP_i , $i = \overline{1, k}$ побудувати відношення MP^* для узгодженого колективного ранжування за допомогою евристичного алгоритму побудови медіани Кемені.

Крок 6. На основі відношення MP^* сформувати ранжування на множині альтернатив A , що є рекомендацією для нового користувача кластера.

Дослідження ефективності алгоритму формування рекомендацій для нового користувача на основі пошуку медіани Кемені

Уведемо позначення:

- алгоритм AE — евристичний алгоритм побудови медіани Кемені [11];
- $Mr = Mr = \{r_i\}$, $i = \overline{1, m}$ — множина ранжувань усіх користувачів множини M ;

- r_1 — медіана Кемені, знайдена алгоритмом AE на множині ранжувань Mr ;
- r_2 — медіана Кемені, знайдена алгоритмом AE на множині ранжувань MR ;
- H_{\min} — нижнє граничне значення критерію (4), знайдене за співвідношенням (7).
- d_{r_1} — значення критерію (4) для ранжування r_1 , обчислене на множині Mr ;
- d_{r_2} — значення критерію (4) для ранжування r_2 , обчислене на множині Mr ;

Проведемо дослідження:

- ефективності алгоритму AE для знаходження розв'язку на множині MR ;
- оцінювання кількості користувачів у кожній підмножині $M_i, i = \overline{1, k}$, яка забезпечує найбільш відповідне співвідношення швидкодії алгоритму і точності результатів.

Для оцінювання ефективності агрегації інформації (використання підмножин M_i для формування ранжувань для «узагальнених експертів» у побудові результуючого ранжування) будемо порівнювати процес формування ранжування r_2 на множині MR та формування ранжування r_1 на множині Mr за швидкістю та наближеністю результатів. Отже, для оцінювання ефективності розробленого алгоритму введемо такі критерії:

- 1) час роботи алгоритму AE на множині MR ;
- 2) відношення часу роботи алгоритму AE для побудови ранжувань r_1 і r_2 ;
- 3) відхилення значень критеріїв d_{r_1} і d_{r_2} , обчислених на множині Mr для ранжувань r_1 і r_2 відповідно:

$$Z = \frac{|d_{r_2} - d_{r_1}|}{d_{r_1}} \cdot 100; \quad (7)$$

відхилення значення критерію d_{r_2} від H_{\min} :

$$Q = \frac{|d_{r_2} - H_{\min}|}{H_{\min}} \cdot 100;$$

відносна відстань між ранжуваннями r_1 і r_2 :

$$P = \frac{d(r_1, r_2)}{d_{\max}} \cdot 100, \quad (8)$$

де $d(r_1, r_2)$ — відстань між ранжуваннями r_1 і r_2 (2); d_{\max} — максимально можлива відстань між ранжуваннями (3).

Наприклад, відносна відстань між двома ранжуваннями (2,3,1) і (1,2,3) за формулою (8) дорівнюватиме $P = (2/3) \cdot 100 \approx 67\%$.

Обґрунтування розмірності задачі під час проведення досліджень

Аналіз існуючих рекомендаційних систем показав [8], що кількість користувачів може змінюватись у діапазоні 10^3 – 10^7 , а кількість користувачів у кластері — у діапазоні 10^2 – 10^4 . Отже, виконаємо дослідження для кількості користувачів у кластері $m = 3200$, що відповідає реальним даним.

Опис задач дослідження

Одна з сновних задач дослідження — це визначення розміру підмножин M_i розбиття множини M для застосування алгоритму AE на множині MR . Необхідно оцінити максимальне збільшення розміру групи (підмножини M_i), за якого відхилення результатів алгоритму AE у побудові результуючих ранжувань на множинах Mr і MR буде не більшим за 10%. Розмір групи буде змінювати від 50 до $m/2$ користувачів.

Для практичного застосування алгоритму AE необхідно оцінити відношення часу роботи алгоритму AE для побудови результуючих ранжувань на множинах Mr і MR .

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Відхилення значень критеріїв d_{r_1} і d_{r_2} (8), обчислених на множині Mr для ранжувань r_1 і r_2 , отриманих алгоритмом AE , а також відхилення значення критерію d_{r_2} від H_{\min} (9) (залежно від кількості користувачів у множинах M_i , $i = \overline{1, k}$) показано на рис. 1.

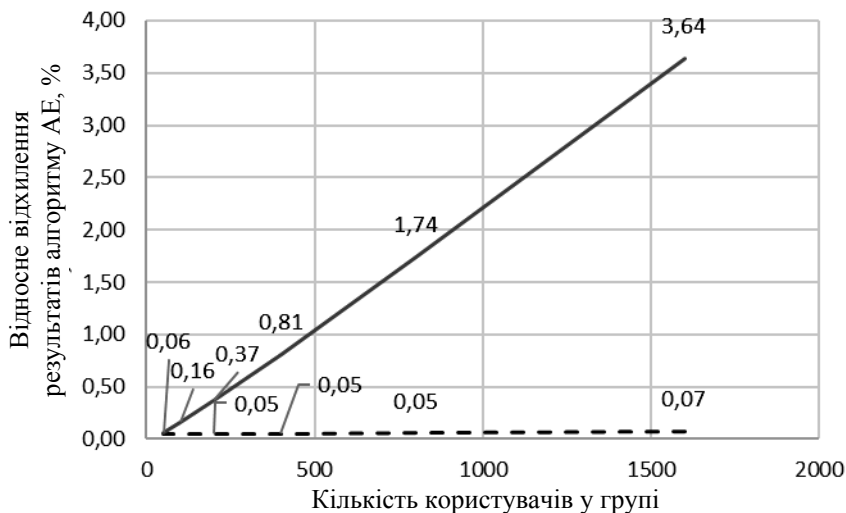


Рис. 1. Відносне відхилення критерію для результату алгоритму AE на множині MR (відхилення значень критеріїв d_{r_1} і d_{r_2} — пунктирна лінія, відхилення значення критерію d_{r_2} від H_{\min} — суцільна лінія)

Як видно з графіка, ранжування r_1 і r_2 , отримані алгоритмом AE на множинах Mr і MR відповідно, за значенням критерію (4) відрізняються дуже мало (менше, ніж на 0,5%). Порівнюючи значення критерію (4) для ранжування r_2 з нижньою границею H_{\min} , бачимо, що відхилення не перевищує 4%. Якщо розміри множин M_i від $\frac{1}{8} \cdot m$ до $\frac{1}{4} \cdot m$, то ці результати відрізняються не більше, ніж на 1%. Це дозволяє використовувати алгоритм AE на множині MR для побудови результуючого ранжування, яке буде використане у формуванні рекомендацій.

2. Час роботи алгоритму *AE* для побудови результуючого ранжування на множині *MR* залежно від кількості користувачів у множинах $M_i, i = \overline{1, k}$, показано на рис. 2.

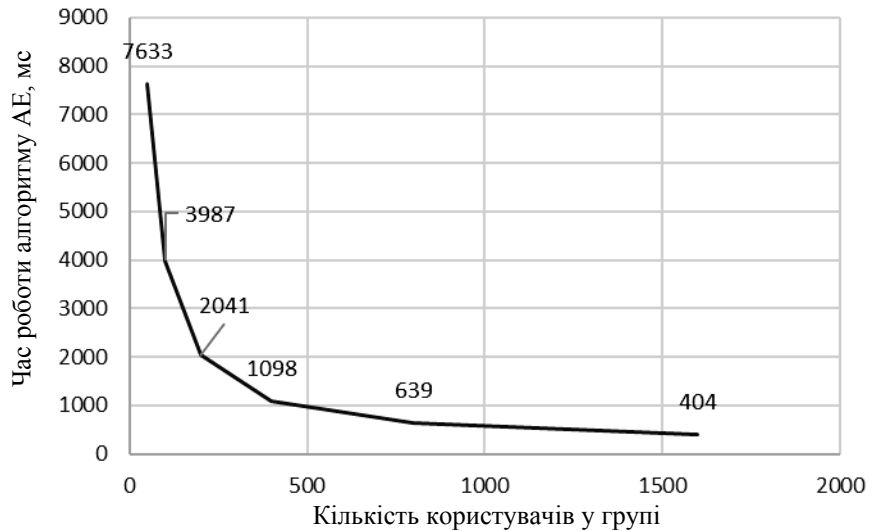


Рис. 2. Залежність часу роботи (мс) алгоритму *AE* для отримання ранжування на множині *MR* від розміру групи

Результати досліджень, подані на рис. 2, дозволяють зробити висновок про можливість застосування алгоритму *AE* для побудови результуючого ранжування на множині *MR* за великих значень кількості користувачів у кластері, що відповідає реальним даним. Для визначеного в попередньому пункті дослідження розміру підмножини M_i від $(1/8)t$ до $(1/4)t$ час роботи алгоритму *AE* на множині *MR* складає менше ніж 2 с.

3. Відношення часу роботи алгоритму *AE* для множини *Mr* і *MR* залежно від кількості користувачів у множинах $M_i, i = \overline{1, k}$, подано на рис. 3.

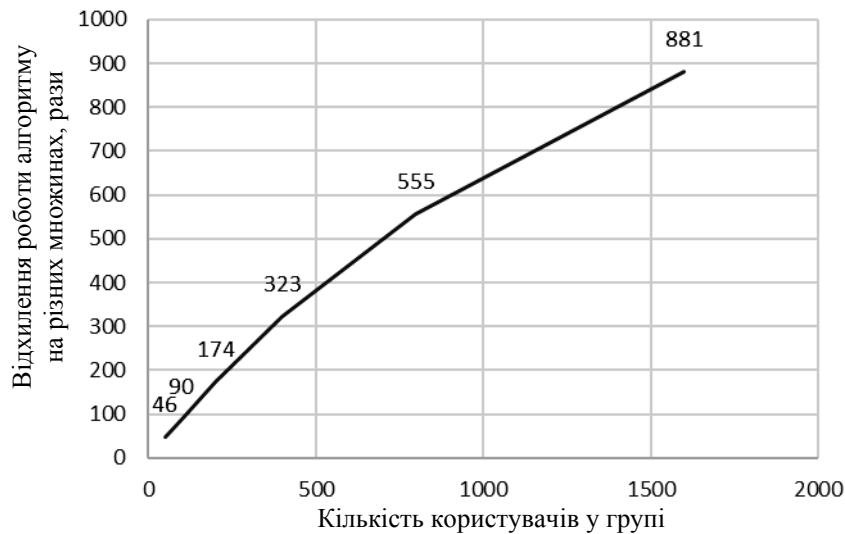


Рис. 3. Відношення часу роботи алгоритму *AE* на множинах *Mr* і *MR* для різних розмірів груп

Порівнюючи час роботи алгоритму *AE* на множинах *Mr* і *MR*, бачимо, що ефективність побудови результуючого ранжування алгоритмом *AE* на множині *MR* від 100 до 350 разів вища за цим критерієм.

4. Відносну відстань між ранжуваннями r_1 і r_2 (10) зображено на рис. 4.

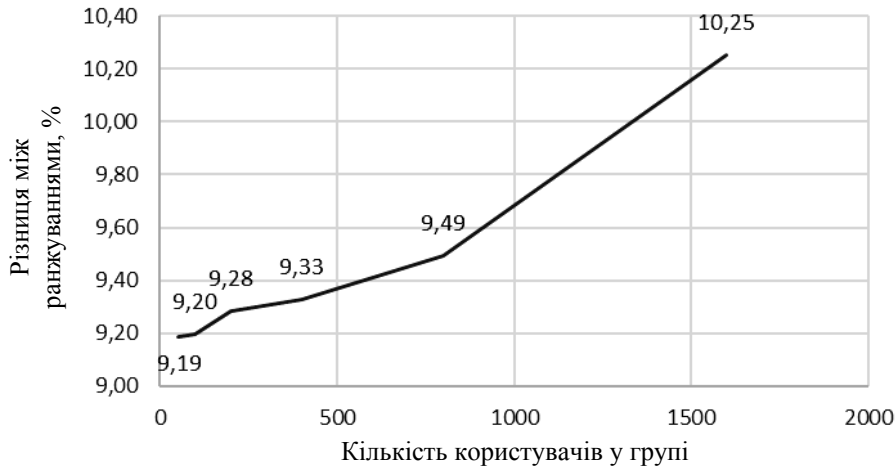


Рис. 4. Відносна відстань між ранжуваннями r_1 і r_2 для різних розмірів груп

Порівнявши відносну відстань між ранжуваннями, побудованими на множині ранжувань користувачів кластера (ранжування r_1) і на множині ранжувань «узагальнених експертів» (ранжування r_2), бачимо, що вона складає не більше ніж 10% для визначеного в попередніх пунктах дослідження розміру групи. А враховуючи істотно вищу швидкодію алгоритму *AE* на множині *MR*, робимо висновок про доцільність практичного використання алгоритму *AE* на множині *MR* під час формування узагальненого ранжування, на основі якого формуються рекомендації для нового користувача.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано проблеми формування рекомендацій в сучасних рекомендаційних системах. Показано, що проблема формування рекомендацій для нового користувача є актуальною. У зв'язку з великою кількістю користувачів та предметів рекомендаційних систем актуальною залишається проблема розроблення алгоритмічного забезпечення, яке дозволяє формувати рекомендації в реальному часі. У роботі запропоновано алгоритм формування рекомендацій, що вирішує проблему холодного старту. В основу покладено ідею використання як колективного ранжування медіани Кемені, на основі якого формуються рекомендації для нового користувача. Для підвищення швидкодії алгоритму формування рекомендацій запропоновано використовувати агреговану інформацію про переваги користувачів. Для цього слід розбивати множину користувачів на підмножини, розмірність яких визначається в результаті проведеного дослідження.

Проведено дослідження розробленого алгоритмічного забезпечення. Досліджено відхилення результатів під час побудови результуючого ранжування на множині всіх користувачів та на множині узагальнених користувачів. Показано, що в разі розбиття множини користувачів на підмножини розмірністю від 1/8 до 1/4 від кількості користувачів кластера відносне відхилення результатів не перевищує 1%. Досліджено швидкодію запропо-

нованого алгоритму і показано, що з використанням агрегованої інформації за користувачами для формування узагальненого ранжування швидкодія алгоритму підвищується від 100 до 350 разів. Аналіз часу роботи розробленого алгоритму підтверджує можливість його використання на реальних даних у режимі реального часу.

За результатами дослідження можна стверджувати про доцільність використання розробленого алгоритму в рекомендаційних системах для вирішення проблеми формування рекомендацій новому користувачу.

ЛІТЕРАТУРА

1. J. Lu, D. Wu, M. Mao, W. Wang, and G. Zhang, “Recommender system application developments: A survey”, *Decision Support Systems*, vol. 74, pp. 187–192, 2015. doi:10.1016/j.dss.2015.03.008.
2. C.A. Gomez-Uribe and N. Hunt, “The Netflix Recommender System: Algorithms, Business Value, and Innovation”, *ACM Transactions on Management Information Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 1–19, 2015. doi:10.1145/2843948.
3. F. Ricci, L. Rokach, and B. Shapira, “Introduction to Recommender Systems Handbook”, in *Recommender Systems Handbook*, Boston, MA: Springer, 2011, pp. 1–35.
4. P. Melville et al., “Content-Boosted Collaborative Filtering for Improved Recommendations”, in *National Conference on Artificial Intelligence*, Edmonton, Canada, 2016, pp. 187–192.
5. V. Srikar and R. Sudha, “Examining Lists on Twitter to Uncover Relationships Between Following, Membership and Subscription”, in *Proceedings of the 22nd international conference on World Wide Web*, Rio de Janeiro, Brazil, 2013, pp. 673–676.
6. I.Yu. Kochubey and O.S. Zhurakovska, “Modified algorithm of collaborative filtering for forming user recommendations”, *KPI Science News*, vol. 3, pp. 43–49, 2020. doi:10.20535/kpi-sn.2020.3.209842.
7. D.T. Pham, S.S. Dimov, and C.D. Nguyen, “Selection of K in K-means clustering”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 219 (1), pp. 103–119, 2005. doi:10.1243/095440605x8298.
8. W. Prinz et al., “PolyLens: A Recommender System for Groups of Users”, in *Proceedings of the Seventh European Conference on Computer-Supported Cooperative Work*, Bonn, Germany, 2001, pp. 199–218. doi:10.1007/0-306-48019-0_11.
9. A. Shepitsen, J. Gemmell, B. Mobasher, and R. Burke, “Personalized Recommendation in Social Tagging Systems Using Hierarchical Clustering”, in *Proceedings of the ACM Conference on Recommender Systems — RecSys '08*, 2008, pp. 259–266. doi:10.1145/1454008.1454048.
10. C. Gentile et al., “On Context-Dependent Clustering of Bandits”, in *Proceedings of the 34th International Conference on Machine Learning*, 2017, pp. 1253–1262.
11. B. Litvak, *Ekspertnaya informatsiya. Metody polucheniya i analiza* [Expert information. Methods of obtaining and analysis]. Moscow, 2009
12. C. List and C. Puppe, “Judgement aggregation: a survey”, in *Oxford handbook of rational and social choice*, Oxford, 2009, pp. 457–482. doi:10.1007/s11229-011-0025-3.
13. H. Bury and D. Vagner, “Judgement With Ties. Distance-Based Methods”, *New Approaches in Automation and Robotics*, Vienna, 2008, pp. 153–172.
14. O. Hudry, “Complexity of computing median linear orders and variants”, *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, vol. 42, pp. 57–64, 2013. doi:10.1016/j.endm.2013.05.146.
15. O. Hudry, “NP-hardness results on the aggregation of linear orders into median orders”, *Annals of Operations Research*, vol. 163, pp. 63–88, 2008. doi:10.1007/s10479-008-0353-y
16. S. Amodio, A. D'Ambrosio, and R. Siciliano, “Accurate algorithms for identifying the median ranking when dealing with weak and partial rankings under the Kemeny

- axiomatic approach”, *Journal of Operational Research*, vol. 249, pp. 667–676, 2015. doi:10.1016/j.ejor.2015.08.048.
17. E. Emond and D. Mason, “A new rank correlation coefficient with application to the consensus ranking problem”, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, vol. 11, pp. 17–28, 2002.
 18. W.D. Cook, B. Golany, M. Penn, and T. Raviv, “Creating a consensus ranking of proposals from reviewers partial ordinal rankings”, *Computers & Operations Research*, vol. 43, pp. 954–965, 2007.
 19. A. Alnur and M. Meila, “Experiments with Kemeny Ranking: What Works When?”, *Mathematical Social Sciences*, vol. 64, pp. 28–40, 2012. doi:10.1016/j.mathsocsci.2011.08.008.

Надійшла 09.10.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Oksana S. Zhurakovska, ORCID: 0000-0002-2804-5556, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: o.zhurakovska@kpi.ua

Illa Yu. Kochubey, ORCID: 0000-0003-2520-6577, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: illa.kochubey1@gmail.com

USE OF KEMENY MEDIAN IN THE ALGORITHM OF FORMING RECOMMENDATION / O.S. Zhurakovska, I.Yu. Kochubey

Abstract. The relevant nowadays question of development of the algorithmic support of recommender systems is considered. The article is devoted to the solution of the problem of forming recommendations to new users, which is based on the ideas of transition from the matrix «user-object» to the ranking of objects and the formation of recommendations to the user of the active cluster based on the construction of the resulting ranking, which is a Kemeny median on a set of rankings. The choice of Kemeny median as the resulting ranking and the choice of algorithm for its construction are justified. To reduce the complexity of calculations, it is suggested to perform aggregation of information and to use it in forming of ranking recommendations, which are based on a set of «generalized experts» for this cluster. The efficiency of the developed algorithmic support was studied and the results and recommendations were given.

Keywords: recommender system, consensus ranking, Kemeny median.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕДИАНЫ КЕМЕНИ В АЛГОРИТМЕ ФОРМИРОВАНИЯ РЕКОМЕНДАЦИЙ / О.С. Жураковская, И.Ю. Кочубей

Аннотация. Рассмотрен актуальный в настоящее время вопрос разработки алгоритмического обеспечения рекомендательных систем. Работа посвящена решению проблемы формирования рекомендаций новым пользователям, в основе которого лежат идеи перехода от матрицы «пользователь–предмет» к ранжированию предметов и формирования рекомендаций пользователю активного кластера на основе построения результирующего ранжирования, которое представляет собой медиану Кемени на множестве ранжирований. Обоснован выбор медианы Кемени в качестве результирующего ранжирования, а также выбор алгоритма ее построения. Для снижения сложности вычислений предложено осуществлять агрегацию информации и использовать при формировании рекомендации ранжирования, построенные на множестве «обобщенных экспертов» для данного кластера. Исследована эффективность разработанного алгоритмического обеспечения, приведены результаты и рекомендации.

Ключевые слова: рекомендательная система, согласованное коллективное ранжирование, медиана Кемени.

**METHODOLOGY OF NON-LINEAR ROBUST ESTIMATION
FOR THE SOLUTIONS SYNTHESIS OF INVERSE AND DIRECT
MULTIDISCIPLINARY PROBLEMS IN ENGINEERING
DIMENSIONAL CHAINS CALCULATION BASED ON DISCRETE
ANALOG DATA**

**I. TROFYMOVA, I. MENIAILOV, S. CHERNYSH, S. YEPIFANOV,
O. KHUSTOCHKA, M. UGRYUMOV, A. MYENYAYLOV, D. CHUMACHENKO**

Abstract. This paper analyses the definition of inverse and direct problems in engineering dimensional chains calculation based on discrete analogue data and the methodologies for solving these problems. It is shown that the direct dimensional chains calculation, which belongs to the class of inverse boundary value problems in a stochastic formulation, can be transformed into multi-criteria problems of stochastic optimization with mixed conditions. The new multi-step solutions search methodology for these problems is based on non-linear robust estimation methods. It can be achieved through hierarchical two-level decisions synthesis scheme development. At the first step, this scheme includes identification of surrogate models (in the form of regression equations). At the second step, the effective robust estimates are computed to determine unknown values; estimations of unknown quantities are carried out under a priori and parametric data uncertainties. Results of calculations of inverse and direct problems in engineering dimensional chains for two-stage axial compressors are presented. They were obtained using interactive computer systems for decision-making support “ROD&IDS”.

Keywords: inverse boundary value problems in a stochastic formulation, a priori and parametric uncertainties, methods and systems for estimating quantities and processes, decision-making theory.

INTRODUCTION

Cost-cutting of the systems refinement is one of the most relevant issues in the processes of project development and operation in state-of-the-art technology. It should be noted that a good exact solution of the inverse problem in a deterministic formulation (optimization problem) in practice during mass production, as a rule, leads to a large scatter of the values of the integral characteristics of products. Then there is selective assembly or rejection of products for quality. It is possible to resolve this general technical problem by putting the Robust Estimation methods into practice.

The examples of partial problems that form this general problem are:

- choice of equipment with a certain degree of accuracy for manufacturing products (this will reduce the percentage of failures in serial production and avoid selective assembly of products);

- choice of measuring systems components with a certain degree of accuracy, which will ensure the specified measurement accuracy of controlled variables of systems and processes;
- intelligent diagnostics of systems and processes based on monitoring of controlled state variables;
- prediction of the condition of patients in medical monitoring systems, choice of an individual treatment program for each of them;
- development of new drugs in the pharmaceutical industry;
- robust optimal control of systems and processes;
- machine-building including the product quality control (Design for Six Sigma), and also the areas of industrial safety, ecology, the activities of banks, insurance, audit, etc.

The following mathematical issues arise in the process of the above-mentioned systems development: uncertainties evaluation, structuring of the regularizing algorithms, and high computational complexity of methods for quasi-solutions synthesis under uncertainties.

Such inverse problems are essentially ill-posed since it is not known in which class of functions to search for the solutions and there are uncertainty deals with the choice of the exact solution. However, these problems can be reduced to conditionally well-posed.

Such an approach of reducing inverse problems to structural-parametric optimization problems at stochastics formulation, and for a given structure – to multi-parameter optimization problems in a stochastics formulation is widely used in practice. The synthesis of solutions to such problems is performed using regularization methods based on machine learning algorithms.

The outcomes of this research are the development of new solutions synthesis methods for the stochastic optimization problems with mixed conditions and development of the software which implements them and can be used for practical problem-solving.

One problem is that during the development of state-of-the-art technic objects, it is necessary to take into account a optimal set of design parameters of system elements as well as their resource issues. All these factors form the basis for technological processes formation in manufacturing. For example, nowadays the ratio of the technical defect in gas turbine engine blades manufacturing is around 5%, but it can reach 20% when the blades are checked under their workload frequency. The quality of computation has a direct effect on the manufacturing and operation quality of elements and whole systems.

Another problem is related to manufacturing tolerances that are a part of the design technology. Initially, the tolerances are defined, and then the manufacturing technology is designed to meet them. The technological manufacturing tolerances selection scheme is presented in Fig. 1. The technological tolerances of system elements manufacturing are defined by the given values of confidence intervals of design parameters, the junction type, the seating fit, the processing equipment accuracy rating, and the assembly type. The confidence intervals of design parameters are formed as the result of engineering dimension chains calculation.

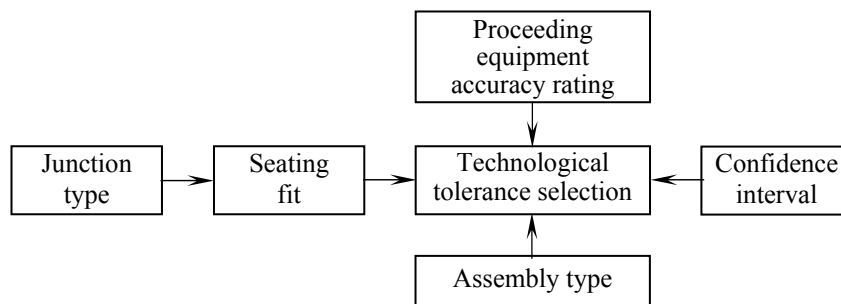


Fig. 1. Scheme of tolerance assignment

There are some methods for determination of confidence intervals of parameters, state variables, and decision selection criteria (objective functions) of system elements based on engineering dimensional chains calculation. These methods include methods based on limiting values, methods based on intervals calculation, and probability methods.

The closing link tolerance is a separable function if the assembly of components takes place. In general, the closing link tolerance is a nonlinear function of its variables – chain links components tolerances.

A decrease of risks related to the high cost of complex technical systems refinement in serial production is possible due to the adoption of the Robust Estimation methods based on the matching learning algorithms. The Robust Estimation has the following issues that need to be addressed: the problem of improvement of existing mathematical models, and the development of new mathematical models and methods for solving stochastic optimization multi-criteria problems (SOMCP).

It is known that random data triggers the uncertainties during the choice of the metrics in objective functions and estimation of target values (parameters, control variables, or state variables) during SOMCP structuring. Besides, the regularizing algorithms must be used for such type of ill-posed problem solving. This provides the stable (robust) estimates of target values. At the same time, the mathematical models will have robust quality, if they are synthesized with the use of regularizing algorithms.

Up to now, many papers have been devoted to the development of the methods, including the methods for objective functions and estimation of target values under conditions of data parametric uncertainties; multi-criteria identification of mathematical models; optimization and decision-making in the robust designing, improving and intellectual diagnostics of technical and medical-biological systems.

The model of optimization under conditions of uncertain multidisciplinary design, which is described by L. Brevault et al. [1], is aimed at the organization of interdisciplinary connections under uncertainties. The suggested method is based on two levels of optimization and surrogate models to provide the convergence of the optimization problem of the functional ratio of multidisciplinary system connections. The solution search algorithm is based on the iterative construction of the functional connections' surrogate models. Coefficients are processed by a system-level optimizer, while subsystem optimizers process local design variables only.

The model selection is a fundamental problem, which is widely discussed during the process of data sets analysis. The hierarchical models with uncertainties may not have a solution when classical approaches are used. Bayes approaches could be applied with predictive distribution usage, but they have disadvantages in certain cases.

Other approaches are also described in the literature: predicting the replication of observed data [2]; the theory of estimation rules on common probability spaces and cross-validation [3]; the probabilistic process described by the Kriging surrogate model with Monte Carlo uncertainty modeling in conjunction with the descriptive sampling method [4].

The solution of design and optimization problems is called stable (robust) if it is resistant to the disturbance of input parameters of the model. The design engineer may prefer to use a robust solution for engineering design optimization problems rather than the optimal one to provide system robustness.

Various approaches to this problem exist, including multi-purpose optimization based on a generalization of the class of functions, which allows conducting orientation of the search area in the object space [5]; combined criteria for stochastic optimization [6]; optimization under uncertainties using parallel computing capabilities in various formulations of problems [7]; search for an allowable range in the input parameters, given an acceptable range in the output quantities [8]; a method for quantifying multidimensional interval uncertainties [9]; interdisciplinary automated process optimization based on an optimization strategy designed to overcome various limitations [10].

The following locally stochastic methods (including those, which are based on self-organization) are used as computational methods for solutions synthesis in stochastic optimization problems:

- stochastic quasi-gradient algorithms;
- evolutionary (genetic, immune) algorithms;
- population methods (simulation of motion: migratory birds; ant or bee colonies).

The overview of evolutionary and computational methods, which can be successfully used for stochastic optimization problem solving, is presented in A.P Karpenko monograph [11] and as publications by other authors [12–14].

I. Menailov et al. proposed a computational method of solutions synthesis of system modification multi-criteria problems in deterministic and stochastic (MV-problems) formulations, which is based on a memetic algorithm [15]. This method combines the method of the convergent neighborhood; the randomized path relinking method; and the evolutionary method with parameters, which are changing from epoch to epoch. These parameters are the real coding operators, fitness, and relaxation functions. This approach provides an effective robust estimation of target values when input data are a priori and parametric uncertainties ones. Also, this approach reduces the informational complexity of the method.

Analysis of existing literature shows that some mathematical issues appear in the process of the development of solutions synthesis methods of multi-criteria problems of mathematical model identification, optimization, and decision-making, especially in the cases of the a priori uncertain data. These issues include:

- decision maker (DM) preferences system forming, i.e. forming of the generalized (the scalar convolutions) objective functions, the limitations system, and the correctness set;
- structuring of the regularizing algorithms of quasi-solutions synthesis;
- the high computational complexity of the defined methods.

Only a few interactive computer systems for decision-making support (CSDMS), which provide robust optimal design feature, exist in the world. These include “Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis” [16], “IOSO Technology, Robust design optimization” [17], “ESTECO, modeFRONTIER” [18, 19], “Dassault Systems, Isight and Fiper” [20], “DYNARDO, optiSLang” [21], “NUMECA International, FineDesign3D” [22], “Concepts NREC’s, Agile Engineering Design System” [23], “AxSTREAM Software” [24], “Propulsion Diagnostic Method Evaluation Strategy (ProDiMES)” [25], and others.

These systems have the following disadvantages: high cost, inability to resolve stochastic optimization multi-criteria problems in MV-formulation (i.e. inverse and direct problems in engineering dimensional chains calculation).

This paper is dedicated to new methodology of non-linear robust estimation for the solutions synthesis of inverse and direct engineering dimensional chains calculation problems under the conditions of a priori and parametric uncertainties. It is shown that this problem can be transformed into multi-criteria problems of stochastic optimization with mixed conditions (to MV-problem). The suggested methodology allows us to search for rational solutions of system modification multi-criteria problems [26, 27] presented in deterministic and stochastic (MV-problem) formulations. This is done through the development of a hierarchical two-level decisions synthesis scheme, which includes:

- inverse determination of the unknown equations governing the variation of measured field quantities of given physical problem – shape identification of robust meta-models or surrogate models (formal mathematical models in the form of regression equations);
- inverse determination of size(s) and shape(s) of the domain – effective robust sought values estimations of unknown quantities are carried out under a priori and parametric data uncertainties.

Results of an inverse and direct problem in engineering dimensional chains calculation for Two-stage axial compressors are resolved by CSDMS “ROD&IDS”. The result is presented below.

PROBLEM STATEMENT

Problem statement and a method for selection of functions and estimation of unknown variables in multi-objective problems with the a priori uncertainties data

Let us consider the problem statement, methodology and results of the solution of Direct Multidisciplinary Problems in Engineering Dimensional Chains Calculation under Uncertainties in nonlinear statement (multi-criteria problems of stochastic optimization with mixed conditions — MV-problems).

The following data are known, presented in a formalized form: structure, functioning model (mathematical model, boundary conditions), properties and general characteristics of the research object, basic requirements for its tactical, technical and economic criteria; the class of admissible controls (methods and devices implementing them).

Let it be known a set of alternatives – learning selection that contains values and confidence intervals of subsystem (functional unit) parameters and control variables. Additionally, the values of mathematical expectations and confidence intervals of decision criteria (objective functions) values are known or phase variables of the system (subsystem) or process under consideration are given. These values are set either by the decision-maker based on his experience or directives or are known based on the results obtained using the measurement system.

So, it is necessary to determine the set of mathematical expectations and confidence intervals of subsystem (functional unit) control variables (model parameters – in the case of an identification problem) and the corresponding values of mathematical expectations and confidence intervals of decision criteria (objective functions) values or phase variables of the system (subsystem) or process under consideration. At the same time, the last found values should be close to the given values of objective functions or phase variables (mathematical expectations and confidence intervals) for the selected metrics.

The Direct Multidisciplinary Problems in Engineering Dimensional Chains Calculation under Uncertainties in nonlinear statement refer to inverse boundary value problems in a stochastic formulation with restrictions on design and operating parameters, phase and control variables.

We will consider the solutions synthesis of the problem as a control process that is based on the concept of invariant control by introducing into the computing system a compensating connection with perturbations (input data and computing errors).

Consider X^0 as a vector of random variables of M dimensions (the model parameters, control variables, state variables); and F^0 as a vector of random variables of I dimensions (measurement data, objective functions). The values F^0 can be found using the initial mathematical model (IMM) of the investigation subject reflected in the form of $F^0 = F(X^0)$, where F is a vector function.

Let us define the projections of X^0 and F^0 as the random variables following a normal distribution with given mathematical expectations, standard deviations, and correlation matrices. This allows considering X^0 and F^0 as systems of several random variables with the multidimensional normal distribution.

Following Kolmogorov's concept of power averages [28], we will use Student's statistics as a criterion for testing the equality of centers of distributions hypothesis for representative samples of two multidimensional general populations; and we will use the multidimensional analog of Romanovsky criterion [29–31] for testing the equality hypothesis of covariance matrices R_o :

$$t = \sqrt{\frac{n_{\alpha}}{2} MD^2},$$

where n_α is the dimension of samples from the general populations; MD is Mahalanobis distance.

$$Ro = \frac{|\chi^2 - k|}{\sqrt{2k}}, \quad k = n_\alpha - 3,$$

where $\chi^2 = \frac{n_\alpha}{N}(\sigma^0)^T R \sigma^0$ is the multidimensional analog of Pearson's chi-squared test; N is a dimension of X^0 (or F^0);

$$\sigma^0 = \left\{ \begin{matrix} \sigma_n \\ \sigma_n^* \end{matrix} \right\}, \quad n = 1..N;$$

σ_n, σ_n^* are standard deviations of variables $x_n \in X^0$ (* – given values); R is a correlation matrix.

Let us define the log-likelihood function. The final form of the scalar convolution for decision-making problems with (1–2) looks like:

$$L(\hat{X} / t_F, Ro_F) = \frac{1}{2}(t_F^2 + Ro_F + t_X^2 + Ro_X) + C_L.$$

Scalar convolutions for the multi-objective problems with the a priori uncertainties data

Further, let us assume that, $R_X = R_F = E$, where R_X and R_F are the correlation matrices. In this case, the following scalar convolution of objective functions in MV-problems is applied:

$$E = \frac{1}{2I} \sum_{i=1}^I \left\{ f_{fit} \left[\left(\mu_i(f_i^*) \frac{\Delta_{f_i}}{f_i^*} \right)^2 (1 + \sigma_{f_i}^0)^{-2} \right] + \beta_f f_{fit} \left(\frac{|\chi_{f_i}^2 - k|}{\sqrt{2k}} \right) \right\} + \\ + \gamma \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^M \left\{ f_{fit} \left[\left(\mu_m(x_m^*) \frac{\Delta_{x_m}}{x_m^*} \right)^2 (1 + \sigma_{x_m}^0)^{-2} \right] + \beta_x f_{fit} \left(\frac{|\chi_{x_m}^2 - k|}{\sqrt{2k}} \right) \right\},$$

where

$$\Delta_{f_i} = M_\alpha[f_i] - f_i^*, \quad \chi_{f_i}^2 = n_\alpha \frac{M_\alpha[(f_i - M_\alpha[f_i])^2]}{(\sigma_{f_i}^*)^2}; \quad \sigma_{f_i}^0 = \left\{ \begin{matrix} \sigma_{f_i} \\ \sigma_{f_i}^* \end{matrix} \right\};$$

$$\frac{|\chi_{f_i}^2 - k|}{\sqrt{2k}} = \frac{n_\alpha}{\sqrt{2(n_\alpha - 3)}} \left| (\sigma_{f_i}^0)^2 - 1 + \frac{3}{n_\alpha} \right|;$$

$$\Delta_{x_m} = M_\alpha[x_m] - x_m^*, \quad \chi_{x_m}^2 = n_\alpha \frac{M_\alpha[(x_m - M_\alpha[x_m])^2]}{(\sigma_{x_m}^*)^2}; \quad \sigma_{x_m}^0 = \left\{ \begin{matrix} \sigma_{x_m} \\ \sigma_{x_m}^* \end{matrix} \right\};$$

$$\frac{|\chi_{x_m}^2 - k|}{\sqrt{2k}} = \frac{n_\alpha}{\sqrt{2(n_\alpha - 3)}} \left| (\sigma_{x_m}^0)^2 - 1 + \frac{3}{n_\alpha} \right|,$$

x_m^* , σ_m^* are the values of mathematical expectation and standard deviation of x_m variable for the prototype; σ_{xm} is standard deviation value of $x_m \in X^0$ variable; f_i^* , $\sigma_{f_i}^*$ are the values of mathematical expectation and standard deviation of f_i decision selection criterion for the prototype; σ_{f_i} is standard deviation value of $f_i \in F^0$ decision selection criterion; f_{fit} is a fitness function (FF); $f_{fit}(d) = 1 - \exp(-Cd)$, $C > 0$ (it has been selected based on the condition that initial value of $E_{av}^{(1)}$ was $E_{av}^{(1)} < 1$), where d is an argument of FF ($d > 0$); $\mu_i(f_i^*)$, $\mu_m(x_m^*)$ are membership functions; γ is a parameter of regularization (if $\gamma = 0$ this is epy identification, else if $\gamma = 1$ this is optimization); β_f, β_x are parameters of robustness.

Hence, the problem of $\hat{X} = (M[X^0], \sigma_X^0)$ non-linear robust estimation can be transformed to SOMCP with mixed conditions (to MV-problem in our case). According to the principle of maximum likelihood [32] (M-estimate), the quasi-solution of this problem is the following:

$$\hat{X} = \arg \inf_{\hat{X} \in D_X} E(\hat{X} / t_F, Ro_F),$$

where D_X is a correctness set, which is defined by the decision maker's system of preferences in the general case. It was assumed in this case that D_X is a convex set.

THE NEW METHODS NON-LINEAR ROBUST ESTIMATION FOR THE SOLUTIONS SYNTHESIS OF INVERSE AND DIRECT MULTIDISCIPLINARY PROBLEMS IN ENGINEERING DIMENSIONAL CHAINS CALCULATION BASED ON DISCRETE ANALOG DATA

As a result of the decomposition of the methodology to solve the main problem (3, 4), it decomposes into a sequence of interrelated methods, in particular:

- Input data preparation: input data preliminary normalization methods. Data of alternatives (samplings) are used as input data: design values and operational parameters, control and phase variables, decision selection criteria (objective functions). The samplings are formed using either the solutions in the deterministic formulation of the direct analysis problem or the results of discrete analog data experimental research.
- Methods of inverse determination of the unknown equations governing the variation of measured field quantities of given physical problem – shape identification of robust meta-models or surrogate models (formal mathematical models in the form of regression equations). The methods of approximation of vector functions of vector variables based on the application of a trainable artificial neural network (ANN), which are multilayer feedforward ones and radial-basis ANN. The training of ANN is carried out by a stochastic approximation method based on the conjugate gradients ravine method [33] together with the bee colonies

simulation, in which the scalar convolution of objective functions (3) with $\gamma = 0$ is used for rational decision selection. The proposed implementation allows us to obtain effective stable (robust) estimates of the neural network model parameters under the condition of input a priori and parametric uncertainties. It provides a robust meta-models synthesis and the data approximation accuracy, which is sufficient in system improvement problems. Application of the proposed methods avoids the appearance of false ravines or valleys on response surfaces in case of gross errors in the input data.

- Graphical tools for the 3D-representation of meta-models.
- Methods of meta-model variables informativeness (importance) estimations (taking into account the pair correlation and the accuracy of variables measurement) [34]. In particular, the solutions of controlled variables set synthesis for systems designing or failure diagnostics under conditions of a priori and parametric uncertainties of input data may be obtained on the base of the received results.
- Methods for solving the problem of systems and processes state classification on the base of multilayer feedforward and radial-basis ANN application with the usage of the monitoring data of controlled variables [35].
- Solutions synthesis of system modification multi-criteria problems in deterministic and stochastic (MV-problem) formulations [15, 33].

The solution of the inverse problem of engineering dimensional chains calculation/Monte Carlo analysis (MCA) is found for the prototype at the first stage: the estimation of confidence intervals of decision selection criteria (objective functions) mean values at the given confidence intervals of subsystems control variables (functional elements) mean values.

The quasi-solutions synthesis of this problem is carried out by regularization of the smoothing functional minimum search in the form of objective functions scalar convolution (1) with. The comparative analysis of various systems production technologies may be carried out on the base of the obtained results [15].

Solutions synthesis of the direct problem of engineering dimensional chains calculation – system modification problem quasi-solutions in deterministic and stochastic (MV-problem) formulations is carried out by the regularization method at the second stage. The objective functions scalar convolution (1) was used as the smoothing function [15]. The computational method based on meme's algorithm is applied. It includes the parameters changing from epoch to epoch such as the operators of real coding, the fitness and relaxation functions, and also the method of the convergent neighborhood and the randomized path relinking method.

This approach provides an effective robust estimation of target values when input data are a priori and parametric uncertainties ones. Also, this approach reduces the informational complexity of the quasi-solutions synthesis method.

Thus, the direct problem solution of engineering dimensional chains calculation is solved by the probabilistic method (2). Mathematical expectations and confidence intervals of subsystems control variables (functional elements) are found according to the given values of mathematical expectations and the decision selection criteria confidence intervals (of the objective functions). Also, they could be found according to phase variables of the systems (subsystems).

NEW MEMETIC ALGORITHM OF THE STOCHASTIC OPTIMIZATION PROBLEM WITH MIXED CONDITIONS

The quasi-solution of this problem (normal solution) may be found by the regularization method [32]. Quasi-solutions synthesis of system modification multi-criteria problems in deterministic and stochastic (MV-problem) formulations is carried out by the computational method based on memes algorithm.

Let us define an evolutionary method (EM) as a classical genetic algorithm (GA) modification with the parameters, which are changing from epoch to epoch. This paper presents features which distinguish the suggested EM from classical GA.

The real coded crossover operator that simulates the binary one is used [11]. Mikhalevich non-uniform mutation operator is used as the real coded mutation operator, which relates to a class of nonstationary mutators.

After crossover operations and mutation, the most adapted individual is selected and put to the set of individuals intended for the next epoch of the algorithm. The most adapted individual is the individual, the selection criteria scalar convolution values of which are the most acceptable.

It is known that clustering is one of the means for the EM convergence rate to increase. Decremental Neighborhood Method (DNM), which realizes the idea of clustering [15], has been developed to improve the convergence rate and accuracy of the extremum finding.

The suggested memetic algorithm is several times less complex in terms of the information and time complexities compared to the classical GA, because of combining parameters changing from epoch to epoch such as the operators of real coding, the fitness and relaxation functions and also the method of the convergent neighborhood and the randomized path relinking method.

NUMERICAL TESTS

The “ROD&IDS” interactive computer system for decision-making support was developed. It implements the foregoing methodology.

As an example, let us consider the results of an inverse and direct problem in engineering dimensional chains calculation for a two-stage axial compressor under conditions when input data is stochastic.

The aerodynamic design of the compressor two axial stages was fulfilled for gas-turbine drive power increasing from 8 to 10 MW. The “Axial” software (Copyright © 1998-2017. Concepts NREC LLC) [23] was used during the stages calculations basing on the average radius parameters. The problems of these stages efficiency increasing (without gas-dynamic stability reducing) at the design values of inlet mass flow rate and rotational speed was solved by the application of “ROD&IDS”.

The compressor efficiency maximum search was carried out with following elements changes of blades rows of the first and second compressor stages: the gas path tip radius (6 variables), stagger angles (4 variables), entry and exit geometrical angles (8 variables) and the cascade solidity (4 variables). For the inlet guide vanes, only the gas path was changed. Experimental sampling was formed

by the change of the gas path radius (within ± 2 mm), geometrical angles of blades airfoils (within ± 2 degrees), and the blades row chord/pitch ratios (within ± 5 %). Approximation of the lines of constant referred speed, beginning from surge line to choke measure is used to adequately describe the effect of varying parameters on the stages map. The computation of inlet mass flow rate values between surge and choke was performed by “Axial” macros. This way, the following quantity of state variables under control was selected: 22 geometric parameters, 1 regime parameter (an inlet mass flow rate), and 450 points characterizing the experimental sampling size.

The following parameters were selected as objective functions:

- α_{out} is flow outlet angle;
- π^* is compressor total pressure ratio at the design inlet mass flow rate value;
- η^* is adiabatic efficiency calculated according to total parameters values at the design inlet mass flow rate value;
- π_{stall}^* is total pressure ratio on surge line;
- G_{choke} is the choke inlet mass flow rate value;
- form-parameter is the parameter of response surface form corresponding to the objective function selected at the design inlet mass flow rate value.

Further, the robust neural network models in the form of radial-basis ANNs were used as meta-models of the systems.

Optimization was carried out based on the design inlet mass flow rate values in deterministic and stochastic formulations.

Computational results in the deterministic formulation are presented in Fig. 2 and Table 1, where normalized values are: $G^0 = G/G_{p,0}$, $\pi^0 = \pi^*/\pi_{p,0}^*$, $\eta^0 = \eta^*/\eta_{p,0}^*$, $\Delta\eta^* = \eta^* - \eta_{p,0}^*$ is the efficiency change at the design inlet mass flow rate value in comparison with the prototype, and ΔK_y is gas-dynamic stability margin.

The first deterministic formulation of the optimization problem is selected in such a way that the efficiency maximum at the design inlet mass flow rate value is provided along with the required level of total pressure ratio. As a result, the efficiency increment by 0,41 % in comparison with the prototype was achieved at the design inlet mass flow rate value (MC_2_ (v.2.1) results). The efficiency maximum along the line of constant referred speed is close to the design point. At the same time, the gas-dynamic stability margin increased from 12,6 % to 14,44 %.

The second deterministic formulation of the optimization problem (MC_2_ (v.4.4) results) is implemented to examine how much it is possible to vary the limitations in the optimization problem. For example, let us consider the problem of obtaining a greater efficiency maximum with a more steep behavior of line of constant referred speed in comparison with the prototype. As shown in Fig. 2, the line of constant referred speed with more steep behavior provides a higher level of gas-dynamic stability margin (13,8% in comparison with prototype’s 12,16%) and high maximal efficiency value is provided too. The difference of this optimization from previous decisions lies in the fact that the compressor efficiency is 1,45% less than the prototype’s one at the design inlet mass flow rate value.

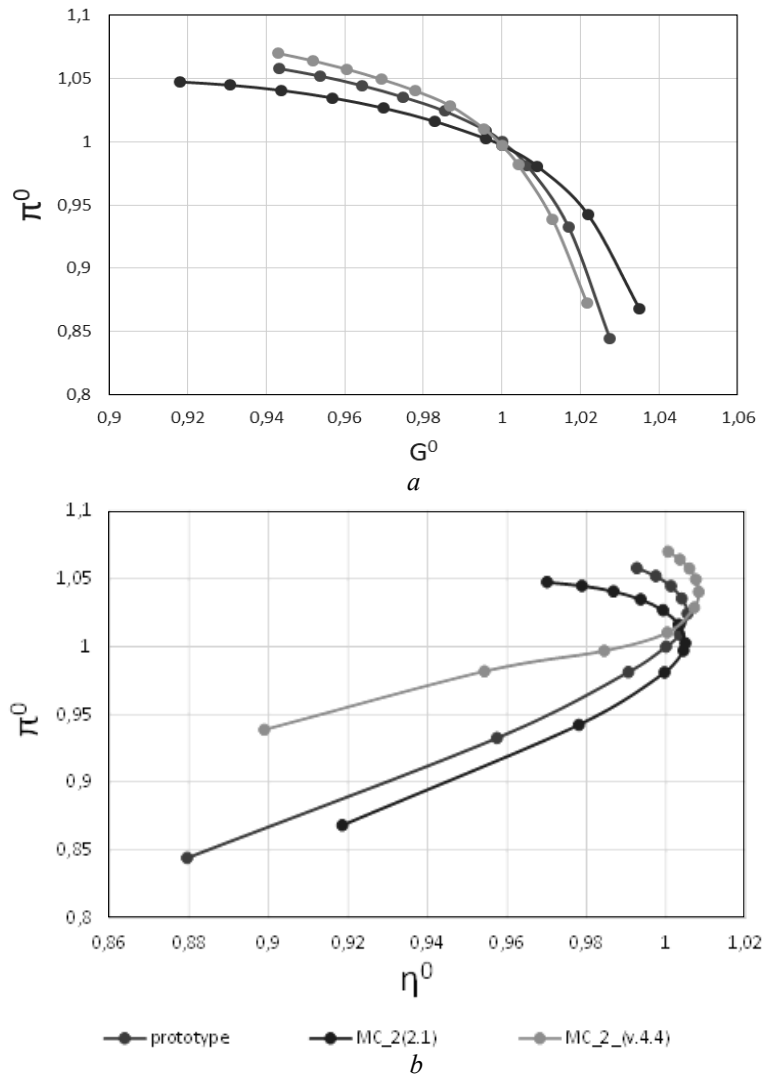


Fig. 2. Performances of the prototype and compressors optimal versions: a — $[G^0, \pi^0]$ relation; b — $[\eta^0, \pi^0]$ relation

Thus, according to the provided example, it was shown that obtaining such blade rows geometry is possible. This solution can meet the requirements of the compressor performances made by a design engineer.

As an example, the calculations intended to provide efficiency maximum value at the designed inlet mass flow rate and efficiency maximum along the line of constant referred speed were performed. These calculations meet the required level of the total pressure ratio (the same as the prototype's one). Implementation of additional limitations to the objective functions gives the possibility to get more or less steep behavior of the two-stage compressor line of constant referred speed in comparison with the prototype.

Let us consider the manufacturing of a product series consisting of 100 copies. We chose a prototype, optimized it in a traditional deterministic formulation. We enhanced of the efficiency for compressor optimal version at deterministic formulation $\Delta\eta_d^* = 0,406\%$ in comparison with the prototype (see in Table 1).

Table 1. Comparison of objective functions values for compressors versions

Values/Variants	$\Delta\eta_d^*$, %	$\Delta\eta_{\max}^*$, %	ΔK_{stall} , %
Prototype	0	0,494	12,157
MC_2 (v.2.1)/ deterministic formulation	0,406	0,449	14,444
MC_2(v.4.4)/ deterministic formulation	-1,448	0,756	13,80

Further, taking as a basis the calculated parameters of this optimal version, we will make 100 copies of products. To conclude that the products comply with the technical specifications, we will evaluate the results of numerical modeling of work of 100 copies of products in accordance with the methodology presented in the article.

Mathematical expectation, confidence intervals of regime parameters mean values, and control variables, which are the prototype data, are known (the first row in Tables 2 and 3). In Table 2 $-\Delta_{x_m}^0 = \frac{\Delta x_m}{x_{m,\max}} \cdot 100$ is the accuracy class of regime parameters and control variables, $x_{m,\max}$ parameter is the maximum value in the learning sample.

The stochastic formulation of the optimization problem is selected in such a way that the maximal level of efficiency mathematical expectation at the design inlet mass flow rate value and at the required level of objective functions mathematical expectations and confidence intervals would be provided in the product line.

Solving the inverse problem of engineering dimensional chains calculation/Monte Carlo analysis (MCA) was carried out for the prototype on the first stage. In other words, estimation of confidence intervals of decision selection criteria (objective functions) mean values were carried out under given confidence intervals of subsystems control variables mean values (functional elements). MCA results are presented in Tables 3 and 4. Table 3 shows that the confidence intervals of objective functions mean values increased in comparison with assumed measurement precision. At the same time, the values of mathematical expectations of objective functions were reduced for the considered compressor versions (see Table 4). These MCA results are typical for the results obtained in the deterministic statement.

System modification quasi-solutions synthesis in the stochastic formulation (MV-problem) is carried out on the second stage in order searching the mathematical expectations and confidence intervals of subsystem (functional unit) control variables and the corresponding values of mathematical expectations and confidence intervals of decision criteria (objective functions) values or phase variables of the system (subsystem) or process under consideration at the design inlet mass flow rate value that is close to the given values for the selected metrics.

Overall results of decisions synthesis of modification problems are presented in the stochastic formulation, in other words, the confidence intervals of regime parameters and control variables mean values are presented in Tables 2–4. A comparison of mathematical expectations of objective function values is presented in Tables 2–4 too.

Table 2. Confidence intervals of regime parameters and control variables mean values

Values/variants	$\Delta^0 G$, %	Δ^0 of gas path duct radii on the periphery, %	Δ^0 of blades rows geometrical angles, %	Δ^0 of the cascade solidity, %
Prototype/given values	$\pm 0,05$	$\pm 5,0$	$\pm 2,5$	$\pm 1,0$
MC_2_(v.2.1)/deterministic formulation/given values	$\pm 0,05$	$\pm 5,0$	$\pm 2,5$	$\pm 1,0$
MC_2_(v.2.1)/stochastic formulation/calculation results	$\pm 0,04$	$\pm 4,0$	$\pm 2,0$	$\pm 0,8$

Table 3. Confidence intervals of objective functions mean values

Values/variants	$\Delta \alpha_{out}$, degrees	$\Delta \pi_d^*$	$\Delta \eta_d^*$, %	$\Delta \pi_{stall}^*$	ΔG_{choke} , kg/s	Δ Form-parameter
Precision of Measurements	$\pm 0,2367$	$\pm 0,0121$	$\pm 0,47$	$\pm 0,0122$	$\pm 0,2680$	$\pm 0,0004$
Prototype/Monte Carlo analysis	$\pm 0,0882$	$\pm 0,0180$	$\pm 0,58$	$\pm 0,0053$	$\pm 0,0575$	$\pm 0,0068$
MC_2_(v.2.1)/deterministic formulation/Monte Carlo analysis	$\pm 0,1626$	$\pm 0,0660$	$\pm 2,49$	$\pm 0,0049$	$\pm 0,0547$	$\pm 0,0216$
MC_2_(v.2.1)/stochastic formulation/desired values	$\pm 0,0900$	$\pm 0,0120$	$\pm 0,50$	$\pm 0,0050$	$\pm 0,0600$	$\pm 0,0070$
MC_2_(v.2.1)/stochastic formulation/calculation results	$\pm 0,0830$	$\pm 0,0126$	$\pm 0,41$	$\pm 0,0055$	$\pm 0,0508$	$\pm 0,0053$

Table 4. Comparison of mathematical expectations of objective functions values for compressors versions

Values/versions	$\Delta \alpha_{out}$, degrees	$\Delta \pi_d^*$	$\Delta \eta_d^*$, %	$\Delta \pi_{stall}^*$	ΔG_{choke} , kg/s
Prototype/Monte Carlo analysis	-0,03	-0,015	-0,58	-0,011	0,009
MC_2_(v.2.1)/deterministic formulation/Monte Carlo analysis	-0,20	-0,083	-2,49	0,019	0,053
MC_2_(v.2.1)/stochastic formulation/calculation results	0,02	0,016	0,24	-0,009	0,603

The result presented in Table 4 shows that the efficiency mathematical expectation value $\Delta \eta_d^*$ for compressor optimal version at deterministic formulation decreased by $(2,49-0,58) \% = 1,91\%$ in comparison with the prototype data obtained by MCA method. The result presented in Table 3 shows that the efficiency confidence interval value for compressor optimal version at deterministic formu-

lation enhanced by $(2,49-0,58)\% = 1,91\%$ in comparison with the prototype data obtained by MCA method.

This is the main result of the research, confirming what said earlier that a good exact solution of the inverse problem in a deterministic formulation (optimization problem) in practice in mass production, as a rule, leads to a large scatter of the values of the integral characteristics of products.

The result presented in Table 4 shows that the efficiency mathematical expectation value $\Delta\eta_d^*$ for compressor optimal version at stochastic formulation is enhanced by $(0,24+0,58)\% = 0,82\%$ in comparison with prototype. It should be noted, that at the same time saved desired confidence intervals average values of objective functions (see the last row in Table 3). But this could be achieved by 20% enhancement of compressor elements manufacturing accuracy (see the last row in Table 2).

Also, there is a significant difference in the mathematical expectations' values of the control variables, which were obtained by problem-solving in deterministic and stochastic formulations.

Here is a justification for the need implementation of the concept and developed by us methodology of robust estimation based on the synthesis of robust surrogate models and solutions to multidisciplinary MV-problems in mass manufacturing of products. The use of our developments in mass manufacturing of products will reduce the percentage of rejects.

The sought quantities estimations in the result of solving of modification problem in the stochastic formulation are the effective and stable (robust) ones.

CONCLUSIONS

The new methodology of non-linear robust estimation for the solutions synthesis of inverse and direct multidisciplinary problems in engineering dimensional chains calculation under conditions of a priori and parametric uncertainties was developed. It is shown that this problem as a inverse boundary value problems in a stochastic formulation can be transformed into multi-criteria problems of stochastic optimization with mixed conditions (MV-problems). The methodology allows us to obtain the rational solutions of system modification multi-criteria problems in deterministic and stochastic (MV-problem) formulations. It can be achieved through hierarchical two-level decisions synthesis scheme development, which includes:

- inverse determination of the unknown equations governing the variation of measured field quantities of given physical problem – shape identification of robust meta-models or surrogate models (formal mathematical models in the form of regression equations);
- inverse determination of size(s) and shape(s) of the domain – effective robust sought values estimations of unknown quantities are carried out under a priori and parametric data uncertainties.

The results of solving inverse and direct problems in engineering dimensional chains calculation under the conditions where input data are stochastic for two-stage axial compressors were obtained with the usage of “ROD&IDS” and provided as an example.

Based on the analysis of numerical simulation results shown, that a good exact solution of the inverse problem in a deterministic formulation (optimization problem) in practice in mass production, as a rule, leads to a large scatter of the values of the integral characteristics of products.

Application in practice of the concept and developed by us methodology of robust estimations, based on the synthesis of robust surrogate models and solutions to multidisciplinary MV-problems, in mass manufacturing of products will reduce the percentage of rejects.

The developed interactive computer systems for decision-making support “ROD&IDS” can be applied to various fields of science, medicine, and technology. Particularly, this software may be used by the wide range of specialists, who work on the issues of robust meta-models’ design (formal mathematical models in the form of regression equations), as well as on the issues of optimization and decision-making in the process of robust design, improving and intellectual diagnostics of technical and medical-biological systems, ecology, the activities of banks, insurance, and audit companies etc.

REFERENCES

1. L. Brevault, M. Balesdent, R. Le Riche, and N. Berend, “Multi-level hierarchical MDO formulation with functional coupling satisfaction under uncertainty, application to sounding rocket design”, in *Proceedings of the 11th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation*, 7–12 June 2015, Sydney, Australia.
2. A.E. Gelfand and S.K. Ghosh, “Model choice: A minimum posterior predictive loss approach”, *Biometrika*, 85 (1), pp.1–11, 1998.
3. T. Gneiting and A.E. Raftery, “Strictly proper scoring rules, prediction, and estimation”, *American Statistical Association Journal of the American Statistical Association*, 102(477), pp. 359–378, 2007.
4. S. Lee, D. Rhee, and K. Yee, “Optimal arrangement of the film cooling holes considering the manufacturing tolerance for high pressure turbine nozzle”, in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, 13–17 June 2006, Seoul, South Korea.
5. T. Erfani and S.V. Utyuzhnikov, “Control of robust design in multiobjective optimization under uncertainties”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 45(2), pp. 247–256, Feb. 2012.
6. I.N. Egorov and G.V. Kretinin, “Optimization of gas turbine engine elements by probability criteria”, in *Proceedings of ASME 1993 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition*, 24–27 May 1993, Cincinnati, OH.
7. A.A. Giunta, M.S. Eldred, L.P. Swiler, T.G. Trucano, and S.F. Wojtkiewicz, “Perspectives on optimization under uncertainty: algorithms and applications”, in *Proceedings of 10th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, 30 Aug. –1 Sept. 2004, Albany, NY.
8. K.K. Bodla, J.Y. Murthy, and S.V. Garimella, “Optimization under uncertainty for electronics cooling design applications”, in *Proceedings of 13th InterSociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, 30 May –1 June 2012, San Diego, CA, pp. 1191–1201.
9. M. Broggi, M. Faes, E. Patelli, Y. Govers, D. Moens, and M. Beer, “Comparison of Bayesian and interval uncertainty quantification: Application to the AIRMOD test structure”, in *Proceedings of 2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, 27 Nov. –1 Dec. 2017, Honolulu, HI, pp.1–8.

10. A.-L. Aulich and D. Goerke, “Multidisciplinary automated optimization strategy on a counter rotating fan”, in *Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition GT2013*, 3–7 June 2013, San Antonio, TX. (ASME paper GT2013-94259)
11. A.P. Karpenko, *Modern algorithms. Algorithms inspired by nature: study guide*. Moscow: MSTU Publishing House N.E. Bauman, 2014.
12. C. Blum, M.J.B. Aguilera, A. Roli, and M. Sampels (Eds.), *Hybrid Metaheuristics: An Emerging Approach to Optimization*. Berlin: Springer-Verlag, 2008.
13. K. Deb, *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester, UK: Wiley, 2001.
14. X.S. Yang, *Nature-inspired Metaheuristic Algorithms*. Frome (UK): Luniver Press, 2010.
15. I. Menailov, O. Khustochka, K. Ugryumova, S. Chernysh, S. Yepifanov, and M. Ugryumov, “Mathematical models and methods of effective estimation in multi-objective optimization problems under uncertainties”, in *Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization: Proceedings of WCSMO12*, 5–9 June 2017, Braunschweig, Germany. SpringerLink, 2018.
16. *National priorities. Featured at Sandia*. Albuquerque, NM: Sandia, LLC. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: www.sandia.gov
17. *High efficiency IOSO design optimization software*. Moscow, Russia: Sigma Technology. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: www.iosotech.com
18. *Robust Design & Reliability*. Trieste, Italy: ESTECO SpA. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: <http://www.esteco.com/modelfrontier/robust-design-reliability/>
19. *ISIGHT & The Simulia execution engine. Process automation and design exploration*. Trieste, Italy: ESTECO SpA. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/isight-simulia-execution-engine/>
20. *TOSCA Fluid. Design concepts and CFD optimization for fluid flow*. Vélizy-Villacoublay, France: Dassault Systèmes. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: www.3ds.com/products-services/simulia/products/tosca/fluid/
21. *Optimization and robust design optiSLang*. Moscow, Russia: CADFEM-CIS. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: www.cadfem-cis.ru/products/additional/optislang/
22. *NUMECA International, FineDesign3D*. Brussels, Belgium: NUMECA International. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: <http://www.numeca.com/home>
23. *The Complete Software Solution – From Art to Part*. White River Junction, VT: Concepts NREC. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: <http://www.conceptsnrec.com/solutions/software>
24. *SoftInWay Inc. «AxSTREAM» Software Platform*. Burlington, MA: SoftInWay Inc. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: <http://www.softinway.com/software/>
25. *Intelligent Control and Autonomy Branch. Propulsion Diagnostic Method Evaluation Strategy (ProDiMES)*. Cleveland, OH: NASA Glenn Research Center. Accessed on: June 2, 2019. [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/cdtb/software/ehmbenchmark.html>
26. M.L. Ugryumov, A.A. Tronchuk, V.E. Afanasjevska, and A.V. Myenyaylov, “Gas turbine engine elements systematic improvement on the base of inverse problem concept by stochastic optimization methods”, in *Proceedings of the 20-th ISABE Conference*, 12–16 Sept. 2011, Gothenburg, Sweden. (ISABE Paper no. 2011–1255).
27. M.L. Ugryumov, A.A. Tronchuk, V.E. Afanasjevska, and A.V. Myenyaylov, “Stochastic optimization models and method in the turbomachines system improvement problem”, in *Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference*, 24–29 July 2011, Hamamatsu, Japan. (AJK2011-22057).

28. S.A. Aivazian, Z.I. Bezhaeva, and O.V. Staroverov, *Multivariate observation classification*. Moscow: Statistics, 1974.
29. V.I. Romanovsky, *Applications of mathematical statistics in the test case*. Moscow-Leningrad: Gostechizdat, 1947.
30. V.I. Romanovsky, *Mathematical statistics. Book 1. Fundamentals of the theory of probability and mathematical statistics*. Tashkent: Publishing house of city of Uzbekistan Science Academy, 1961.
31. V.I. Romanovsky, *Mathematical statistics. Book 2. Operational methods of mathematical statistics*. Tashkent: Publishing house of city of Uzbekistan Science Academy, 1963.
32. A.N. Tikhonov and V.Y. Arsenin, *Methods for solving ill-posed problems*. Moscow: Science, 1986.
33. V.E. Strilets et. al., *Systematic improvement of the elements of complex technical systems based on the concept of inverse problems: monograph*. X.: Nat. aerospace. un-t them. N.E. Zhukovsky, Kharkiv Aviation Institute, 2013, 148 p.
34. I.M. Antonyan, V.A. Hot, A.I. Zelensky, and E.M. Ugryumova, "Method for assessing the information content of variables of neural network models of systems and processes with data uncertainty", *News of the Kharkiv National University. Zbirnik naukovykh prac. Seriya: "Mathematical modeling. Information technology. Automation and control systems"*, vol. 26, no. 1156, pp. 5–16, 2015.
35. V. Strilets, N. Bakumenko, S. Chernysh, M. Ugryumov, and V. Donets, "Application of artificial neural networks in the problems of the patient's condition diagnosis in medical monitoring systems", *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – Synergetic Engineering. International Scientific and Technical Conference (ICTM 2019)*, 28–30 Nov. 2019, Kharkov, Ukraine, Springer Link: 2020, pp. 173–185. Available: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_16s

Received 07.12.2020

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

INFORMATION ON THE ARTICLE

Iryna O. Trofymova, ORCID: 0000-0002-1537-5601, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Ukraine, e-mail: i.trofymova@khai.edu

Ievgen S. Meniailov, ORCID: 0000-0002-9440-8378, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Ukraine, e-mail: j.menyailov@khai.edu

Serhii V. Chernysh, ORCID: 0000-0002-1750-5158, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Ukraine, e-mail: mr.serhii.chernysh@gmail.com

Sergiy V. Yepifanov, ORCID: 0000-0003-0533-9524, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Ukraine, e-mail: s.yepifanov@khai.edu

Olexandr M. Khustochka, Scientific Research and Design Complex State Enterprise Zaporizhzhia Machine-Building Design Bureau named after academician A.G. Ivchenko, Ukraine, e-mail: 03527@ivchenko-progress.com

Mykhaylo L. Ugryumov, ORCID: 0000-0003-0902-2735, V.N. Karazin Kharkiv National University, Ukraine, e-mail: m.ugryumov@karazin.ua

Andriy V. Myenyaylov, ORCID: 0000-0003-1407-1224, Commercial Aircraft Engine Co., Ltd, China, e-mail: myenyaylov@ukr.net

Dmytro I. Chumachenko, ORCID: 0000-0003-2623-3294, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Ukraine, e-mail: d.chumachenko@khai.edu

МЕТОДОЛОГІЯ НЕЛІНІЙНОГО РОБАСТНОГО ОЦІНЮВАННЯ ДЛЯ СИНТЕЗУ РОЗВ'ЯЗКІВ ОБЕРНЕНИХ ТА ПРЯМИХ БАГАТОДИСЦИПЛІНАРНИХ ЗАДАЧ У РОЗРАХУНКУ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗМІРНИХ ЛАНЦЮГІВ НА ОСНОВІ ДИСКРЕТНИХ ДАНИХ ПРО АНАЛОГИ / І.О. Трофимова, Є.С. Меньяйлов, С.В. Черниш, С.В. Єпіфанов, О.М. Хусточка, М.Л. Угрюмов, А.В. Меньяйлов, Д.І. Чумаченко

Анотація. Подано постановки обернених і прямих задач розрахунку інженерних розмірних ланцюгів на основі дискретних даних про аналоги і методології розв'язання цих задач. Показано, що задачі розрахунку прямих розмірних ланцюгів належать до класу обернених крайових задач у стохастичній постановці, які можна звести до багатокритеріальних задач стохастичної оптимізації зі змішаними умовами. Нова багатоетапна методологія пошуку розв'язків таких задач ґрунтується на методах нелінійного робастного оцінювання. Це може бути досягнуто шляхом розроблення ієрархічної дворівневої схеми синтезу розв'язків. На першому етапі схема включає ідентифікацію сурогатних моделей (у вигляді рівнянь регресії). Другий етап — визначення ефективних робастних оцінок шуканих величин; невідомі величини оцінюються за апріорної і параметричної невизначеностей даних. Наведено результати розрахунків обернених і прямих задач проектування розмірних ланцюгів для двохступеневих осьових компресорів. Їх отримано за допомогою інтерактивної комп'ютерної системи підтримання прийняття рішень «ROD & IDS».

Ключові слова: обернені крайові задачі в стохастичній постановці, апріорні і параметричні невизначеності, методи і системи оцінювання величин і процесів, теорія прийняття рішень.

МЕТОДОЛОГІЯ НЕЛІНІЙНОГО РОБАСТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ДЛЯ СИНТЕЗА РЕШЕНИЙ ОБРАТНЫХ И ПРЯМЫХ МНОГОДИСЦИПЛИНАРНЫХ ЗАДАЧ РАСЧЕТА ИНЖЕНЕРНЫХ РАЗМЕРНЫХ ЦЕПЕЙ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ ДАННЫХ ОБ АНАЛОГАХ / И.А. Трофимова, Е.С. Меньяйлов, С.В. Черныш, С.В. Епифанов, А.Н. Хусточка, М.Л. Угрюмов, А.В. Меньяйлов, Д.И. Чумаченко

Аннотация. Представлены постановки обратной и прямой задач расчета инженерных размерных цепей на основе дискретных данных об аналогах и методологии решения этих задач. Показано, что задачи расчета прямых размерных цепей относятся к классу обратных крайевых задач в стохастической постановке, которые можно свести к многокритериальным задачам стохастической оптимизации со смешанными условиями. Новая многоэтапная методология поиска решений таких задач основана на методах нелинейного робастного оценивания. Это может быть достигнуто путем разработки иерархической двухуровневой схемы синтеза решений. На первом этапе схема включает идентификацию суррогатных моделей (в виде уравнений регрессии). Второй этап — определение эффективных робастных оценок искомых величин; неизвестные величины оцениваются при априорной и параметрической неопределенностях данных. Приведены результаты расчетов обратной и прямой задач проектирования размерных цепей для двухступенчатых осевых компрессоров. Они были получены с помощью интерактивной компьютерной системы поддержки принятия решений «ROD&IDS».

Ключевые слова: обратные крайевые задачи в стохастической постановке, априорные и параметрические неопределенности, методы и системы оценивания величин и процессов, теория принятия решений.

НАБЛИЖЕНІ ГАРАНТОВАНІ ОЦІНКИ МАТРИЦЬ У ЗАДАЧАХ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ З МАЛИМ ПАРАМЕТРОМ

О.Г. НАКОНЕЧНИЙ, Г.І. КУДІН, П.М. ЗІНЬКО, Т.П. ЗІНЬКО

Анотація. Досліджено задачу знаходження лінійних незмішуваних оцінок лінійного оператора невідомих матриць — складових вектора спостережень. Припускається, що вектор спостережень адитивно залежить від випадкового вектора з нульовим математичним сподіванням, а невідома кореляційна матриця належить до відомої обмеженої множини. Для введеного класу лінійних оцінок доводяться необхідні і достатні умови існування розв’язків операторних рівнянь, які визначають невідомі параметри векторної оцінки. Подано вигляд гарантованої середньоквадратичної похибки оцінки на множинах обмежень параметрів задачі. Досліджено вплив на лінійну незмішувану оцінку малих збурень відомих прямокутних матриць, які є складовими компонент вектора спостережень. Для введених спеціальних операторів, залежних від малого параметра, які визначають відповідні операторні рівняння, а також їх наближені розв’язки у першому наближенні методу малого параметра, подано аналітичний вигляд через параметри збуреного набору сингулярностей. Наведено тестовий приклад розв’язування задачі знаходження лінійної незмішуваної оцінки за умови збурення як лінійно незалежних, так і лінійно залежних відомих матриць спостереження.

Ключові слова: лінійне оцінювання, незміщені оцінки, гарантована середньоквадратична похибка, лінійні операторні рівняння, псевдообернені матриці, малий параметр, збурені відомі матриці спостереження.

ВСТУП

Лінійне оцінювання спостережень з метою отримання незміщених оцінок є предметом дослідження численних наукових публікацій. Перші публікації з лінійного оцінювання спостережень охоплюють кінець попереднього сторіччя [1–6], нині інтерес до тематики зберігається [7].

Задачі лінійного регресійного аналізу в умовах, коли компонентами векторів спостережень є матриці, відомі з яких за припущенням мають малі відхилення від розрахункових, досліджувалися в публікаціях [9, 10]. Із використанням технології псевдообернених операторів, а також методу збурення були досліджені рівняння для незміщених оцінок.

У цій роботі розв’язано задачу лінійного оцінювання у просторі прямокутних матриць спостереження, коли відомі матриці також зазнали малих збурень. Отримано операторні рівняння для коефіцієнтів векторної лінійної

оцінки. Досліджено залежності лінійних оцінок від малих збурень матричних коефіцієнтів лінійної регресії. Наведено тестовий приклад розв'язання задачі лінійної регресії в умовах невизначеності з малими збуреннями.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ГАРАНТОВАНОГО ЛІНІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Нехай спостерігається вектор $y \in R^N$ вигляду

$$y = CX + \eta, \quad (1)$$

де C — лінійний оператор, що діє із простору $H_{m \times n}$ матриць розмірності $m \times n$ у векторний простір R^N ; X — невідома матриця, що належить до відомої множини $G_0 \subset H_{m \times n}$; $\eta \in R^N$ — випадковий вектор, для якого $E\eta = 0$, $E\eta\eta^T = R$ (E — символ математичного сподівання), R — невідома кореляційна матриця із множини

$$G_1 = \{R : \text{sp}(QR) \leq 1\}, \quad (2)$$

де Q — відома симетрична додатно визначена матриця; $\text{sp}(\cdot)$ — слід матриці.

Оскільки справедливі рівності

$$(CX, e^i) = \text{sp}(X(C^* e^i)^T) = \text{sp}(XA_i^T), \quad (3)$$

де C^* — оператор, спряжений до C , $e^i, i = \overline{1, N}$ — базис у R^N , $A_i \in H_{m \times n}$, $i = \overline{1, N}$, то спостереження (1) можна переписати у вигляді

$$y_i = \text{sp}(XA_i^T) + \eta_i, \quad i = \overline{1, N}.$$

Задано лінійний оператор L , що діє із простору матриць $H_{m \times n}$ у скінченновимірний простір H розмірності s з базисом $\bar{e}^i, i = \overline{1, s}$:

$$(LX, \bar{e}^i) = \text{sp}(X(L^* \bar{e}^i)^T) = \text{sp}(XD_i^T), \quad D_i \in H_{m \times n}, \quad i = \overline{1, s}.$$

Ставиться задача знаходження лінійних незміщених оцінок вектора LX , гарантованої середньоквадратичної похибки лінійної оцінки, а також гарантованої середньоквадратичної похибки оцінки.

ЛІНІЙНА НЕЗМІЩЕНА ОЦІНКА

Лінійну оцінку вектора LX будемо шукати у класі оцінок вигляду

$$\hat{LX} = Uy = \sum_{k=1}^s (u_{(k)}, y) \bar{e}^k, \quad (4)$$

де $U \in H_{s \times N}$ — невідома матриця, $u_{(k)}^T = (u_{k1}, \dots, u_{kN})$, $k = \overline{1, s}$, $U = (u_{kj})_{j=1, N}^{k=1, s}$.

Твердження 1. Для незміщеності оцінки вигляду (4) необхідно і достатньо, щоб існували вектори $u_{(k)}$, $k = \overline{1, s}$ такі, що існують розв'язки рівнянь:

$$\rho_k(u_{(k)}) = D_k, \quad k = \overline{1, s}, \quad (5)$$

де ρ_k — лінійний оператор, що діє із простору R^N у простір матриць $H_{m \times n}$, і який має вигляд

$$\rho_k(u_{(k)}) = \sum_{i=1}^N u_{ki} A_i.$$

Доведення необхідності. Нехай виконуються умови (5), тобто існують вектори $u_{(k)}^T = (u_{k1}, \dots, u_{kN})$, $k = \overline{1, s}$ — розв'язки системи рівнянь (5), тоді можна отримати:

$$\begin{aligned} E(\widehat{LX} - LX) &= E(UCX + U\eta - LX) = UCX - LX = \\ &= \begin{pmatrix} u^T_{(1)} \\ \dots \\ u^T_{(s)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{sp}(XA_1^T) \\ \dots \\ \text{sp}(XA_N^T) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{sp}(XD_1^T) \\ \dots \\ \text{sp}(XD_s^T) \end{pmatrix} = 0 \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \text{sp} \left(X \left(\sum_{i=1}^N u_{ki} A_i^T - D_k^T \right) \right) = 0, \quad k = \overline{1, s} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \sum_{i=1}^N u_{ki} A_i^T - D_k^T = 0, \quad k = \overline{1, s}. \end{aligned}$$

Отже, оцінка вектора LX є незміщеною.

Доведення достатності. Якщо оцінка LX у класі лінійних оцінок вигляду (4) за виконання умов (5) є незміщеною:

$$\text{sp} \left(X \left(\sum_{i=1}^N u_{ki} A_i^T - D_k^T \right) \right) = 0, \quad k = \overline{1, s},$$

то з довільності матриць $X \in H_{m \times n}$ і векторів $u_{(k)}^T$, $k = \overline{1, s}$ випливають рівності:

$$\sum_{i=1}^N u_{ki} A_i^T - D_k^T = 0, \quad k = \overline{1, s},$$

які закінчують доведення твердження 1.

Позначимо через ρ_k^+ — оператор, псевдообернений до оператора ρ_k .

Твердження 2 [1]. Для того щоб рівняння (5) мали розв'язки (а отже, існували незміщені оцінки), необхідно і достатньо, щоб матриці D_k , $k = \overline{1, s}$ були такі, що виконуються умови:

$$\rho_k \rho_k^+(D_k) = D_k, \quad k = \overline{1, s},$$

і при цьому розв'язки рівнянь (5) подаються у вигляді

$$u_{(k)} = \rho_k^+(D_k) + (I - \rho_k^+ \rho_k)(w_k),$$

де w_k — вектор із простору R^N ; I — одиничний оператор.

Означення. Гарантованою середньоквадратичною похибкою оцінки \hat{LX} (формула (4)) називається величина

$$\sigma(U) = \left\{ \sup_{G_0, G_1} E \left| \hat{LX} - LX \right|^2 \right\}^{1/2}.$$

Твердження 3. Нехай $U \in H_{m \times n}$, тоді гарантована середньоквадратична похибка оцінки \hat{LX} набуде вигляду

$$\sigma^2(U) = \begin{cases} \lambda_{\max}(UQ^{-1}U^T), & \text{якщо } V = \{U : L = UC\} \neq \emptyset, \\ \infty, & \text{якщо } V = \{U : L = UC\} = \emptyset, \end{cases}$$

Доведення. Оскільки

$$\sigma^2(U) = \sup_{G_0, G_1} E \left| \hat{LX} - LX \right|^2 = \sup_{G_0} |(L - UC)X|^2 + \sup_{G_1} E |U\eta|^2,$$

то якщо $U \in V$, виконується $\sigma^2(U) = \sup_{G_1} E |(U\eta)|^2$.

Із нерівності $|U\eta|^2 \leq \max_{\tilde{G}} |U\eta|^2 (Q\eta, \eta)$, де $\tilde{G} = \{\eta : (Q\eta, \eta) \leq 1\}$, випливає, що

$$\sigma^2(U) = \max_{\eta \in \tilde{G}} |U\eta|^2 = \lambda_{\max}(UQ^{-1}U^T).$$

Очевидно, що якщо $U \notin V$, то $\sup_{G_0} |(L - UC)X|^2 = \infty$.

Наслідок 1. Матриця $UQ^{-1}U^T$ подається у вигляді $(Q^{-1}u_{(i)}, u_{(j)})_{i, j=1, \overline{s}}$.

Наслідок 2. Нехай існує незміщена оцінка (4). Тоді виконується нерівність

$$\min_U \max_{G_0, G_1} \sigma^2(U) \leq \lambda_{\max}(\hat{Q}),$$

де $\hat{Q} = (Q^{-1}\check{u}_{(i)}, \check{u}_{(j)})_{i, j=1, \overline{s}}$, $\check{u}_{(i)} = \rho_i^+(D_i)$.

Наслідок 3. Нехай існує незміщена оцінка (4). Тоді якщо $s = 1$, виконується рівність

$$\min_U \max_{G_0, G_1} \sigma^2(U) = \lambda_{\max}(\hat{Q}) = (Q^{-1}\check{u}_{(1)}, \check{u}_{(1)}),$$

де $\check{u}_{(1)} = \rho_1^+(D_1)$ і оператор ρ_1^+ , якщо $Q = \gamma^2 I$, набувають вигляду

$$\rho_1^+(D_1) = \rho_1^+(\rho_1 \rho_1^+)^{-1} (D_1) \gamma^2.$$

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ ГАРАНТОВАНОГО ЛІНІЙНОГО ОЦІНЮВАННЯ МЕТОДОМ МАЛОГО ПАРАМЕТРА

Далі будемо припускати, що лінійний оператор C (формула (1)) залежить від малого параметра ε , ($\varepsilon > 0$), тобто $C = C(\varepsilon)$. Фактично із цього припущення випливає, що відомі матриці $A_i \in H_{m \times n}$, $i \in \overline{1, N}$ (формула (3)) (компоненти вектора спостережень $y \in R^N$, формула (1)) допускають малі відхилення від розрахункових і залежать від малого параметра: $A_i = A_i(\varepsilon) \in H_{m \times n}$, $i \in \overline{1, N}$. Відповідно, у лінійній оцінці вектора LX (формула (4)) невідома матриця $U \in H_{s \times N}$ залежить від малого параметра, тобто $U = U(\varepsilon) \in H_{s \times N}$, у системі рівнянь (6) $u_{ki} = u_{ki}(\varepsilon)$, $i \in \overline{1, N}$, $k \in \overline{1, s}$ — невідомі компоненти вектор-рядка $u_{(k)}^T(\varepsilon) \in R^N$, $k \in \overline{1, s}$ матриці $U(\varepsilon) \in H_{s \times N}$.

В евклідовому просторі розглядається лінійний оператор $\wp(\varepsilon)$, що діє зі скінченного евклідового векторного простору R^N у простір матриць $H_{m \times n}$ розмірності $m \times n$:

$$\wp(\varepsilon)u_{(k)}(\varepsilon) \equiv \sum_{i=1}^N u_{ki}(\varepsilon)A_i(\varepsilon) = D_k, \quad k \in \overline{1, s}, \quad (6)$$

де $u_{ki}(\varepsilon)$ — невідомі компоненти k -го вектор-рядка матриці $U(\varepsilon) \in H_{s \times N}$, а також спряжений до нього $\wp^*(\varepsilon): H_{m \times n} \rightarrow R^N$. Спряженим оператором $\wp^*(\varepsilon)$ до оператора $\wp(\varepsilon)$ є лінійний оператор, що діє в оберненому операторі $\wp(\varepsilon)$ напрямку:

$$\wp^*(\varepsilon)D_k = \begin{pmatrix} sp(D_k^T A_1(\varepsilon)) \\ \dots \\ sp(D_k^T A_N(\varepsilon)) \end{pmatrix}, \quad k \in \overline{1, s}. \quad (7)$$

Добутком двох операторів $\wp^*(\varepsilon)\wp(\varepsilon): R^N \rightarrow R^N$ (оператор $\wp(\varepsilon)$ визначений формулою (6), а оператор $\wp^*(\varepsilon)$ — формулою (7)) є лінійний оператор, матриця якого має вигляд

$$\wp^*(\varepsilon)\wp(\varepsilon) \equiv F(\varepsilon) = \begin{pmatrix} sp(A_1^T(\varepsilon)A_1(\varepsilon)) & \dots & sp(A_1^T(\varepsilon)A_N(\varepsilon)) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ sp(A_N^T(\varepsilon)A_1(\varepsilon)) & \dots & sp(A_N^T(\varepsilon)A_N(\varepsilon)) \end{pmatrix}.$$

Досліджуватимемо тепер розв'язок системи операторних рівнянь (6):

$$\bar{u}_{(k)}(\varepsilon) = \wp^+(\varepsilon)D_k, \quad D_k \in H_{m \times n}, \quad k \in \overline{1, s}, \quad (8)$$

де $\wp^+(\varepsilon)D_k = \sum_{j=1}^N \lambda_j^{-1}(\varepsilon)v_j(\varepsilon)sp(V_j(\varepsilon)D_k^T)$, $\lambda_j^2(\varepsilon)$, $j \in \overline{1, N}$ — власні числа матриці $F(\varepsilon)$; $v_j(\varepsilon)$, $j \in \overline{1, N}$ — відповідні їм власні вектори:

$$V_j(\varepsilon) = \frac{1}{\lambda_j(\varepsilon)} \sum_{k=1}^N A_k(\varepsilon) v_{jk}(\varepsilon) \in H_{m \times n}, \quad j = \overline{1, N}, \quad (9)$$

$v_{jk}(\varepsilon)$, $j, k = \overline{1, N}$ — компоненти векторів $v_j^T(\varepsilon) = (v_{j1}(\varepsilon), v_{j2}(\varepsilon), \dots, v_{jN}(\varepsilon))$, $j = \overline{1, N}$.

Лінійні оцінки за такого вибору $\bar{u}_{(k)}(\varepsilon)$, $k = \overline{1, s}$ будуть такими:

$$\hat{LX} = \sum_{k=1}^s (\rho^+(\varepsilon) D_k, y) \bar{e}^k.$$

Визначення набору власних чисел і власних векторів матриці $F(\varepsilon)$ методом збурень. Набір власних векторів і власних чисел $(v_j(\varepsilon), \lambda_j^2(\varepsilon))$, $j = \overline{1, N}$ матриці $F(\varepsilon)$ — розв’язки задачі на власні числа і власні вектори:

$$F(\varepsilon) v_j(\varepsilon) = \lambda_j^2(\varepsilon) v_j(\varepsilon), \quad j = \overline{1, N}. \quad (10)$$

У загальному випадку задача (10) аналітичного розв’язку не має, але можна отримати наближений аналітичний розв’язок за допомогою відомого методу збурення [8], якщо використовувати відомий розв’язок розглянутої задачі за умови, що $\varepsilon = 0$, тобто відомий набір власних чисел і власних векторів матриці $F(0)$:

$$F(\varepsilon) = F(0) + \varepsilon F(1) + I_{N \times N} o(\varepsilon),$$

де $I_{N \times N}$ — матриця розмірності $(N \times N)$, усі елементи якої дорівнюють 1, $o(\varepsilon)$ — нескінченно мала величина.

Для матриці нульового наближення $F(0)$ можна припустити (без обмеження загальності), що перші r ($r = \text{rang } F(0)$) власні числа додатні і різні (тобто $\lambda_j^2(0) > 0$, $\lambda_i^2(0) \neq \lambda_j^2(0)$, $i \neq j$, $i, j = \overline{1, r}$), а власне число $\lambda^2(0) = 0$ має кратність $(N - r)$.

Згідно з теорією збурення набори сингулярностей $(v_j(\varepsilon), \lambda_j^2(\varepsilon))$, $j = \overline{1, N}$ (розв’язки задачі (10)) подаються такими виразами (у першому наближенні):

$$\lambda_j^2(\varepsilon) = \lambda_j^2(0) + \varepsilon \lambda_j^2(1) + o(\varepsilon), \quad j = \overline{1, N}; \quad (11)$$

$$v_j(\varepsilon) = v_j(0) + \varepsilon v_j(1) + I_{N \times 1} o(\varepsilon), \quad j = \overline{1, N}. \quad (12)$$

Тут $\lambda_j^2(0) > 0$, $j = \overline{1, r}$ (у наборі нульового наближення сингулярні числа додатні), $\lambda_j^2(0) = 0$, $j = \overline{r+1, N}$ (у наборі нульового наближення нульове сингулярне число кратності $(N - r)$). Власні вектори $v_j(\varepsilon)$, $j = \overline{1, N}$ — ортонормовані.

Підставлення виразів для збуреного набору сингулярностей (11), (12) у рівняння (10) дозволяє отримати співвідношення:

$$\varepsilon^0 : F(0) v_j(0) - \lambda_j^2(0) v_j(0) = 0, \quad j = \overline{1, r}, \quad (13)$$

$$F(0) v_j(0) = 0, \quad j = \overline{r+1, N}; \quad (14)$$

$$\varepsilon^1 : F(0) v_j(1) - \lambda_j^2(0) v_j(1) = \lambda_j^2(1) v_j(0) - F(1) v_j(0), \quad j = \overline{1, r},$$

$$F(0) v_j(1) = \lambda_j^2(1) v_j(0) - F(1) v_j(0), \quad j = \overline{r+1, N}. \quad (15)$$

Рівності (13) визначають набір сингулярностей нульового наближення додатних власних чисел $(v_j(0), \lambda_j^2(0)), \lambda_j^2(0) > 0, j = \overline{1, r}, r = \text{rang } F(0)$ чисел, а рівності (14) для власного $\lambda^2(0) = 0$ визначають $(N - r)$ ортонормованих векторів:

$$v_{r+1}^0(0), v_{r+2}^0(0), \dots, v_N^0(0), \quad F(0) v_j^0(0) = 0, \quad j = \overline{r+1, N}, \quad (16)$$

які можуть бути складовими базису підпростору P_{N-r} власного числа $\lambda^2(0) = 0$. У рівностях (12) власні вектори $v_j(0), j = \overline{r+1, N}$ власних чисел $\lambda_j^2(0) = 0, j = \overline{r+1, N}$ подаються лінійними комбінаціями ортонормованих векторів (16):

$$v_j(0) = \sum_{\mu=r+1}^N d_{j\mu} v_{\mu}^0(0), \quad j = \overline{r+1, N}. \quad (17)$$

Алгоритм обчислення невідомих значень $d_{j\mu}, j, \mu = \overline{r+1, N}$. Підставивши подання власних векторів нульового власного числа через лінійні комбінації ортогональних векторів підпростору P_{N-r} (формула (17)) у вектори (15) (рівняння для $v_j(1), j = \overline{r+1, N}$) і спроектувавши їх на вектори $v_{\nu}^0(0), \nu = \overline{r+1, N}$ базису (16), дістанемо $(N - r)$ систем рівнянь типу систем рівнянь на власні числа і власні вектори матриці $F(1)$:

$$\sum_{\mu=r+1}^N (F_{\nu\mu}(1) - \lambda_j^2(1) \delta_{\nu\mu}) d_{j\mu}^0(\lambda_j^2(1)) = 0, \quad \nu, j = \overline{r+1, N}, \quad (18)$$

де $F_{\nu\mu}(1) = (v_{\nu}^0(0))^T F(1) v_{\mu}^0(0), \delta_{\nu\mu} = (v_{\nu}^0(0))^T v_{\mu}^0(0), \nu, \mu = \overline{r+1, N}$.

Тут $d_{j\mu}^0(\lambda_j^2(1)), \mu = \overline{r+1, N}$ — компоненти ортонормованих векторів, що визначаються з точністю до довільної константи.

Якщо припустити, що корені $\lambda_j^2(1), j = \overline{r+1, N}$ алгебричних рівнянь

$$\begin{vmatrix} (F_{r+1,r+1} - \lambda_j^2(1)) & \cdots & F_{r+1,N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{N,r+1} & \cdots & (F_{N,N} - \lambda_j^2(1)) \end{vmatrix} = 0, \quad j = \overline{r+1, N} \quad (19)$$

додатні і прості, то для нульового кратного в нульовому наближенні власного числа в першому наближенні розв'язками рівняння (10) визначаються поправки, тобто виконуються рівності:

$$\lambda_j^2(\varepsilon) = \varepsilon \lambda_j^2(1) + o(\varepsilon), \quad \lambda_j^2(1) > 0, \quad j = \overline{r+1, N}. \quad (20)$$

Шукані значення параметрів $d_{j\mu}$, $j, \mu = \overline{r+1, N}$ (формула (17)) визначаються у процесі ортогоналізації векторів $\sum_{\mu=r+1}^N d_{j\mu}^0 v_\mu^0(0)$, $j = \overline{r+1, N}$.

Отримана система N -вимірних векторів $v_j(0)$, $j = \overline{1, N}$ (розв'язки системи (13), а також лінійні комбінації (17)) ортонормована і в методі збурення наступні наближення подаються розкладами за цією системою з подальшим їх ортонормуванням:

$$v_j(1) = \sum_{\mu=1}^N C_{j\mu}(1) v_\mu(0), \quad j = \overline{1, N}.$$

Перше наближення розв'язку задачі (10) на власні числа і власні вектори з урахуванням формул (17)–(20) визначається виразами [10]:

$$\lambda_j^2(\varepsilon) = \lambda_j^2(0) + \varepsilon \lambda_j^2(1) + o(\varepsilon), \quad j = \overline{1, r}; \quad (21)$$

$$\lambda_j^2(1) = v_j^T(0) F(1) v_j(0), \quad j = \overline{1, r};$$

$$\lambda_j^2(\varepsilon) = \varepsilon \lambda_j^2(1) + o(\varepsilon), \quad j = \overline{r+1, N}, \quad (22)$$

де $\lambda_j^2(1)$, $j = \overline{r+1, N}$ — корені рівняння (19),

$$v_j(\varepsilon) = v_j(0) + \varepsilon v_j(1) + I_{N \times 1} o(\varepsilon), \quad j = \overline{1, N}; \quad (23)$$

$$v_j(1) = \sum_{\mu=1}^N C_{j\mu}(1) v_\mu(0), \quad j = \overline{1, N};$$

$$C_{jq}(1) = -v_q^T(0) F(1) v_j(0) / (\lambda_q^2(0) - \lambda_j^2(0)), \quad q, j = \overline{1, r}, \quad q \neq j, \quad C_{jj}(1) = 0, \quad j = \overline{1, r};$$

$$C_{jq}(1) = v_q^T(0) F(1) v_j(0) / \lambda_j^2(0), \quad j = \overline{1, r}, \quad q = \overline{r+1, N};$$

$$C_{jq}(1) = -(v_q^T(0) F(1) v_j(0)) / \lambda_q^2(0), \quad j = \overline{r+1, N}, \quad q = \overline{1, r};$$

$$C_{q\mu}(1), \quad q, \mu = \overline{r+1, N} \text{ — довільні.}$$

Відхилення норм власних векторів першого наближення, що відповідають кратному нульовому власному числу, від одиниці згідно з методом збурення пропорційно квадрату малого параметра. Зазначену похибку можна мінімізувати вибором невизначених коефіцієнтів $C_{q\mu}(1)$, $q, \mu = \overline{r+1, N}$.

Перше наближення лінійної оцінки елемента $LX = \text{sp}(XD_i^T)$, $i = \overline{1, s}$. Отримані в першому наближенні N власних чисел і власних векторів для збуреного оператора $\varphi^*(\varepsilon)\varphi(\varepsilon)$ дозволяють знайти в першому наближенні невідомі компоненти $u_{ki}(\varepsilon)$, $k = \overline{1, s}$, $i = \overline{1, N}$ k -го вектор-рядка матриці $U(\varepsilon) \in H_{s \times N}$ — лінійної оцінки вектора LX вигляду $\widehat{LX} = U(\varepsilon)y(\varepsilon)$ (формули (7), (8)):

$$u_{(k)}(\varepsilon) = \sum_{j=1}^N \lambda_j^{-1}(\varepsilon) v_j(\varepsilon) \text{sp}(V_j(\varepsilon) D_k^T), \quad k = \overline{1, s},$$

де

$$\lambda_j^2(\varepsilon) = \lambda_j^2(0) + \varepsilon \lambda_j^2(1) + o(\varepsilon), \quad j = \overline{1, r} \quad (\text{формула (20)});$$

$$\lambda_j^2(\varepsilon) = \varepsilon \lambda_j^2(1) + o(\varepsilon), \quad j = \overline{r+1, N} \quad (\text{формула (21)});$$

$$v_j(\varepsilon) = v_j(0) + \varepsilon v_j(1) + I_{N \times 1} o(\varepsilon), \quad j = \overline{1, N} \quad (\text{формула (22)});$$

$$V_j(\varepsilon) = \frac{1}{\lambda_j(\varepsilon)} \sum_{k=1}^N A_k(\varepsilon) v_{jk}(\varepsilon) \in H_{m \times n}, \quad j = \overline{1, N}; \quad v_{jk}(\varepsilon), \quad j, k = \overline{1, N} —$$

компоненти векторів $v_j(\varepsilon) \in R^N$, $j = \overline{1, N}$.

ПРИКЛАД

Нехай спостереження описуються системою лінійних рівностей:

$$y_k = \text{sp}(XA_k^T(\varepsilon)) + \eta_k, \quad k = \overline{1, 2K},$$

де $A_k(\varepsilon) = (a_{1k}(\varepsilon), a_{2k}(\varepsilon))^T$, $k = \overline{1, 2K}$ — відомі вектори:

$$a_{1k}(\varepsilon) = 1, \quad a_{2k}(\varepsilon) = h_k(1) + \varepsilon h_k(2);$$

$$h_k(1) = (-1)^k h_1, \quad h_k(2) \in R^1, \quad k = \overline{1, 2K}, \quad (24)$$

ε ($\varepsilon > 0$) — малий параметр; $X = (x_1, x_2)^T$ — невідомий вектор; η_k , $k = \overline{1, 2K}$ — компоненти випадкового вектора $\eta \in R^{2K}$, для якого $E\eta = 0$, $E(\eta\eta^T) = R$ (R — невідома кореляційна матриця із множини (2));

$$LX = (\text{sp}(XD_1^T), \text{sp}(XD_2^T))^T, \quad (25)$$

$$D_1 = (1, 1)^T, \quad D_2 = (0, 1)^T — \text{відомі вектори.}$$

Необхідно оцінити вектор $LX = (x_1 + x_2, x_2)^T$.

Розв’язування. Лінійна оцінка компонентів вектора LX визначається розв’язком системи двох матричних рівнянь:

$$\sum_{k=1}^{2K} u_{ki}(\varepsilon)A_k(\varepsilon) - D_i = 0, \quad i = 1, 2, \quad (26)$$

де $u_{ki}(\varepsilon)$ — невідомі компоненти векторів $u_{(i)}^T(\varepsilon) = (u_{1i}(\varepsilon), \dots, u_{2K,i}(\varepsilon))$, $i = 1, 2$ — рядків матриці $U(\varepsilon) = (u_{(1)}(\varepsilon), u_{(2)}(\varepsilon))^T$.

З урахуванням формул (24), (25) система рівнянь (26) переписується у вигляді:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^{2K} u_{k1}(\varepsilon) &= 1, & \sum_{k=1}^{2K} u_{k2}(\varepsilon) &= 0, \\ \sum_{k=1}^{2K} u_{k1}(\varepsilon)(h_k(1) + \varepsilon h_k(2)) &= 1, & \sum_{k=1}^{2K} u_{k2}(\varepsilon)(h_k(1) + \varepsilon h_k(2)) &= 1, \end{aligned}$$

для якої в межах пошуку розв’язку з мінімальною нормою подаються оптимальні оцінки $\hat{u}_{ki}(\varepsilon)$, $k = \overline{1, 2K}$, $i = \overline{1, 2}$ у вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{u}_{ki}(\varepsilon) &= z_1^{(i)}(\varepsilon) + z_2^{(i)}(\varepsilon)(h_k(1) + \varepsilon h_k(2)); \\ z_1^{(i)}(\varepsilon), z_2^{(i)}(\varepsilon) &\in R^1, \quad k = \overline{1, 2K}, \quad i = \overline{1, 2}. \end{aligned} \quad (27)$$

Невідомі параметри $z_q^i(\varepsilon) \in R^1$, $q, i = \overline{1, 2}$ визначаються розв’язком операторних рівнянь:

$$\begin{aligned} \wp_1(\varepsilon)(z_1^{(i)}(\varepsilon), z_2^{(i)}(\varepsilon))^T &\equiv z_1^{(i)}(\varepsilon)B_1(\varepsilon) + z_2^{(i)}(\varepsilon)B_2(\varepsilon) = D_i; \\ (z_1^{(i)}(\varepsilon), z_2^{(i)}(\varepsilon))^T &= \wp_1^+(\varepsilon)(D_i), \quad i = \overline{1, 2}, \end{aligned} \quad (28)$$

де

$$B_1(\varepsilon) = (2K, \varepsilon H_2)^T, \quad B_2(\varepsilon) = (\varepsilon H_2, H_1 + 2\varepsilon H_{12} + \varepsilon^2 H_{22})^T;$$

$$H_2 = \sum_{k=1}^{2K} h_k(2), \quad H_1 = 2Kh_1^2;$$

$$H_{12} = \sum_{k=1}^{2K} h_k(1)h_k(2), \quad H_{22} = \sum_{k=1}^{2K} h_k^2(2),$$

$\wp_1^+(\varepsilon)$ — оператор, псевдообернений до $\wp_1(\varepsilon)$.

Спряженим оператором $\wp_1^*(\varepsilon)$ до оператора $\wp_1(\varepsilon)$ є лінійний оператор

$$\wp_1^*(\varepsilon)(D_i) = \begin{pmatrix} \text{sp}(D_i^T B_1(\varepsilon)) \\ \text{sp}(D_i^T B_2(\varepsilon)) \end{pmatrix}, \quad i = \overline{1, 2}.$$

Матриця оператора $\wp_1^*(\varepsilon)\wp_1(\varepsilon): R^{2K} \rightarrow R^{2K}$ — це матриця:

$$F_1(\varepsilon) = F_1(0) + \varepsilon F_1(1);$$

$$F_1(0) = \begin{pmatrix} 4K^2 & 0 \\ 0 & H_1^2 \end{pmatrix}, \quad F_1(1) = \begin{pmatrix} 0 & H_2(2K + H_1) \\ H_2(2K + H_1) & 4H_1H_{12} \end{pmatrix}.$$

Набір власних чисел і власних векторів матриці $F_1(\varepsilon)$ у першому наближенні методу малого параметра для матриці $F(\varepsilon)$:

$$\lambda_1^2(\varepsilon) = 4K^2, \quad v_1(\varepsilon) = (1, 0)^T + \varepsilon \frac{H_2}{2K - H_1} (0, 1)^T; \quad (29)$$

$$\lambda_2^2(\varepsilon) = H_1^2 + \varepsilon 4H_1H_{12}, \quad v_2(\varepsilon) = (0, 1)^T - \varepsilon \frac{H_2}{2K - H_1} (1, 0)^T.$$

Власні вектори у формулах (29) — ортонормовані.

Система нульового наближення не вироджена. У першому наближенні методу малого параметра отримуються розв'язки систем рівнянь (28):

$$\varphi^+(\varepsilon)D_1 = z^{(1)}(\varepsilon) = \frac{1}{2KH_1^2} \begin{pmatrix} H_1(H_1 - \varepsilon H_2) \\ 2KH_1 - \varepsilon(H_1H_2 + 4KH_{12}) \end{pmatrix};$$

$$\varphi^+(\varepsilon)D_2 = z^{(2)}(\varepsilon) = \frac{1}{2KH_1^2} \begin{pmatrix} -\varepsilon H_1H_2 \\ 2K(H_1 - 2\varepsilon H_{12}) \end{pmatrix},$$

які за підставлення у формули (27) визначають у першому наближенні малого параметра оптимальні оцінки $\hat{u}_{ki}(\varepsilon)$, $k = \overline{1, 2K}$, $i = \overline{1, 2}$ у вигляді:

$$\hat{u}_{k1}(\varepsilon) = \frac{1}{2KH_1} (H_1 h_k(1) + \varepsilon(2Kh_k(2) - H_2 h_k(1)), \quad k = \overline{1, 2K};$$

$$\hat{u}_{k2}(\varepsilon) = \frac{1}{2KH_1} \varepsilon(2Kh_k(2) - H_2 h_k(1)), \quad k = \overline{1, 2K}.$$

Отримані вирази для $\hat{u}_{ki}(\varepsilon)$, $k = \overline{1, 2K}$, $i = \overline{1, 2}$ дозволяють у першому наближенні малого параметра визначити шукану оптимальну незміщену оцінку:

$$\hat{LX} \equiv \begin{pmatrix} \hat{x}_1 + \hat{x}_2 \\ \hat{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{2K} \hat{u}_{1i}(\varepsilon) y_i(\varepsilon) \\ \sum_{i=1}^{2K} \hat{u}_{2i}(\varepsilon) y_i(\varepsilon) \end{pmatrix}.$$

Оцінка \hat{LX} у першому наближенні малого параметра суттєво спроститься, якщо $a_{2,k} = (-1)^k h_1 + \varepsilon h_2$, $k = \overline{1, 2K}$. Для цього випадку

$$H_2 = 2Kh_2, \quad H_1 = 2Kh_1^2,$$

що дозволяє дістати вирази $\hat{u}_{ki}(\varepsilon)$, $k = \overline{1, N}$, $i = \overline{1, 2}$ у вигляді:

$$\hat{u}_{k1}(\varepsilon) = \frac{1}{2K} (h_k(1) + \varepsilon h(1 - h_k(1));$$

$$\hat{u}_{k2}(\varepsilon) = \frac{1}{2K} \varepsilon h(1 - h_k(1)), \quad h_k(1) = (-1)^k h_1, \quad h = \frac{h_2}{h_1^2}, \quad k = \overline{1, 2K}. \quad (30)$$

У такий спосіб у першому наближенні малого параметра визначено матрицю $\hat{U}(\varepsilon) = (\hat{u}_{(1)}(\varepsilon) \ \hat{u}_{(2)}(\varepsilon))^T$, компоненти рядків якої подано формулами (30).

Згідно із твердженням 2 квадрат гарантованої середньоквадратичної похибки оцінки \hat{LX} — це величина

$$\sigma^2(U) = \sup_{G_0, G_1} E | \hat{LX} - LX |^2 = \lambda_{\max}(U(\varepsilon)Q^{-1}U^T(\varepsilon)).$$

У розглянутому прикладі $U(\varepsilon) = (\hat{u}_{(1)}(\varepsilon), \hat{u}_{(2)}(\varepsilon))^T$, $Q^{-1} = I$ (I – одинична матриця). Використовуючи значення в першому наближенні малого параметра компонент матриці $U(\varepsilon)$ (формули (30)), нескладно отримати

$$U(\varepsilon)Q^{-1}U^T(\varepsilon) = \frac{1}{(2K)^2} \begin{pmatrix} h_1^2(1-\varepsilon h)^2 + (\varepsilon h)^2 & (\varepsilon h)^2 - (1-\varepsilon h)\varepsilon h h_1^2 \\ (\varepsilon h)^2 - (1-\varepsilon h)\varepsilon h h_1^2 & (\varepsilon h)^2(1+h_1^2) \end{pmatrix}, \quad h = \frac{h_2}{h_1}.$$

Шукана величина $\lambda_{\max}(U(\varepsilon)Q^{-1}U^T(\varepsilon))$ за різних значень параметрів набуває вигляду

$$\varepsilon = 0 \Rightarrow \lambda_{\max}(U(\varepsilon)Q^{-1}U^T(\varepsilon)) = h_1^2;$$

$$h_2 = h_1^2 \Rightarrow \lambda_{\max}(U(\varepsilon)Q^{-1}U^T(\varepsilon)) = h_2^2 - 2\varepsilon h_2^2. \quad (31)$$

Гарантована середньоквадратична похибка оцінки в першому наближенні в не виродженому випадку (формула (31)) за малих збурень приводить до зменшення похибки.

Система нульового наближення вироджена. Розв’язки систем рівнянь (28) у першому наближенні методу малого параметра, якщо $h_1 = 0$, визначаються набором власних чисел і власних векторів матриці $F_1(\varepsilon)$:

$$F_1(\varepsilon) = \begin{pmatrix} 4K^2 & \varepsilon H_2 2K \\ \varepsilon H_2 2K & 0 \end{pmatrix}.$$

Власні числа й власні вектори матриці $F_1(\varepsilon)$:

$$\lambda_1^2(\varepsilon) = 4K^2, \quad v_1(\varepsilon) = (1, 0)^T + \varepsilon \frac{H_2}{2K} (0, 1)^T;$$

$$\lambda_2^2(\varepsilon) = 0, \quad v_2(\varepsilon) = (0, 1)^T - \varepsilon \frac{H_2}{2K} (1, 0)^T. \quad (32)$$

Власні вектори у формулах (32) ортонормовані

У підсумку отримано розв’язки систем рівнянь (28) у першому наближенні методу малого параметра:

$$z^{(1)}(\varepsilon) = - \begin{pmatrix} \varepsilon H_2 \\ 2K + \varepsilon H_2 + 1/(\varepsilon H_2) \end{pmatrix}, \quad z^{(2)}(\varepsilon) = - \begin{pmatrix} 0 \\ \varepsilon H_2 \end{pmatrix},$$

які за підставлення у формули (27) визначають у першому наближенні малого параметра оптимальні оцінки $\hat{u}_{ki}(\varepsilon)$, $k = \overline{1, 2K}$, $i = \overline{1, 2}$ у вигляді:

$$\hat{u}_{k1}(\varepsilon) = (-1)(\varepsilon H_2 + (2K\varepsilon h_k(2) + h_k(2)/H_2));$$

$$\hat{u}_{k2}(\varepsilon) = (-1)\varepsilon^2 H_2 h_k(2), k = \overline{1, 2K}.$$

Оцінка \hat{LX} у першому наближенні малого параметра для цього випадку за умови, що $h_k(2) = \varepsilon h_2$, $k = \overline{1, 2K}$, спроститься:

$$\hat{LX} \equiv \begin{pmatrix} \hat{x}_1 + \hat{x}_2 \\ \hat{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^{2K} \hat{u}_{1i}(\varepsilon) y_i(\varepsilon) \\ \sum_{i=1}^{2K} \hat{u}_{2i}(\varepsilon) y_i(\varepsilon) \end{pmatrix},$$

де

$$\hat{u}_{1i}(\varepsilon) = (-1)(\varepsilon 4K h_2 + 1/(2K)), \quad \hat{u}_{2i}(\varepsilon) = (-1)\varepsilon^2 2K h_2^2, \quad i = \overline{1, 2K}. \quad (33)$$

У припущенні $Q^{-1} = I$ і з використанням значень у першому наближенні малого параметра компонент матриці $U(\varepsilon)$ (формули (30), (33)) матриця $U(\varepsilon)Q^{-1}U^T(\varepsilon)$ набуває вигляду

$$U(\varepsilon)Q^{-1}U^T(\varepsilon) = 4K^2 \begin{pmatrix} (\varepsilon 2h_2 + 1)^2 & \varepsilon^2 h_2^2 \\ \varepsilon^2 h_2^2 & 0 \end{pmatrix}.$$

Гарантована середньоквадратична похибка оцінки в першому наближенні малого параметра (вироджений випадок) така:

$$\lambda_{\max}(U(\varepsilon)Q^{-1}U^T(\varepsilon)) = (1 + \varepsilon 2h_2)^2,$$

тобто малі збурення призводять до збільшення похибки.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено задачу лінійного оцінювання; отримано операторні рівняння для коефіцієнтів векторної лінійної незміщеної оцінки. Для введеного класу лінійних оцінок наведено необхідні і достатні умови існування розв'язків рівнянь, які визначають невідомі вектори шуканих оцінок, подано вигляд гарантованої середньоквадратичної похибки оцінки. Запропоновано розв'язання задачі лінійного оцінювання, коли в компонентах вектора спостережень для відомих матриць можливі малі збурення як лінійно незалежних, так і лінійно залежних відомих матриць. У першому наближенні методу малого параметра розв'язано рівняння для невідомих параметрів шуканих оцінок. Наведено тестовий приклад наближеного аналітичного розв'язку поставленої задачі.

ЛІТЕРАТУРА

1. А. Алберт, *Регресія, псевдоінверсія, рекурентне оцінювання*. Москва: Наука, 1977, 305 с.
2. В.Ф. Арнольд and П. Станлекер, "Linear estimation in regression analysis using fuzzy prior information", *Random Oper. And Stoch. Equ*, vol. 5, no. 2, pp. 105–116, 1997.

3. O. Nakonechnyi and J. Michalek, “Minimax estimates of linear parameters function in regression model under restraictions on parameters and variance-covariance matrix”, *J.Comput.Appl.Math.*, no. 1(81), pp. 22–32, 1997.
4. N. Christopeit and K. Helmes, “Linear minimax estimation with ellipsoidal constraints”, *Acta Applicandae Mathematicae*, 43, 1, pp. 3–15, 1996.
5. V. Girko, “Spektral Theory of Minimax Estimation”, *Acta applicandae mathematicae*, 43, 1, pp. 59–69, 1996.
6. G. Trenkler and P. Stahlecker, “Quasi minimax estimation in the linear regression model”, *Statistics*, 18, pp. 219–226, 1987.
7. Н. Дрейпер та Г. Смит, *Прикладний регресійний аналіз*. Видавничий будинок «Вільямс», 2007, 912 с.
8. Д.І. Блохинцев, *Основи квантової механіки*. Москва: Наука, 1976, 864 с.
9. O.G. Nakonechnyi, G.I. Kudin, and T.P. Zinko, “Formule of perturbation for one class of inverse operators”, *Matematychni Studii*, 52, no. 2. pp. 124–132, 2019.
10. А.Г. Наконечний, Г.І. Кудин, П.Н. Зінко, та Т.П. Зінко, “Метод збурень у задачах лінійної матричної регресії”, *Проблеми керування й інформатики*, № 1, с. 38–47, 2020.

Надійшла 22.12.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Oleksandr G. Nakonechnyi, ORCID: 0000-0002-8705-3070, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, e-mail: a.nakonechniy@gmail.com.

Grygoriy I. Kudin, ORCID: 0000-0002-1322-4551, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, e-mail: gkudin@ukr.net.

Petro M. Zinko, ORCID: 0000-0002-5111-4417, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, e-mail: petro.zinko@gmail.com

Taras P. Zinko, ORCID: 0000-0003-1263-9293, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, e-mail: taras.zinko@gmail.com

APPROXIMATE GUARANTEED ESTIMATES FOR MATRICES IN LINEAR REGRESSION PROBLEMS WITH A SMALL PARAMETER / O.G. Nakonechnyi, G.I. Kudin, P.M. Zinko, T.P. Zinko

Abstract. The problem of finding linear unbiased estimates of the linear operator of unknown matrices — components of the observations vector, is investigated. It is assumed that the observation vector additively depends on a random vector with zero expected value, and the unknown correlation matrix belongs to a known bounded set. For the introduced class of linear estimates, necessary and sufficient conditions for the existence of solutions of operator equations that determine the unknown parameters of the vector estimate, are proved. The form of the guaranteed mean square error of the estimate is introduced on the sets of constraints of the problem parameters. The influence on the linear unbiased estimate of small perturbations of known rectangular matrices, which are the composites of the observations vector components, is also investigated. The analytical form is given through the parameters of the perturbed set of singularities for the introduced special operators that depend on a small parameter, which determine the corresponding operator equations, as well as their approximate solutions, in the first approximation of the small parameter method. A test example of solving the problem of finding a linear unbiased estimate under the condition of perturbation of both linearly independent and linearly dependent known observation matrices is presented.

Keywords: linear estimation, unbiased estimates, guaranteed mean square error, linear operator equations, pseudo inverse matrices, small parameter, perturbed known observation matrices.

ПРИБЛИЖЕННЫЕ ГАРАНТИРОВАННЫЕ ОЦЕНКИ МАТРИЦ В ЗАДАЧАХ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ С МАЛЫМ ПАРАМЕТРОМ / А.Г. Наконечный, Г.И. Кудин, П.Н. Зинько, Т.П. Зинько

Аннотация. Исследована задача нахождения несмещенных оценок линейного оператора неизвестных матриц — составляющих вектора наблюдений. Предполагается, что вектор наблюдений аддитивно зависит от случайного вектора с нулевым математическим ожиданием, а неизвестная корреляционная матрица принадлежит известному ограниченному множеству. Для введенного класса линейных оценок доказываются необходимые и достаточные условия существования решений операторных уравнений определяющих неизвестные параметры векторной оценки. Подан вид гарантированной среднеквадратической погрешности оценки на множествах ограничений параметров задачи. Исследовано влияние на линейную несмещенную оценку малых возмущений известных прямоугольных матриц, которые являются составляющими компонент вектора наблюдений. Для введенных специальных операторов, зависящих от малого параметра, которые определяют соответствующие операторные уравнения, а также их приближенные решения в первом приближении метода малого параметра, подано аналитический вид через параметры возмущенного набора сингулярностей. Приведен тестовый пример решения задачи нахождения линейной несмещенной оценки при условиях возмущения как линейно независимых, так и линейно зависимых известных матриц наблюдения.

Ключевые слова: линейное оценивание, несмещенные оценки, гарантированная среднеквадратическая погрешность, линейные операторные уравнения, псевдообратные матрицы, малый параметр, возмущенные известные матрицы наблюдения.

REFERENCES

1. A. Albert, *Regression, pseudo inverse, recurrent evaluation*. Moscow: Nauka, 1977, 305 p.
2. B.F. Arnold and P. Stanlecker, "Linear estimation in regression analysis using fuzzy prior information", *Random Oper. And Stoch. Equ*, vol. 5, no. 2, pp. 105–116, 1997.
3. O. Nakonechnyi and J. Michalek, "Minimax estimates of linear parameters function in regression model under restraictions on parameters and variance-covariance matrix", *J.Comput.Appl.Math*, no. 1(81), pp. 22–32, 1997.
4. N. Christopheit and K. Helmes, "Linear minimax estimation with ellipsoidal constraints", *Acta Applicandae Mathematicae*, 43, 1, pp.3–15, 1996.
5. V. Girko, "Spektral Theory of Minimax Estimation", *Acta applicandae mathematicae*, 43,1, pp.59–69, 1996.
6. G. Trenkler and P. Stahlecker, "Quasi minimax estimation in the linear regression model", *Statistics*, 18, pp. 219–226, 1987.
7. N. Draper and H. Smith, *Applied Regression Analysis*. Publishing house "Williams", 2007, 912 p.
8. D.I. Blokhintsev, *Fundamentals of quantum mechanics*. Moscow: Nauka, 1976, 864 p.
9. O.G. Nakonechnyi, G.I. Kudin, and T.P. Zinko, "Formulas of perturbation for one class of inverse operators", *Matematychni Studii*, 52, no. 2. pp. 124–132, 2019.
10. O.G. Nakonechnyi, G.I. Kudin, P.M. Zinko, and T.P. Zinko, "Excitation method in problems of regression of a linear matrix", *International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics"*, vol.1, pp. 38–47, 2020.

УЗАГАЛЬНЕНІ РОЗВ'ЯЗКИ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

І.В. БЕЙКО, О.В. ФУРТЕЛЬ, Ю.В. СПІВАК

Анотація. Розглянуто задачі оптимального керування системами алгебро-інтегро-диференціальних рівнянь та рівнянь із частинними похідними, які описують керовані процеси із зосередженими та розподіленими параметрами. Визначено узагальнені оптимальні розв'язки, які існують для широких класів прикладних задач оптимального керування. Запропоновано методи побудови наближених узагальнених розв'язків.

Ключові слова: оптимальне керування, математичне моделювання, процеси із зосередженими параметрами, процеси з розподіленими параметрами.

ВСТУП

Задачі оптимізації та методи оптимального керування системами з частинними похідними є важливими для розв'язання задач математичного моделювання, прогнозування і системного аналізу [1–4]. Труднощі їх розв'язання часто виникають через відсутність у вибраному просторі шуканого оптимального керування. Наприклад, за відомими умовами Каруша–Куна–Такера для регулярного мінімізатора

$$x^* \in \operatorname{Arg} \min_{g(x) \in K} J(x)$$

у банаховому просторі X із двічі диференційовними (за Фреше) функціями $J: X \rightarrow \mathbb{R}$, $g: X \rightarrow Z$ та опуклим у банаховому просторі Z конусом K існує елемент

$$l \in K^+ := \{l \in Z^* : \langle l, k \rangle \geq 0, k \in K\},$$

за яким необхідні умови оптимальності визначаються рівняннями

$$J'(x^*) - g'(x^*)l = 0, \quad \langle l, g(x^*) \rangle = 0,$$

але проблема полягає в тому, що розв'язок x^* виявляється регулярним тільки у випадку $X \subset L_1$, а друга похідна $L''(x^*)$ обмежена тільки у випадку $L_2 \subset X$. Інша проблема зумовлена нестійкими керованими системами, для яких різницеві моделі також є нестійкими і непридатними для обчислення фазових траєкторій. Наприклад, для стійкої керованої системи її спряжена система, за якою визначається оптимальне керування, є нестійкою, і навпаки — у випадку стійкої спряженої системи нестійкою виявляється вихідна система, а це потребує використання адекватних стійких неявних схем і неявних алгоритмів Рунге–Кутти для інтегрування екстремальних траєкто-

рій керованих систем [4–6]. Важливо що навіть збіжні для диференціальних рівнянь неявні алгоритми Рунге–Кутти можуть виявитися незбіжними для екстремалей в задачах оптимального керування [7]. Особливі труднощі з'являються в задачах керування системами із взаємодійними керованими підсистемами, які описуються узагальненими алгебро-інтегро-диференціальними рівняннями і для яких може не існувати оптимального керування. У роботі визначаються узагальнені розв'язки таких задач і розглядаються можливості наближених методів їх побудови.

УЗАГАЛЬНЕНІ ЗАДАЧІ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ

Прикладом задачі оптимального керування, яка не розв'язується за принципом максимуму, є макроекономічна задача відшукування оптимальних темпів виробництва засобів виробництва $m(t)$ і товарів споживання $c(t)$, які для заданих коефіцієнтів $(\alpha(t, \tau), \beta(t, \tau))$ використання наявних ресурсів $(m(\tau)y(\tau), m(\tau)(1 - y(\tau)))$ максимізують значення «функціонала суспільного добробуту» $J(y) = \int_0^T c(t)dt$ на траєкторіях макромоделі

$$m(t) = \int_{a(t)}^t \alpha(t, \tau) m(\tau) y(\tau) d\tau, \quad c(t) = \int_{a(t)}^t \beta(t, \tau) m(\tau) (1 - y(\tau)) d\tau, \quad L(t) = \int_{a(t)}^t y(\tau) d\tau,$$

де за функцією $a(t) \in [0, t]$ визначаються терміни $t - a(t)$ використання засобів виробництва, створені до моменту часу t . Узагальненням цієї задачі є задача оптимізації багатосекторної макроекономіки за критерієм максимізації «загального добробуту» $J(a) = \int_0^T \sum_{j=1}^M \int_{a_j(t)}^t \beta_{ij}(t, \tau) m_j(\tau) y_j(\tau) d\tau$ у макроекономічній моделі

$$\sum_{i=1}^M \int_{a_j(t)}^t K_{ij}(t, \tau) m_j(\tau) d\tau = F_i(t), \quad i = 1, \dots, N, \quad a_j(t) \in [0, t], \quad j = 1, \dots, N.$$

Подібні задачі нестандартних керованих систем є частинними випадками узагальненої задачі 1.

Узагальнена задача 1. Знайти розв'язок $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^r$ системи алгебро-інтегро-диференціальних рівнянь

$$\begin{aligned} f(t, x, u) &= f^0(x(t_0), u, \dot{x}(t), x(t), u(t), t); \\ \int_{D(t, u, x)} f^1(x(s), u(s), s, \dot{x}(t), x(t), u(t), t) ds &= 0; \\ F(x, u) &= F^0(x(t_0), x(T), u, \int_{t_0}^T F^1(\dot{x}(t), x(t), u(t), t); \\ \int_{t_0}^T F^2(\dot{x}(s), x(s), u(s), s, \dot{x}(t), x(t), u(t), t) ds &= 0, \end{aligned} \tag{1}$$

який максимізує функціонал

$$B(x, u) = B^0(x(t_0), x(T), u, \int_{t_0}^T B^2(\dot{x}(t), x(t), u(t), t); \int_{t_0}^T B^2(\dot{x}(s), x(s), u(s), s, \dot{x}(t), x(t), u(t), t) ds) = 0. \quad (2)$$

До такої задачі зводяться широкі класи прикладних задач оптимального керування процесами із зосередженими параметрами і різними типами звичайних та інтегральних запізнень, таких як, наприклад, у згаданих вище задачах оптимального керування взаємопов'язаними макроекономічними процесами. Аналогічна узагальнена задача оптимального керування складними системами алгебро-інтегро-диференціальних рівнянь із частинними похідними формулюється як узагальнена задача 2.

Узагальнена задача 2. Знайти вектор-функції $u : D \rightarrow R^r$, $x : D \rightarrow R^n$, $D \subset R \times R^{n_s}$, які належать множині Ω розв'язків узагальненої керованої системи із підсистемами, які описуються алгебро-інтегро-диференціальними рівняннями із частинними похідними

$$\bar{f}_i^k(t, s, x, u) := f_i^k(t, s, x(t, s), u(t, s), F^{f_i^k}(x, u, t, s)) = 0; \quad (t, s) \in D^i(x, u), \quad k = \overline{1, N_k}, \quad i = \overline{1, N_{ki}} \quad (3)$$

і максимізують значення функціонала

$$B(x, u) = \iint_D \varphi_0(t, s, x(t, s), u(t, s), F^0(x, u, t, s)) ds dt, \quad (4)$$

де f_i^k — задані функції; $D^i(x, u) \subset D$ — задані підмножини; $D_0^i(x, u) = \{t_q^i(x, u), s_q^i(x, u)\}_{q=1}^{q_i} \subset D$ — задані дискретні підмножини; $F^{f_i^k}$, $F^{g_i^k}$ і F^0 — задані композиції операторів $F_1(x, t, s, \alpha, \beta) = \frac{\partial^{\alpha+\beta}}{\partial t^\alpha \partial s^\beta} x(t, s)$ та визначених за заданими множинами $\bar{\Omega}(t, s) = \{t^i(t, s), s^i(t, s), \alpha^i, \beta^i\}_{i=1}^{n_\Omega}$, $\tilde{\Omega}(t, s, x, u) \subset R \times R^{n_s}$ операторів

$$F_2(F_1, x, t, s, \bar{\Omega}) = (F_1(x, t + t^1(x, t), s + s^1(x, t), \alpha^1, \beta^1); F_1(x, t + t^2(x, t), s + s^2(x, t), \alpha^2, \beta^2), \dots, F_1(x, t + t^{n_\Omega}(x, t), s + s^{n_\Omega}(x, t), \alpha^{n_\Omega}, \beta^{n_\Omega}));$$

$$F_3(x, u, t, s, \varphi, \tilde{\Omega}) = \iint_{\tilde{\Omega}(t, s, x, u)} \varphi(t, s, u(t, s), F_1(x, t + \tau, s + \sigma, \alpha, \beta)) d\tau d\sigma.$$

У загальному випадку задача 2 може не мати розв'язку $(x^*, u^*) = \arg \min_{(x, u) \in \Omega} B(x, u)$, зокрема, може виявитися порожньою множиною Ω . Для таких випадків будується узагальнений оптимальний розв'язок

з використанням множини $\Omega(\varepsilon)$ розв'язків системи $|\bar{f}_i^k(t, s, x, u)| \leq \varepsilon$, $(t, s) \in D^i(x, u)$, $k = \overline{1, N_k}$, $i = \overline{1, N_{ki}}$.

У випадку $(x^*(\varepsilon), u^*(\varepsilon)) = \arg \min_{(x, u) \in \Omega(\varepsilon)} B(x, u) \notin \Omega$ значення $(x^*(\varepsilon), u^*(\varepsilon))$

називають наближеним невласним ε -розв'язком задачі 2, а узагальнений розв'язок задачі 2 визначається як послідовність (x_k, u_k) , $k = 1, 2, \dots$, яка задовольняє умови

$$(x_k, u_k) \in \Omega(\varepsilon_k), \varepsilon_k > 0, \lim_{k \rightarrow \infty} \varepsilon_k = \bar{\varepsilon}, B(x_k, u_k) \leq \inf_{(x, u) \in \Omega(\varepsilon_k)} B(x, u) + \varepsilon_k,$$

де $\bar{\varepsilon}$ — мінімальне значення, для якого при $\varepsilon > \bar{\varepsilon}$ множина $\Omega(\varepsilon)$ є непорожньою.

Методи побудови узагальненого розв'язку реалізуються з використанням узагальненої апроксимаційної системи $A(x, u, p) = \theta$, складеної з апроксимаційних моделей $A_{ki}(x, u, p) = \theta$, $k = \overline{1, N_k}$, $i = \overline{1, N_{ki}}$ для кожної підсистеми (3) з адекватно вибраними параметричними функціями $A_{ki} : X \times U \times P \rightarrow W$, заданими у параметризованих просторах фазових траєкторій $X(p)$ та керувань $U(p)$ із заданими множинами P допустимих значень параметрів. До основних характеристик адекватності узагальненої параметричної моделі $A(x, u, p) = \theta$ належать мажорантні або осереднені оцінки часу $\tau(p)$, необхідного для обчислення наближеного оптимального керування $\bar{u}^*(p)$, та оцінки точності $\delta(p)$ отриманого наближеного оптимального керування $\bar{u}^*(p)$. За наявності таких оцінок можна було б визначити параметри $\delta(p) := \max_u B(x(u), u) - B(x(\bar{u}^*(p)), \bar{u}^*(p))$ оптимізованої за точністю робочої моделі $A(x, u, p) = \theta$, параметри $\bar{p}^\tau = \arg \min_{p \in P} \tau(p)$ оптимізованої моделі за критерієм мінімізації часу реалізації алгоритма для обчислення $\bar{u}^*(p)$, а також важливі для практики параметри $\bar{p}^K = \arg \min_{p \in P} (K\tau(p) - \delta(p))$ K -оптимальної, або визначеної нижче асимптотично K -оптимальної моделі.

Особливо важливим є вибір множини P допустимих значень параметрів p , які мають забезпечувати обчислювальну стійкість робочої моделі, використовувати наявну розрідженість для оптимізації необхідних процедур, зокрема для обчислення градієнтів і потрібних похідних вищих порядків, а також забезпечувати адекватне узгодження вибраних у моделі шкал для числово-аналітичного подання усіх змінних, яке реалізується багатьма різними способами, починаючи з прямої дискретної апроксимації всіх похідних у рівняннях (1), (3) з урахуванням того, що стійкі та збіжні алгоритми числового розв'язання задач Коші для диференціальних рівнянь можуть втрачати потрібну стійкість та збіжність у задачах оптимального керування [4–7]. Це пов'язано з тим, що в задачах оптимального керування диференціальні рівняння для екстремалей, які включають рівняння керованої системи

разом з рівняннями спряженої до неї підсистеми майже завжди є нестійкими, оскільки у випадку стійкої керованої системи її спряжена система на екстремалі є нестійкою, і навпаки, якщо спряжена є стійкою, то нестійкою є вихідна керована система. Розв'язання таких проблем потребує адекватного вибору адекватної числово-аналітичної апроксимації шуканих функцій (x, u) та їх шуканих значень (x_k, u_k) і значень їх похідних у вузлах (t_k, s_k) вибраних дискретних множин $D^M = \{(t_k, s_k), k = \overline{1..M}\}$ для апроксимації кожної підсистеми. Шукані значення $(x_k, u_k) = (x(t_k, s_k), u(t_k, s_k))$ обчислюються як розв'язок $X = \{x^k, k = \overline{1..M}\}$, $U = \{u^k, k = \overline{1..M}\}$ задачі максимізації відповідного (параметризованого) значення функціонала $B(X, U)$ на траєкторіях X робочої моделі $A(X, U) = \theta$. Побудова відповідного узагальненого розв'язку (X^k, U^k) , $k = 1, 2, \dots$ реалізується або за субградієнтними алгоритмами $(X^{k+1}, U^{k+1}) = (X^k, U^k) + \lambda_k Z^k$, де Z^k — субградієнт функціонала $B(X, U)$ у точці $(X, U) = (X^k, U^k)$ у випадку $|A(X^k, U^k)| < d_k$ і субградієнт функціонала $-|A(X^k, U^k)|$ в інших випадках. Монотонно спадна послідовність $d_k > 0$, $k = 1, 2, \dots$ є регулювальним параметром для реалізації належного збільшення точності апроксимації параметричного подання (x_k, u_k) функцій (x, u) , зокрема завдяки збільшенню кількості вузлових точок (t_k, s_k) дискретної множини D^M у зонах з більшими значеннями мажорантної оцінки похибки вибраної числово-аналітичної апроксимації функцій (x, u) . Із властивостей субградієнтних методів випливає, що в задачах опуклої оптимізації їх збіжність, а отже і побудова визначеного узагальненого розв'язку, теоретично забезпечується класичними умовами $\lambda_s > 0$, $\sum_{s=1}^{\infty} \lambda_s = \infty$, $\lim_{s \rightarrow \infty} \lambda_s = 0$, а прискорення збіжності досягається використанням гладких ньютонівських алгоритмів внутрішньої точки.

У цій роботі привертаємо увагу до можливостей підвищення ефективності методів побудови узагальненого розв'язку з використанням асимптотично розв'язувальних операторів $\bar{B}(\bar{x}, \bar{u}, u)$, які визначаються [8] в околі довільно заданих значень (\bar{x}, \bar{u}) асимптотичним рівнянням

$$B(x(u), u) = \bar{B}(\bar{x}, \bar{u}, u) + o(\rho(\bar{u}, u)). \quad (5)$$

Для задачі 1 оператор $\bar{B}(\bar{x}, \bar{u}, u)$ будується у вигляді

$$\bar{B}(\bar{x}, \bar{u}, u) \equiv B(\bar{x}, u) + \eta F(\bar{x}, u) + M_1(u, \psi, \eta)x(t_0) + \int_{t_0}^T \psi^*(t) f(t, w, u) dt,$$

де $M_1(u, \psi, \eta)$ — оператор, знайдений у вигляді

$$M_1(u, \psi, \eta) = A_1(B^0) - A_5(B^0)A_1(B^1, t_0) - \int_{t_0}^T (A_5(B^1, t_0)A_5(B^1, t_0, s) - A_3(B^0)A_5(B^1, s)A_1(B^2, t_0, s)) ds + [A_1^*(F^0) - A_1^*(F^1, t_0)A_3^*(F^0) -$$

$$\begin{aligned}
 & - \int_{t_0}^T (A_5^*(F^2, t_0, s) + A_1^*(F^2, t_0, s) A_5^*(F^1, s) A_3^*(F^0)) ds] \eta + \\
 & + \int_{t_0}^T A_1^*(f^2, t) \psi(t) dt - A_3^*(f^0, t_0) \psi(t_0);
 \end{aligned}$$

$\psi(t)$ — розв'язок системи

$$\begin{aligned}
 & \int_{D^*(t,u,x)} A_1^*(f^0, t) \dot{\psi}(t) dt + \int_{D^*(t,u,x)} A_1^*(f^1, t, s) A_2^*(f^0, s) \psi(s) ds + \\
 & + \left(A_1^*(f^0, t) + A_D^*(f^1, t) A_7^*(f^0, t) + \right. \\
 & \left. + \int_{D^*(t,u,x)} A_1^*(f^1, t, s) A_7^*(f^0, t) ds - A_3^*(f^0, t) \right) \psi(t) + \\
 & + A_2^*(F^1, t) A_1^*(F^0) + \int_{t_0}^T A_6^*(B^2, t, s) A_5^*(F^1, t) A_3^*(F^0) ds - \\
 & - A_1^*(F^1, t) A_3^*(F^0) - \int_{t_0}^T \{d(A_5^*(F^2, t, s) A_5^*(F^1, t)) / dt\} ds - \\
 & - \int_{t_0}^T A_1^*(F^2, t, s) A_5^*(F^1, s) A_3^*(F^0) ds + \\
 & + \int_{t_0}^T A_2^*(F^2, t, s) A_5^*(F^1, s) A_3^*(F^0) ds + A_3(B^0) A_2(B^1, t) + \\
 & + A_3(B^0) A_5(B^0, t) \int_{t_0}^T A_6(B^2, t, s) ds - A_3(B^1, t) A_1(B^1, t) - A_3(B^0) \int_{t_0}^T A_5(B^2, t, s) ds - \\
 & - \int_{t_0}^T A_3(B^0) A_5(B^1, s) A_1(B^2, s, t) ds + \int_{t_0}^T A_3(B^0) A_5(B^1, s) A_2(B^2, s, t) ds = 0
 \end{aligned}$$

з крайовими умовами

$$\begin{aligned}
 & A_3^*(f^0, T) \dot{\psi}(T) + \int_{t_0}^T A_2^*(f^0, t) \psi(T) dt + (A_2^*(F^0) + A_1^*(F^1, T) A_3^*(F^0)) + \\
 & + \int_{t_0}^T A_5^*(F^2, T, s) A_5^*(F^1, T) ds + \int_{t_0}^T A_1^*(F^2, s, T) A_5^*(F^1, s) A_3^*(F^0) ds \cdot \eta + \\
 & + \int_{t_0}^T (A_5^*(F^1, T) A_5^*(F^2, T, s) + A_3(B^0) A_5(B^1, s) A_1(B^2, T, s)) ds = 0,
 \end{aligned}$$

$A_k(f, \cdot)$ — похідна Фреше від функції f за k -ю змінною; $A_D(f)$ — похідна Фреше від $\int_{D(t,u,z)} f(t)dt$ а за z , $D^*(t,u,z)$ є спряженою множиною до множини $D(t,u,z)$, яка задовольняє умову

$$\begin{aligned} & \text{mes}\{(D(t,u,x) \cup D(t,u+\delta u, x+\delta x)) / (D(t,u,x) \cap D(t,u+\delta u, x+\delta x))\} \leq \\ & \leq L \max\{\|\delta u\|, \|\delta x\|\}, \int_{t_0}^T \int_{D(t,u,z)} f(s,t) ds dt = \int_{t_0}^T \int_{D^*(t,u,z)} f(t,s) dt ds, \end{aligned}$$

L — константа, яка виражається через константи Ліпшиця для похідних A_k, A_D .

Із рівняння (3) випливає, що рівність $\bar{u} = \arg \max_u \bar{B}(\bar{x}, \bar{u}, u)$ є необхідною умовою оптимальності керування \bar{u} і з'являється очевидна можливість знаходити розв'язок задачі 1 також і для випадку, коли не існує градієнта $\nabla_u B(x(u^k), u^k)$, і тому замість обчислення u^{k+1} за градієнтним методом $u^{k+1} = u^k + \lambda_k \nabla_u B(x(u^k), u^k)$ можемо знаходити наближені розв'язки \bar{u}^{k+1} допоміжних оптимізаційних задач $\bar{u}^{k+1} = \arg \max_{\rho(u^k, u) \leq \lambda} \bar{B}(x^k, u^k, u)$ за алгоритмом $u^{k+1} = \arg \max_{\lambda \in [0,1]} \bar{B}(x(u_\lambda), u_\lambda)$, $u_\lambda = (1-\lambda)u^k + \lambda \bar{u}^{k+1}$.

Інші способи підвищення ефективності алгоритмів побудови оптимального керування з використанням асимптотично розв'язувальних операторів для підвищення потребують більш ефективних для конкретних прикладних задач методів числово-аналітичної апроксимації шуканих розв'язків (x, u) [5–8], зокрема із застосуванням псевдоспектральних методів з отриманням оцінок для спряжених змінних [9], які дозволяють підвищити ефективність процесів паралельної оптимізації параметрів робочих числово-аналітичних моделей за допомогою оптимізованого збільшення кількості вузлів (t_k, s_k) у множині D^M .

Із застосуванням асимптотично-розв'язувального оператора будується послідовність x^k , $k=1,2,\dots$ прискореної збіжності до розв'язку x^* керованої системи $A(x, u, p) \equiv A_1(x, u, C(x, u, p)) = \theta$, для якої існує алгоритм обчислення розв'язку $\bar{x}(u, p, v)$ спрощеної системи $A_1(x, u, v) = \theta$ і для оператора C існує асимптотично-розв'язувальний оператор C_m m -го порядку, тобто

$$\rho(C(x, u, p), C_m(x^k, u, p, A(x, u, p))) = O(\rho^m(x, x^k)).$$

Якщо для v в околі $C_m(x^k, u, p, \theta)$ виконується рівність

$$\rho(x(u, p, v), C_m(x^k, u, p, \theta)) = O(\rho^s(v, C_m(x^k, u, p, \theta))),$$

то отримуємо алгоритм $x^{k+1} = x(u, p, C_m(x^k, u, p, \theta))$ із прискореною швидкістю збіжності

$$\rho(x^{k+1}, x^*) = O(\rho^{sm}(x^k, x^*)).$$

Унаслідок цього отримуємо твердження для розв'язку $x(\tau)$ системи алгебро-диференціальних рівнянь $A(\dot{x}, x, \tau) = 0$ з неперервними частинними похідними A'_x і A'_τ : якщо функції $\bar{x}(\tau)$ і $l(\tau)$ задовольняють рівняння

$$\bar{x}(\tau) = x(\tau) + O((t - \tau)^s);$$

$$A'_x(\dot{\bar{x}}, \bar{x}, \tau)l(\tau) - A'_x(\dot{\bar{x}}, \bar{x}, \tau)l(\tau) = O((t - \tau)^q), \quad A'_x(\dot{\bar{x}}, \bar{x}, t + h)^T l(t + h) = \Phi,$$

то для $0 \leq q \leq s$ виконується рівність

$$\begin{aligned} \Phi x(t + h) &= \Phi \bar{x}(t + h) + A'_x(\dot{\bar{x}}, \bar{x}, t)^T l(t)(x(t) - \bar{x}(t)) + \\ &+ \int_t^{t+h} l(\tau) A(\dot{\bar{x}}(\tau), \bar{x}(\tau), \tau) d\tau + O(h^{s+q}), \end{aligned}$$

яка визначає алгоритм обчислення фазової траєкторії $x(t + h)$ з високою точністю $O(h^{s+q})$.

Із використанням неперервних за часом апроксимаційних моделей $\frac{dX(t)}{dt} = f(X(t), U(t), t)$ можемо побудувати узагальнений оптимальний розв'язок також і для тих задач, для яких оптимального керування не існує. Наприклад, у випадку неопуклої множини векторів $f(X(t), \bar{U}(t, X(t)), t)$ для допустимих значень $U(t) \in \bar{U}(t, X(t))$ у фазовому стані $(t, X(t))$ оптимального керування може не існувати, але узагальнений розв'язок знаходиться за допомогою обчислення таких значень $\{X_i^1, X_i^2\}_{i=1}^N$, які максимізують наближене до функціоналів (2) або (4) значення $B(X)$ за обмежень

$$x^i(t_i) = X_i^2, \quad X_{i+1}^1 \in \text{co}(x^i(t_{i+1})), \quad \frac{dx^i(t)}{dt} \in \text{co}(f(x^i(t), \bar{U}(t, x^i(t)), t)). \quad (6)$$

Очевидно задача відшукування максимізатора $X^* = \arg \max_X B(X)$ на допустимій множині (6) є оптимізаційною задачею меншої розмірності ніж вихідна задача відшукування функцій (X, U) .

Із теореми принципу максимуму відомо, що оптимальне керування $u^*(t) \in \Omega$, яке максимізує функціонал

$$I(u) = F(x(T, u)) + \int_{t_0}^T f_0(x(t, u), u(t), t) dt,$$

є розв'язком крайової задачі

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x(t), \bar{u}^*(x(t), y(t), t), t), \quad t \in [t_0; T]; \quad (7)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \left[\frac{\partial f(x(t), \bar{u}^*(x(t), y(t), t), t)}{\partial x} \right]^T y(t) + \nabla_x f_0(x(t), \bar{u}^*(x(t), y(t), t), t), \quad (8)$$

$$u^*(t) = \bar{u}^*(x(t), y(t), t) = \arg \max_{u \in \Omega} ((y(t), f(x(t), u, t)) + f_0(x(t), u, t)), \quad (9)$$

$$x(t_0) = x^0, \quad y(T) = \nabla F(x(T)).$$

Проте практична побудова цього розв'язку часто виявляється надто трудомісткою через те, що зазвичай система (7), (8) є нестійкою, або оптимізаційна задача (9) є надто трудомісткою. У таких випадках практично більш ефективними можуть виявитися ітераційні методи [3] побудови узагальненого оптимального розв'язку:

або за методом проекції градієнтів

$$\begin{aligned} u^{k+1}(t) &= \bar{u}_{\Omega}^{k+1}(t) = \Pi_{\Omega}(u^k(t) + \lambda_k \nabla_u I(u^k)(t)) = \\ &= \arg \min_{u \in \Omega} \|u - (u^k(t) + \lambda_k \nabla_u I(u^k)(t))\|, \end{aligned}$$

або за методом умовних градієнтів

$$u^{k+1}(t) = u^k(t) + \lambda_k (\arg \max_{u \in \Omega} (\nabla_u I(u^k)(t), u) - u^k(t)),$$

або за локальним принципом максимуму

$$u^{k+1}(t) = \bar{u}^{k+1}(t, \Omega_k) = \arg \max_{u^k + u \in \Omega, \|u\| < \lambda} ((y(t), f(x(t, u^k), u, t)) + f_0(x(t, u^k), u, t));$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \left[\frac{\partial f(x(t, u^k), u^k(t), t)}{\partial x} \right]^T y(t) + \nabla_x f_0(x(t, u^k), u^k(t), t),$$

$$y(T) = \nabla F(x(T, u^k)),$$

або за умовним принципом максимуму

$$u^{k+1}(t) = u^k(t) + \bar{\lambda}_k (\bar{u}_{\Omega}^{k+1}(t) - u^k(t));$$

$$\bar{\lambda}_k = \arg \max_{\lambda} F(x(T, u^k + \lambda(\bar{u}_{\Omega}^{k+1} - u^k)))$$

з використанням різних алгоритмів для обчислення λ_k , наприклад, як максимальних на послідовності $\{\lambda_k = \lambda_{k-1} / 2^{1-q}, q = 1, 2, \dots\}$ значень λ_k , для яких виконується нерівність $I(u^{k+1}) \geq I(u^k) + s(\lambda_k)^2$ [3], або з використанням прискорених алгоритмів асимптотично-розв'язувальних операторів. За наявності додаткових обмежень

$$\bar{F}_i(x, t_0, T) \leq 0, \quad i = \overline{1, m}, \quad F_i(x, t_0, T) = \int_{t_0}^T h_i(x(t), t) dt + g_i(t_0, T, x(t_0), x(T))$$

узагальнений розв'язок будемо за описаним вище способом розпаралельного обчислення фазової траєкторії на множині

$$\bar{X} = \left\{ x \mid \frac{dx(t)}{dt} \in \text{co} f(x(t), \Omega, t), t \in [t_0, T] \right\}.$$

Узагальнений розв'язок \tilde{x} такої задачі характеризується тим, що для кожного числа $\varepsilon > 0$ існує допустиме керування $u^\varepsilon : [t_0, T] \rightarrow \Omega \subset R^r$, для якого розв'язок x^ε задачі Коші

$$\frac{dx^\varepsilon(t)}{dt} = f(x^\varepsilon(t), u^\varepsilon(t), t), \quad t \in [t_0, T], \quad x^\varepsilon(t_0) = x^0 \in R^n,$$

задовольняє нерівність

$$\overline{F}_0(x^\varepsilon, t_0, T) \geq \overline{F}_0(\tilde{x}, t_0, T) - \varepsilon, \quad \overline{F}_i(x^\varepsilon, t_0, T) \leq \varepsilon, \quad i = \overline{1, m}.$$

Практичною перевагою побудованого розв'язку $x^\varepsilon : [0, T] \rightarrow R^n$ є те, що він існує і в тих випадках, коли оптимального керування у класі вимірних функцій не існує. Іншою важливою перевагою є менша розмірність оптимізаційної задачі побудови такого узагальненого розв'язку (порівняно з розмірністю вихідної оптимізаційної задачі для відшукування вектор-функцій $(x^\varepsilon : [0, T] \rightarrow R^n, u : [0, T] \rightarrow R^r)$).

ВИСНОВКИ

Практична побудова узагальнених оптимальних розв'язків для складних задач оптимального керування зводиться до розв'язання задач паралельної оптимізації керованих підсистем у фазовому просторі параметризованих функцій менших розмірностей. Сформульовані узагальнені задачі охоплюють широкі класи прикладних задач оптимального керування складними системами, а визначені узагальнені розв'язки завжди існують і будуються числовими алгоритмами з використанням асимптотично-розв'язувальних операторів, або принципу максимуму, або прямими методами з використанням числово-аналітичних апроксимацій наближених розв'язків.

ЛІТЕРАТУРА

1. M.Z. Zgurovsky and N.D. Pankratova, *System analysis: problems, methodology, applications*. Kiev: Publishing house of Nauk.dumka, 2011, 728 p.
2. Eugene A. Feinberg, Pavlo O. Kasyanov, and Michael Z. Zgurovsky, "Partially Observable Total-Cost Markov Decision Processes with Weakly Continuous Transition Probabilities", *Mathematics of Operations Research* 41(2), pp. 656–681, 2016.
3. I. Beyko, P. Zinko, and A. Nakonechny, *Problems, methods and algorithms of optimization*. Kyiv: Kyiv University Publishing and Printing Center, 2012, 799 p.
4. F. Troltsch, *Optimal Control of Partial Differential Equations: Theory, Methods and Applications*. Amer Mathematical Society, 2010.
5. E. Polak, *Optimization: Algorithms and Consistent Approximations*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 1997.
6. R. Becker and M. Braack, "A Finite Element Pressure Gradient Stabilization for the Stokes Equations Based on Local Projections", *Calcolo*, 38(4), pp. 173–199, 2001.
7. W.W. Hager, "Runge-Kutta Methods in Optimal Control and the Transformed Adjoint Systems", *Numerische Mathematik*, vol. 87, pp. 247–282, 2000.
8. I. Beyko and M. Beyko, "On the numerical construction of optimal controls", *Modeling of nonstationary processes*. Kiev: IM AN UkrSSR, 1977, pp. 173–190.

9. F. Fahroo and I.M. Ross, “Pseudospectral Methods for Infinite-Horizon Nonlinear Optimal Control Problems”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 31, no.4, pp. 927–936, 2008.
10. I. Beyko, “Development of methods of solving and asymptotically-solving operators for construction of optimal and asymptotically-optimal mathematical models”, *Visnyk of Kyiv National University. Series: Cybernetics*, vol. 3, pp. 10–15, 2002.
11. M. Ulbrich, *Semismooth Newton Methods for Variational Inequalities and Constrained Optimization Problems*. SIAM Philadelphia, 2011.

Надійшла 01.12.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Ivan V. Beyko, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: ivan.beyko@gmail.com

Olesya V. Furtel, Kamianets-Podilskyi National Ivan Ohienko University, Ukraine, e-mail: lesya.shchyrba@gmail.com

Julia V. Spivak, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: spivak_julia@ukr.net

ОБОБЩЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ /

И.В. Бейко, О.В. Фуртель, Ю.В. Спивак

Аннотация. Рассмотрены задачи оптимального управления системами алгебро-интегро-дифференциальных уравнений и уравнений с частными производными, которые описывают управляемые процессы с сосредоточенными и распределенными параметрами. Определены обобщенные оптимальные решения, которые существуют для широких классов прикладных задач оптимального управления. Предложены методы построения приближенных обобщенных решений.

Ключевые слова: оптимальное управление, математическое моделирование, процессы с сосредоточенными параметрами, процессы с распределенными параметрами.

GENERALIZED SOLUTIONS OF OPTIMAL CONTROL PROBLEMS / I.V. Beyko,

O.V. Furtel, Ju.V. Spivak

Abstract. The problems of optimal control of systems of algebraic-integro-differential equations and partial differential equations are considered, which describe controlled processes with concentrated and distributed parameters. Generalized optimal solutions that exist for a wide range of optimal control applications are identified. Methods for constructing approximate generalized solutions are considered.

Keywords: optimal control, mathematical modeling, processes with concentrated parameters, processes with distributed parameters.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ ОРГАНІЗАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОНОВЛЕННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Г.Ф. КОНАХОВИЧ, І.О. КОЗЛЮК, Ю.Б. КОВАЛЕНКО

Анотація. Присвячено вирішенню завдання виявлення та уточнення оптимізаційних показників ефективності експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден, що є актуальним метрологічним завданням. Виконано аналіз можливих варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден. Сформульовано поняття базового варіанта побудови системи технічної експлуатації та оновлення. За допомогою визначальних класифікаційних ознак виділено базові варіанти побудови системи технічної експлуатації та оновлення. Визначено поняття вторинних і конкуруючих різновидів базового варіанта побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах. Для цього введено класифікаційні ознаки, що характеризують властивості виробів радіоелектронних систем: місце відновлення виробу, місце фіксації відмови виробу та наявність засобів експлуатаційного контролю в організації технічного обслуговування.

Ключові слова: обслуговування (оновлення) радіоелектронних систем, авіаційні радіоелектронні системи, оцінювання ефективності базових варіантів.

ВСТУП

Ефективна експлуатація нових повітряних суден можлива лише в разі дотримання правил сертифікації виробництва (обладнання) авіаційної техніки. Гостро постає питання науково-обґрунтованого вибору стратегії технічного оновлення радіоелектронної системи, оскільки остання одна з найдорожчих. Крім того, вибір стратегії технічного оновлення радіоелектронної системи значною мірою впливає на безпеку та регулярність польотів повітряних суден. Це можливо тільки за умови мінімізації витрат на їх технічне обслуговування.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ І ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Питанню оптимізації процесу технічної експлуатації транспортних систем присвячено праці вітчизняних і зарубіжних авторів [1–7]. У деяких працях оптимізація здійснюється за імовірнісними показниками, зокрема за критерієм максимуму коефіцієнта готовності систем, в інших [3, 4, 6] використовуються техніко-економічні показники. Проте ще не визначено комплексного показника, що дозволяє в аналітичному вигляді взаємопов'язано розглядати експлуатаційні витрати, вартість обмінного фонду і показники достовірності контролю, від яких значною мірою залежить правильність прийняття рішення про демонтаж блоків з борта.

У системах реального часу життєво важливим є, по-перше, щоб у кожен момент часу оброблювана інформація була якомога більш актуальною, а по-друге, щоб система вчасно реагувала на вхідні дані, які надходять, причому порушення цих вимог призводить до катастрофічних наслідків. У подібних системах потрібне точне регулювання взаємодії датчиків (sensors), приводів (actuators) і функцій керування зворотним зв'язком (тобто функцій оброблення інформації та видачі керувальних впливів). Для цього такі завдання запускаються строго періодично, тобто кожне з них повинно періодично стартувати через однакові проміжки часу.

Отже, для підвищення надійності кожному процесу відповідає свій пристрій. Однак натеper розміри систем настільки збільшились, що подібна організація архітектури призвела б до непомірної ваги і енергоспоживання системи. Вирішенням є поділ ресурсів, тобто виконання декількох завдань на одному процесорі. У зв'язку з цим актуальності набуває завдання перерозподілу для декількох процесів, які виконуються на одному або декількох пристроях.

Планування завдань може бути динамічним (тобто здійснюваним у реальному масштабі часу в ході роботи системи) або статичним (коли розклад складається до запуску системи). Виконання завдань планування є двох видів: з перериваннями (preemptive), коли виконання завдання дозволяється на деякий час відкласти для запуску іншого завдання, і без переривань (non-preemptive), коли цього робити не дозволяється.

У цій роботі розглянемо питання статичного планування строго періодичних завдань з перериваннями.

Строго періодичне завдання задається двома параметрами: періодом (часом між двома послідовними стартами завдання) і тривалістю (часом, необхідним для виконання завдання в межах одного періоду).

На відміну від класичного випадку, коли періодичність не є строгою [8], перерозподіл для набору чітко періодичних завдань з перериваннями розбивається на два етапи:

- перерозподіл для початкових точок даної системи періодичних процесів;
- розподіл решти точок у межах заданих періодів.

За визначенням строго періодичного завдання усі точки старту утворюють арифметичну прогресію. Оскільки два завдання не можуть стартувати одночасно, арифметичні прогресії для різних завдань не повинні конфліктувати, тобто не повинні мати спільних точок. Відома достатня умова безконфліктності: початкові точки повинні мати різні залишки за модулем найбільшого загального подільника відповідних періодів, зокрема, взаємна простота періодів негайно призводить до неможливості побудови перерозподілу.

У разі, коли завдань усього два, ця умова є критерієм, що дозволяє ефективно побудувати перерозподіл. Однак для випадку довільної кількості завдань подібного критерію поки не знайдено.

Наявні підходи до проблеми планування строго періодичних завдань не використовують повною мірою взаємозв'язки між періодами (див., наприклад, [9], [10]–[12]), що призводить до істотного збільшення часу пошуку. Існуючі алгоритми вирішують проблему пошуку стартових точок або

із застосуванням грубих евристик [12], або перебиранням з різними оптимізаціями [9], [10]. Однак перебирання має такий недолік: якщо перерозподіл побудувати неможливо, потрібно аналізувати всі можливі варіанти.

У цій роботі вирішуємо проблему першого етапу — пошуку системи початкових точок перерозподілу. У такій постановці нехтуємо тривалістю завдань. Використовуючи результати теорії графів [13] і теорії чисел, пропонуємо новий підхід до аналізу побудови перерозподілу для строго періодичних завдань, заснований на вивченні структури груп їх періодів.

МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи — розроблення організаційної системи експлуатації бортових радіоелектронних систем перспективних повітряних суден.

Для розроблення організаційної системи експлуатації бортових радіоелектронних систем перспективних повітряних суден необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати можливі варіанти побудови системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем;
- вибрати показники ефективності побудови системи технічної експлуатації та оновлення і обґрунтувати узагальнений показник ефективності системи технічної експлуатації.

Під базовим варіантом побудови системи технічного обслуговування і ремонту будемо розуміти таку організацію експлуатації радіоелектронної системи, за якої виконується певний перелік операцій технічного обслуговування за місцем виникнення відмови.

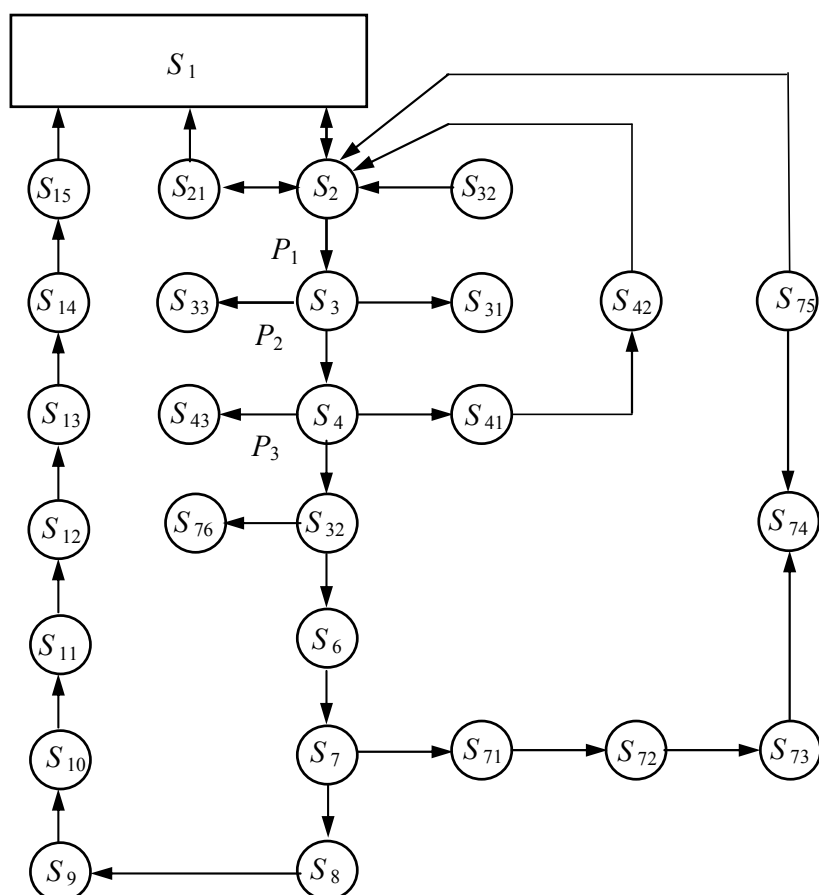
Тобто кількість операцій технічного обслуговування, що характеризуються станами, графом, зображеним на рисунку [3], є постійною для кожного різновиду обраного базового варіанта.

Похідним різновидом базового варіанта будемо називати такий варіант побудови системи технічного обслуговування і ремонту, у якому місце відновлення елемента радіоелектронної системи визначається його ознаками.

Наприклад, варіант $A_i B_3 C_1 D_1 E_2 F_1$ визначає відновлення блока на заводі-виробнику / виготівнику (ЗВ) (D_1), тому як блок має гарантію ЗВ (ознака C_1).

Оцінювати ефективність базових варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем будемо за допомогою техніко-економічних показників ефективності [4]. До технічних належать комплексні показники надійності: коефіцієнт готовності, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт технічного використання, а до техніко-економічних: питомий середній прибуток, питомі середні витрати.

З огляду на те, що один з базових варіантів може бути застосований для радіоелектронних систем, відмова якого призводить до невиконання його функцій (значення класифікаційної ознаки), необхідно, вибираючи показник ефективності, враховувати ймовірність, з якою виконуватиметься нормальне функціонування цієї системи (імовірність перебування системи в працездатному стані).



Граф можливих станів блока радіоелектронної системи

Оскільки для радіоелектронних систем з класифікаційною ознакою (A_1) до безвідмовності в процесі використання за призначенням (S_1) ставляться підвищені вимоги, то як показник безвідмовності слід використовувати: для систем з класифікаційною ознакою (B_1) (невідновлювана система) — апостеріорну ймовірність безвідмовної роботи (P_A), для систем з ознакою \bar{B}_1 (відновлювані з різною глибиною системи) — експлуатаційну ймовірність безвідмовної роботи P_E .

Апостеріорною ймовірністю безвідмовної роботи (P_A) називатимемо умовну ймовірність безвідмовної роботи системи на інтервалі (t_k, t) за умови, що за результатами експлуатаційного контролю в моменти $\overline{t_k}, t$ у процесі система визнавалася працездатною.

Під експлуатаційною ймовірністю безвідмовної роботи розумітимемо ймовірність безвідмовної роботи системи на інтервалі напрацювання (t_k, t) з урахуванням того, що в моменти $\overline{t_k}, t$ проводилася технічна експлуатація — експлуатаційний контроль і відновлення забракованих систем.

Отже, ефективність базових варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах доцільно оцінювати за

критерієм «надійність–витрати», який містить два показники ефективності. Один з них характеризує надійність радіоелектронних систем, а другий — витрати на технічну експлуатацію і втрати внаслідок незапланованого простою повітряних суден через заміну легкознімного блока, що відмовив.

Витрати на технічну експлуатацію будемо характеризувати питомими середніми витратами, тобто середніми витратами, що припадають на одиницю часу використання системи. Крім того, для систем з ознакою B_1 питомі середні витрати включатимуть в себе витрати на контроль, заміну легкознімного блока і втрати через вимушені простої повітряного судна. Питомі середні витрати для таких систем позначатимемо через C_n . Для відновлюваних систем, крім зазначених вище витрат, необхідно враховувати також додаткові витрати на відновлення. Ці витрати позначатимемо через C_b .

Крім того, коли наслідки відмови системи можна оцінити економічно як показник ефективності, необхідно використовувати економічний показник у вигляді питомих середніх витрат. Показник питомих середніх витрат, який позначатимемо через V , може бути застосований під час оцінювання ефективності стратегії для виробів, що мають класифікаційну ознаку A_2 .

Цей показник містить витрати на технічну експлуатацію, втрати через перебування системи в стані прихованої відмови під час польоту повітряного судна та втрати внаслідок перевищення часу заміни блока, що відмовив, радіоелектронної системи, тривалості стояння.

Наведені показники ефективності можуть бути використані тільки в тих випадках, коли задана наперед ознака, яка характеризує наявність певного виду наземного засобу експлуатаційного контролю, та відповідно сформований обмінний фонд і варіювати ними не можна.

Проте під час порівняльного аналізу базових варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах і їх різновидів необхідно мати показники, що враховують не тільки характеристики операцій контролю та відновлення, але і склад наземного засобу експлуатаційного контролю та обмінного фонду (логістика). Тому як економічний показник ефективності системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах будемо використовувати наведені витрати, що являють собою суму собівартості системи технічної експлуатації та оновлення і нормативного прибутку:

$$B = C_{ек} + E_n K,$$

де $C_{ек}$ — собівартість експлуатації системи протягом року; E_n — питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю і обмінний фонд; K — нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень.

Собівартість експлуатації радіоелектронної системи протягом року має включати в себе річні витрати на експлуатацію системи, амортизаційні відрахування на наземні засоби експлуатаційного контролю і обмінний фонд, а також для варіанта витрати на оновлення комплектів, зокрема електрорадіоматеріали та друковані плати.

Наведені витрати для варіанта такі. Оскільки варіант не передбачає використання в організації технічного обслуговування наземних засобів експлуатаційного контролю, то інвестиційні вкладення будуть пов'язані

тільки з обмінним фондом блоків радіоелектронної системи в організації технічного обслуговування.

Інвестиційні вкладення в обмінний фонд (ОФ) визначаються за формулою

$$K_{\text{ОФ}}^{(0)} = \sum_{i=1}^m Z_i F_i / q_i, \quad (1)$$

де m — кількість блоків радіоелектронної системи; Z_i — закупівельна ціна i -го блока; F_i — кількість блоків i -го типу в обмінному фонді організації технічного обслуговування; q_i — кількість посадкових місць для блоків i -го типу у всьому приписному парку повітряного судна.

Якщо система складається з однотипних блоків, то формула (1) набуде вигляду

$$K_{\text{ОФ}} = mZ / q,$$

де Z — ціна.

Собівартість експлуатації системи легко визначити, знаючи питомі середні витрати, що припадають на годину польоту для однієї системи (блока радіоелектронної системи).

Питомі середні витрати визначаються з урахуванням графу, зображеного на рисунку, в такий спосіб:

$$C_e^{W_1}(t_n) = \frac{1}{t_n} [C_{S_2} t_{S_2} + P_1 (C_{S_3} t_{S_3} + a C_{S_{31}} \Delta t_{S_{31}} + C_{S_{32}} t_{S_{32}}) + P_2 C_{S_{33}}],$$

де t_n — тривалість польоту повітряного судна; C_{S_2} — середні витрати за одиницю часу до контролю працездатності за допомогою вбудованих систем контролю; C_{S_3} — середні витрати за одиницю часу на демонтаж блока з борта повітряного судна; $C_{S_{32}}$ — середні витрати за одиницю часу на установлення блока на борт повітряного судна; $C_{S_{31}}$ — середні витрати за одиницю часу через простій повітряного судна через заміну блока, що відмовив; $C_{S_{33}}$ — середня вартість відновлення блока, що відмовив; P_1 — імовірність демонтажу блока вбудованих систем контролю; P_2 — імовірність відправлення блока за його відсутності в обмінному фонді організації технічного обслуговування;

$$a = \begin{cases} 0, & \text{at } \Delta t_{S_{31}} > t_C, \\ 1, & \text{at } \Delta t_{S_{31}} \leq t_C, \end{cases} \text{ where } t_C \text{ — parking time in the } AP.$$

Примітка: для варіанта W_1 імовірності P_1 і P_2 рівні між собою.

Таким чином, собівартість експлуатації блока радіоелектронної системи протягом року визначається з виразу

$$C_e^{W_1} = C_e^{W_1}(t_n)(T) + E_{\text{ОФ}} K_{\text{ОФ}}^{W_1}.$$

Наведені витрати на експлуатацію блока радіоелектронної системи протягом року в процесі організації системи технічної експлуатації та оновлення відповідно до варіанта визначаються з виразу:

$$B^{W_1} = C_e^{W_1} + (E_{\text{ОФ}} + E_{\text{н}})K_{\text{ОФ}}^{W_1}.$$

Визначимо витрати для варіанта. Для цього варіанта характерна наявність в організації технічного обслуговування наземних засобів експлуатаційного контролю першого рівня, що дозволяє здійснювати контроль демонтованих з повітряного судна блоків радіоелектронної системи.

Інвестиційні вкладення в систему технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах, побудовану згідно з варіантом, включатимуть вартість обмінного фонду та інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю першого рівня. Основне призначення наземних засобів експлуатаційного контролю — недопустити відправлення на ЗВ або авіаремонтний завод помилково знятих (тобто робочих) блоків.

Позначимо інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю першого рівня, необхідні для контролю даного типу системи. Тоді величина

$$K_1^{(1)} = mK_1 / \sum_{i=1}^m q_i$$

визначить питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю першого рівня в розрахунку на один блок системи на борту повітряного судна, а величина

$$K_1^{(m)} = m^2 K_1 / \sum_{i=1}^m q_i$$

дорівнюватиме питомим капітальним вкладенням у наземні засоби експлуатаційного контролю в розрахунку на одну систему, що складається з блоків. Якщо $q_i = q$ ($i = \overline{1, m}$), то цілком очевидно, що питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю першого рівня становитимуть

$$K_1^{(m)} = mK / q.$$

Питомі інвестиційні вкладення в обмінний фонд і наземні засоби експлуатаційного контролю-1 визначаються за формулою

$$K = K_{\text{ОФ}}^{W_2} + K_1^{(m)}.$$

Звертаючись до графу, зображеному на рисунку, визначимо питомі середні витрати під час організації системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах відповідно до варіанта :

$$C_E^{W_2}(t_n) = \frac{1}{t_n} [C_{S_2} t_{S_2} + P_1 (C_{S_3} t_{S_3} + C_{S_4} t_{S_4} + C_{S_{42}} t_{S_{42}} + a C_{S_{41}} t_{41}) + P_3 C_{S_{43}}],$$

де C_{S_4} — середні витрати за одиницю часу до контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-1 демонтованого блока; $C_{S_{42}} = C_{S_{42}} = C_{S_{32}}$; $C_{S_{41}} = C_{S_{31}}$; P_3 — імовірність відправлення блока на оновлення після контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-1; $C_{S_{43}} = C_{S_{33}}$; $t_{S_{41}}$ — середній час екстреної доставки блока у випадку його відсутності в обмінному фонді організації технічного обслуговування.

Наведені витрати на експлуатацію блока радіоелектронної системи протягом року під час організації системи технічної експлуатації та оновлення відповідно до варіанта визначаються з виразу:

$$B^{W_2} = C_e^{W_2}(t_n)(T_n) + (E_n + E_{\text{ОФ}})K_{\text{ОФ}}^{(0)} + (E_n + E_A)K_1^{(m)}.$$

Перейдемо до визначення витрат у системі технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах, побудованій відповідно до базового варіанта. Для цього варіанта характерна наявність в організації технічного обслуговування наземних засобів експлуатаційного контролю першого і другого рівнів. Блоки радіоелектронної системи відновлюються в організації технічного обслуговування заміною структурно-замінних одиниць, що відмовили, а структурно-замінні одиниці відновлюються на ЗВ або авіаремонтному заводі.

Позначимо через K_2 інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю другого рівня. Тоді

$$K_2 = K_2^A / N_1,$$

де K_2^A — сумарні інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю другого рівня (купівельна ціна плюс вартість площ для розміщення наземних засобів експлуатаційного контролю); N_1 — кількість типів систем, контрольованих за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю.

Величина $K_2^{(m)}$ визначає питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю в розрахунку на одну систему, що складається з m блоків:

$$K_2^{(m)} = m^2 K_2 / \sum_{i=1}^m q_i.$$

Якщо в системі блоки однотипні, тобто $q_i = q$ ($i = \overline{1, m}$), то питомі інвестиційні вкладення в наземні засоби експлуатаційного контролю визначаються за формулою

$$K_2^{(m)} = m^2 K_2 / \sum_{i=1}^m q_i.$$

Для варіанта W_3 характерне комплектування обмінного фонду на рівні блоків і структурно-замінних одиниць. Тому питомі інвестиційні вкладення в обмінний фонд становитимуть

$$K_{\text{ОФ}}^{(1)} = \sum_{i=1}^m Z_i F_i / q_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} Z_{i,j} / q_{i,j}, \quad (2)$$

де n_i — кількість типів структурно-замінних одиниць в i -му блоці системи; $Z_{i,j}$ — закупівельна ціна структурно-замінних одиниць j -го типу в i -му блоці; $F_{i,j}$ — кількість структурно-замінних одиниць j -го типу i -го блока в обмінному фонді авіаційно-технічної бази; $q_{i,j}$ — кількість структурно-замінних одиниць j -го типу у всій сукупності блоків i -го типу в організації технічного обслуговування.

Якщо система складається з однотипних блоків, то формула (2) набуде вигляду

$$K_{\text{ОФ}}^{(1)} = m \left(Z F / q + \sum_{j=1}^{n_0} Z_j F_j / q_j \right),$$

де n_0 — кількість типів структурно-замінних одиниць у будь-якому з однотипних блоків системи; Z_j — купівельна ціна структурно-замінних одиниць j -го типу; F_j — кількість структурно-замінних одиниць j -го типу в обмінному фонді організації технічного обслуговування; q_j — кількість структурно-замінних одиниць j -го типу у всій сукупності однотипних блоків.

Скориставшись графом, зображеним на рисунку, визначимо питомі середні витрати під час організації системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах відповідно до варіанта:

$$C_e^{W3}(t_n) = \frac{1}{t_n} \left[C_{S_2} t_{S_2} + P_1 + (C_{S_3} t_{S_3} + C_{S_4} t_{S_4} + C_{S_{75}} t_{S_{75}} + a C_{S_{41}} \Delta t_{S_{41}}) + \right. \\ \left. + P_3 \sum_{i=5}^7 C_{S_i} t_{S_i} + \sum_{j=1}^4 C_{S_{7j}} t_{S_{7j}} + P_4 C_{S_{76}} \right], \quad (3)$$

де C_{S_5} — середні витрати за одиницю часу до контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-2; C_{S_6} — середні витрати за одиницю часу на часткове розбирання блока; C_{S_7} — середні витрати за одиницю часу на пошук структурно-замінних одиниць, що відмовили; $C_{S_{71}}$ — середні витрати за одиницю часу на заміну структурно-замінних одиниць, що відмовили; $C_{S_{72}}$ — середні витрати за одиницю часу на складання блока; $C_{S_{73}}$ — середні витрати за одиницю часу на налаштування і регулювання блока; $C_{S_{74}}$ — середні витрати за одиницю часу до контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-1; P_4 — імовірність відправлення на оновлення структурно-замінних одиниць, що відмовили, після контролю працездатності за допомогою наземних засобів експлуатаційного контролю-2; $\Delta t_{S_{41}}$ — середній час екстреної доставки структурно-знімної одиниці в разі її відсутності в обмінному фонді організації технічного обслуговування.

Зміст узагальненого показника оцінювання ефективності системи технічної експлуатації розкривається за допомогою таких категорій. Найбільш об'єктивним показником, який характеризує ефективність експлуатації радіоелектронних систем, слід вважати показник, що враховує співвідношення доходу, який дає повітряне судно з установленими на ньому радіоелектронними системами, до витрат на його утримання:

$$F = D / C_0,$$

де D — середній річний дохід повітряних суден; C_0 — середні річні витрати на експлуатацію повітряних суден протягом року.

Розглянемо детально складові, що входять у вираз $F = D/V_0$, з урахуванням специфіки функціонування радіоелектронних систем і втрат авіаційного підприємства від затримання рейсу. Як відомо, радіоелектронні системи безпосередньо беруть участь у керуванні польотом повітряних суден. Тому відмова або втрата якості функціонування деяких систем може призвести до помилок літаководіння або відходу на друге коло під час посадки. Усе це зумовлено додатковою витратою палива. Визначивши через ΔS додаткові години нальоту повітряних суден, непов'язані з доставкою пасажирів у пункт призначення, а через $V_{\text{сер}}$ — середню швидкість польоту повітряних суден, отримуємо:

$$D = d \left(T - \frac{\Delta S}{V_{\text{сер}}} \right); \quad (4)$$

$$D = d \left(T - \frac{\Delta S}{V_{\text{сер}}} \right) - (Z_1 + Z_2) - B_e, \quad (5)$$

де d — прибуток з повітряних суден за час польоту; T — години нальоту повітряних суден, що плануються за рік з урахуванням особливостей розкладу та витрат палива.

Додаткові (невиробничі) години нальоту повітряних суден визначаються двома факторами. Перший фактор зумовлений втратою якості i -ї системи, яка бере участь у формуванні оптимального маршруту польоту повітряних суден, другий — вимушеною посадкою повітряних суден через відмову радіоелектронних систем, які не входять у перелік дозволених несправностей (може дефектів) щодо продовження польоту.

Таким чином, вираз для ΔS (4) можна записати у вигляді

$$\Delta S = \sum_{i=0}^N \beta_i W[S_n(t_n) \Delta \varphi_i] t_n + \sum_{j=0}^n [(I + \alpha_j) - P_j(t)] S_b(t_n),$$

де N — кількість типів радіоелектронних систем, які беруть участь у керуванні траєкторією польоту повітряних суден; β_i — безумовна ймовірність невиявлення відмови (втрати якості) i -ї радіоелектронної системи; $W[S_n(t_n) \Delta \varphi_i]$ — масштабний коефіцієнт, який характеризує степінь відхилення від оптимальної траєкторії польоту внаслідок утрати якості i -ї системи на величину $\Delta \varphi_i$; t_n — час польоту; α — безумовна ймовірність помилкової відмови j -ї системи радіоелектронних систем; n — кількість радіоелектронних систем, які входять до класу недопустимих відмов щодо продовження польоту; $S_b = (t_n)$ — відстань повітряних суден до найближчого місця вимушеної посадки. Можемо розрахувати ймовірність переходів та станів; останні мають такий сенс:

$$Z_1 = h \left\{ \sum_{j=0}^m [1 - P_j(t)] (1 - P_{\text{ОФ}}^j) [P_{\text{П}t_{\text{в},j}} + (1 - P_{\text{ОП}}) t_{\text{д}}] \right\},$$

де $P_0(t)$ — ймовірність перебування всіх радіоелектронних систем у працездатному стані; $P_i(t)$ — ймовірність працездатності i -ї радіоелект-

ронної системи з класу переліку дозволених несправностей; $P_j(t)$ — імовірність працездатності j -ї радіоелектронної системи з класу переліку дозволених несправностей; $P_{\text{ОФ}}^j$ — імовірність наявності у комплектуванні транзитного аеропорту j -ї системи, що вимагається; $t_{B,j}$ — час відновлення j -ї системи у транзитному аеропорту; $t_{д,j}$ — час доставки радіоелектронних систем з базового аеропорту в транзитний аеропорт; t_B — час відновлення радіоелектронних систем базового аеропорту; $P_{\text{ОФ}}$ — імовірність наявності у комплектуванні базового аеропорту типу радіоелектронних систем, що вимагається; $P_{\text{ОП}}$ — імовірність наявності в транзитному аеропорту обслуговувального персоналу (ОП), потрібного для відновлення j -ї радіоелектронної системи.

Утрати через затримання рейсу в базовому аеропорту визначаються з такого виразу:

$$Z_2 = h \left\{ \sum_{i=1}^N [1 - P_0(t)] (1 - P_{\text{ОФ}}) t_B \right\}.$$

Тому середні річні витрати авіаційного підприємства згідно із формулою (5) становлять

$$B_0 = d \frac{\Delta S}{V} + Z_1 + Z_2 + B_e. \quad (6)$$

У виразі (6) складова B_e характеризує витрати авіаційного підприємства на придбання. Ці витрати визначаються так:

$$B_e = K_0 \sum_{i=1}^N C_i + \sum_{i=1}^N B_i^{\text{ТОіР}} + \sum_{i=1}^N B_i^{\text{ОФ}} + \sum_{i=1}^N B_i^{\text{РК}} + C_{\text{ГСМ}} + C_{\text{ОП}}, \quad (7)$$

де C_i — вартість i -ї радіоелектронної системи, установлені на повітряних суднах; K_0 — нормативний коефіцієнт окупності повітряних суден; $B_i^{\text{ТОіР}}$ — наведені середні витрати на технічне обслуговування і ремонт i -ї системи; $B_i^{\text{ОФ}}$ — середні річні витрати на придбання ОФ i -ї системи; $B_i^{\text{РК}}$ — середні річні витрати на придбання ремонтних комплектів (РК) підприємством, яке здійснює ремонт, на рік; $C_{\text{ОП}}$ — заробітна плата обслуговувального персоналу.

Середній річний прибуток повітряних суден становить

$$D = dT - B_0.$$

Підставляючи формулу (7) у вираз (3), дістаємо

$$F = \frac{dT}{B_0} - 1. \quad (8)$$

Аналіз виразу (8) дозволяє зробити висновок: показник ефективності зростає від -1 до $+\infty$ зі зміною нальоту повітряних суден (T) від 0 до $+\infty$. Якщо $T = B_0 / d$, показник $F = 0$. Тому має виконуватися нерівність

$$T > B_0 / d.$$

Якщо нерівність не виконується і години польоту $T < B_0 / d$, то експлуатація повітряних суден зі встановленими на ньому радіоелектронними системами збиткова.

Отримані вирази дозволяють виділити основні напрями підвищення ефективності експлуатації радіоелектронних систем. Перший напрям досліджень стосується розроблення науково обґрунтованого переліку допустимих несправностей, з якими дозволено виліт поза базового аеропорту. Для цього необхідно: згрупувати за функціональною ознакою всі вироби радіоелектронної системи повітряних суден; проаналізувати характерні особливості функціонування виробів та ступеня впливу зовнішніх умов на їх працездатність; виконати розрахунки показників надійності виробів; визначити цільові функції виробів, що розглядаються, та перелік відмов, які спричиняють їх невиконання; побудувати за допомогою марковських ланцюгів математичні моделі, які описують процес виникнення для кожної події на всіх етапах польоту з урахуванням пори року та доби, складності траси та метеорологічного стану на трасі; аналогічним чином оцінити умовні ймовірності потрапляння в особливі ситуації як наслідки кожної функціональної відмови; оцінити ймовірність потрапляння в особливу ситуацію під час реалізації кожного прорахованого випадку щодо всіх функціональних відмов виробів радіоелектронних систем.

За результатами досліджень даного напрямку формується науково обґрунтований перелік допустимих несправностей, який дозволяє забезпечити безпеку польотів та виключити обґрунтоване збільшення Z_1 у виразі (6).

Другий напрям досліджень пов'язаний з вибором та обґрунтуванням засобів експлуатаційного контролю. Практика показує, що від правильного вибору засобів експлуатаційного контролю здебільшого залежать витрати на технічне обслуговування і ремонт та інші не виробничі складові (складова ΔS у виразі (6)).

Засоби експлуатаційного контролю включають у себе бортові вбудовані системи контролю та наземні засоби експлуатаційного контролю. Бортові вбудовані системи контролю та наземні засоби експлуатаційного контролю мають становити єдиний комплекс, що забезпечує виконання типових робіт у процесі експлуатації виробів радіоелектронних систем. У цьому комплексі повинна бути передбачена можливість автоматизованого введення-виведення та обмін інформацією про результати контролю між вбудованими системами контролю та наземними засобами експлуатаційного контролю.

Загальне конструктивне виконання комплексу засобів експлуатаційного контролю виробів радіоелектронних систем має забезпечити конструктивну сумісність засобів контролю в комплексі та їх елементів один з одним, уніфікацію габаритних, настановних, приєднувальних розмірів пристроїв та їх рознімних з'єднань, а також реалізацію інформаційної, метрологічної та експлуатаційної сумісності.

У комплексі засобів експлуатаційного контролю передбачається захист від пошкоджень, спричинених впливом перезавантажень та неправильним з'єднанням. Помилки обслуговуючого персоналу з органами керування не повинні призводити до виходу з ладу як виробів радіоелектронних систем, так і засобів контролю.

Під час проведення ремонтно-відновлювальних робіт та контролю працездатності демонтованих вбудованих систем контролю виробів застосовуються наземні автоматизовані засоби експлуатаційного контролю:

- першого рівня, які дозволяють з високим ступенем достовірності визначати технічний стан виробу та виконувати пошук дефектів з глибиною до легкознімного блока;
- другого рівня, які дозволяють з високим ступенем достовірності визначати технічний стан блока та виконувати пошук дефектів з глибиною до структурно-знімної одиниці;
- третього рівня, які дозволяють реалізувати в структурно-знімній одиниці оптимальні алгоритми пошуку дефектів з глибиною до невідновлюваного елемента.

Розглянемо основні елементи оптимізаційних показників ефективності експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден у руслі стратегії ремонту радіоелектронних систем повітряних суден. Так, основним недоліком дійсної стратегії ремонту є визначення обсягу ремонтних робіт незалежно від індивідуального напрацювання виробу та його технічного стану. Як наслідок вартість ремонту не залежить від напрацювання та технічного стану виробу.

На практиці на авіаремонтні заводи надходять вироби з різним напрацюванням та в різному технічному стані і потребують різного обсягу робіт для відновлення якості. Основною метою дослідження напряму вдосконалення стратегії ремонту радіоелектронних систем є вироблення рекомендацій щодо вдосконалення стратегій ремонту виробів, які дозволили б призначати обсяги робіт залежно від ресурсу виробу і його технічного стану. Основними умовами впровадження такої стратегії є застосування вхідного контролю за допомогою автоматизованих наземних засобів експлуатаційного контролю першого рівня для призначення глибини розбирання та аналізу статистики відмов з метою виявлення додаткових ресурсних елементів у виробі.

Підвищити якість та знизити витрати на ремонт можна шляхом упровадження гнучких технологій ремонту з урахуванням напрацювання, технічного стану та доробок виробів за бюлетенями. Прогресивна стратегія ремонту передбачає таку сукупність правил призначення переліку й обсягу ремонтно-відновлювальних робіт (технологій ремонту), що враховують вплив виробів, які ремонтуються, на рівень безпеки та регулярність польотів повітряних суден, ремонтно- і контролепридатність, характер зміни показників надійності виробів у процесі експлуатації, витрати на виконання ремонтно-відновлювальних операцій або заміни блока на першу категорію.

Однією з основних умов впровадження прогресивної стратегії ремонту є створення на авіаремонтних заводах інформаційного підтримання. Залежно від рівня контролепридатності виробу можуть бути реалізовані два види прогресивної стратегії ремонту. Перший вид прогресивної стратегії ремонту застосовують для виробів з високим рівнем контролепридатності. Відмінною особливістю цього виду стратегії є проведення попередньої дефектації та визначення варіанта технології ремонту за результатами вхідного контролю без розбирання. Другий вид прогресивної стратегії застосовують для виробів з низьким рівнем контролепридатності.

Тут попередня дефектація та вибір варіанта технології запроваджуються після повного або часткового розбирання блока за допомогою внутрішнього контролю. Залежно від наявності інформаційного підтримання на авіаремонтних заводах може бути реалізовано декілька варіантів технології в межах обраного виду прогресивної стратегії.

Так, за наявності інформаційної служби надійності на авіаремонтних заводах можуть бути реалізовані три варіанти технології T_1 щодо першого виду прогресивної стратегії і три варіанти технології T_2 щодо другого виду прогресивної стратегії. За відсутності інформаційного підтримання на авіаремонтних заводах застосовуються відповідно два варіанти технології T_1 і два варіанти технології T_2 .

Визначимо основні напрями та необхідні умови щодо вдосконалення стратегії ремонту виробів радіоелектронних елементів повітряних суден. Першою умовою переходу на прогресивну стратегію ремонту є створення інформаційного підтримання на авіаремонтних заводах та їх взаємодія з інформаційною службою авіаційної технічної бази, другою умовою — проведення вхідного контролю виробів, що надходять у ремонт.

На початковому етапі вдосконалення стратегій щодо операцій контролю та діагностування можуть бути застосовані існуючі наземні засоби експлуатаційного контролю. Наступним етапом вдосконалення стратегії ремонту є впровадження в технологічні процеси гнучких автоматизованих наземних засобів експлуатаційного контролю щодо контролю та діагностування виробів. Заключний етап — створення локальних інформаційних мереж на базі гнучких автоматизованих засобів експлуатаційного контролю для збирання та оброблення інформації, необхідної для виявлення додаткових ресурсних елементів і формування оптимальних ремонтних комплектів.

Прогресивні стратегії ремонту дозволяють істотно знизити витрати авіаційного підприємства, що використовують для організації технічної експлуатації стратегію.

ВИСНОВКИ

Відсутність комплексного показника, який в аналітичному руслі дає змогу поєднати такі категорії, як експлуатаційні витрати, вартість обмінного фонду та показники достовірності контролю, не дозволяє позитивно впливати на ефективність технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден. Тому в роботі були запропоновані математичні розв'язки для опису різних варіантів стратегій технічного обслуговування сучасної авіоники. Оптимізовано показники ефективності технічної експлуатації та оновлення, які включають в себе, окрім основних технічних, економічні показники, що містять оптимальну кількість запасних легкознімних блоків, які розраховуються за умови забезпечення заданої регулярності польотів.

Шляхом проведення аналізу можливих варіантів побудови системи технічного обслуговування і ремонту радіоелектронних систем уведено шість класифікаційних ознак, що характеризують властивості виробів радіоелектронних систем, місце відновлення виробів, місце фіксації відмови виробу та наявність наземних засобів експлуатаційного контролю в авіаційній технічній базі.

Сформульовано поняття базового варіанта побудови системи технічного обслуговування і ремонту та виділено за допомогою визначальних кла-

сифікаційних ознак чотири базові варіанти побудови системи технічного обслуговування і ремонту. Визначено поняття похідних і конкуруючих різновидів базового варіанта побудови системи технічного обслуговування і ремонту.

Вироблено обґрунтування узагальненого показника для оцінювання ефективності системи технічної експлуатації радіоелектронних систем і визначено основні напрями підвищення ефективності системи технічної експлуатації

Обрано показники ефективності базових варіантів побудови системи технічного обслуговування і ремонту. Отримано математичні вирази, що дають змогу визначати наведені витрати в системі технічного обслуговування і ремонту, побудованій відповідно до базових варіантів. Аналіз отриманих виразів дозволяє зробити висновок, що основна складова наведених витрат $C_{ек}$ — собівартість експлуатації системи протягом року, не може бути визначена безпосередньо за формулами через її ймовірний характер.

Виконано аналіз можливих варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронної системи повітряних суден. Знайдено обґрунтування узагальненого показника для оцінювання ефективності системи технічної експлуатації радіоелектронного об'єкта та визначено основні напрями підвищення.

Обрано показники ефективності базових варіантів побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах. Отримано математичні вирази, що дозволяють визначати наведені витрати в системі технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах, побудованій відповідно до базових варіантів.

Визначено поняття похідних і конкуруючих різновидів базового варіанта побудови системи технічної експлуатації та оновлення в радіоелектронних системах. Так, похідним різновидом базового варіанта будемо називати варіант побудови системи технічної експлуатації та оновлення, у якому місце відновлення радіоелектронних систем визначається його ознаками. Наприклад, варіант $A_i B_3 C_1 D_1 E_2 F_1$ визначає відновлення блока на ЗВ (D_1), оскільки блок має гарантію ЗВ (ознака C_1).

Отримані результати дають змогу на практиці розраховувати оптимальні запаси не тільки для експлуатованого парку повітряних суден, а й з урахуванням планованих поставок повітряних суден для авіакомпаній. Усе це дозволить обрати найбільш оптимальну стратегію технічного обслуговування повітряних суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. I. Gertsbakh, *Reliability theory with applications to preventive maintenance*. N.Y.: Springer Verlag, 2000, 219 p.
2. T. Nakagawa, "Two-unit redundant models, Stochastic Models in Reliability and Maintenance", *Springer*, Issue 1, pp. 165–185, 2002.
3. G. Konakhovych, "Research of variants of construction of a system of technical maintenance and repair in aircraft engineering", *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, Issue 1, pp. 52–56, 2012.
4. G. Konakhovych and I. Kozlyuk, "Optimization of Operation of Advanced Aircraft by Technical and Economic Criteria", *Problems of Informatization and Control*, pp. 79–85, 2005.

5. Yu. Kovalenko, L. Rybalka, and M. Burlaka, "Analysis of the efficient functioning of the software in information control systems", *Measuring and Computing Engineering in Technical Processes*, Issue 1, pp. 95–100, 2016.
6. O. Kucher and P. Vlasenko, "Comparative Analysis of Reliability and Efficiency Indicators in Foreign and National Aviation", *Knowledge-based Technology*, Issue 2, pp. 11–19, 2009.
7. O. Kucher and P. Vlasenko, "Management of reliability of airline aircraft fleet", *Aerospace Technology and Technology*, Issue 4, pp. 88–94, 2009.
8. J.W.S.W. Liu, *Real-Time Systems*, 1st edn. NJ, USA: Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2000.
9. С. Зеленев, "Планирование строго периодических задач в системах реального времени", *Труды ИСП РАН*, вып. 20, с. 113–122, 2011.
10. А. Третьяков, "Автоматизация построения расписаний для периодических систем реального времени", *Труды ИСП РАН*, вып. 22, с. 375–400, 2012. doi: 10.15514/ISPRAS-2012-22-20.
11. O. Kermia and Y. Sorel, "Schedulability Analysis for Non-Preemptive Tasks under Strict Periodicity Constraints", *Proceedings of the 2008 14th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications*, pp. 5–32, 2008.
12. P. Yomsi and Y. Sorel, "Schedulability Analysis for non-Necessarily Harmonic Real-Time Systems with Precedence and Strict Periodicity Constraints using the Exact Number of Preemptions and no Idle Time", *Proceedings of the 4th Multidisciplinary International Scheduling Conference, MISTA '09*, Dublin, Ireland, August, 2009.
13. А. Жуков, *Основы теории графов*. Москва: Вузовская книга, 2004.

Надійшла 28.09.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Georgiy F. Konakhovych, ORCID: 0000-0002-6636-542X, National Aviation University, Ukraine, e-mail: gfk44@gmail.com

Iryna O. Kozlyuk, ORCID: 0000-0001-8239-8937, National Aviation University, Ukraine, e-mail: avia_ira@ukr.net

Yuliia B. Kovalenko, ORCID: 0000-0002-6714-4258, National Aviation University, Ukraine, e-mail: yleejulee22@gmail.com

OPTIMIZATION OF EFFICIENCY INDICATORS OF ORGANIZATION SYSTEMS OF TECHNICAL OPERATION AND UPDATING OF AIRCRAFT RADIO-ELECTRONIC SYSTEMS / G.F. Konakhovych, I.O. Kozlyuk, Y.B. Kovalenko

Abstract. This paper is dedicated to solving the problem of identifying and refining optimization indicators of operational efficiency and updating of electronic systems of aircraft, which is a pertinent metrological task. An analysis of possible options for building a system of technical operation and updating of electronic systems of aircraft was conducted. The concept of the basic variant of construction of such a system is formulated. By means of defining classification features the basic variants of construction of a system of the technical operation and updating are selected. The notion of secondary and competing types of the basic variant of construction of such a system is defined. For this purpose, classification features have been introduced that characterize the properties of products of electronic systems: the place of updating the product, the place of fixing the product failure and the availability of means of operational control in the organization of maintenance.

Keywords: maintenance (update) of electronic systems, aviation electronic systems, evaluation of the effectiveness of basic options.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ОБНОВЛЕНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ВОЗДУШНЫХ СУДЕН / Г.Ф. Коначович, І.А. Козлюк, Ю.Б. Коваленко

Аннотация. Посвящено решению задания выявления оптимизированных показателей эффективности эксплуатации и обновления радиоэлектронных систем воздушных судов, что является актуальным метрологическим заданием. Выполнен анализ возможных вариантов построения системы технической эксплуатации и обновления радиоэлектронных систем воздушных судов. Сформировано понятие базового варианта построения системы технической эксплуатации и обновления. При помощи определяющих классификационных признаков выделены базовые варианты построения системы технической эксплуатации и обновления. Определено понятие вторичных и конкурирующих видов базового варианта построения системы технической эксплуатации и обновления в радиоэлектронных системах. Для этого введены классификационные признаки, характеризующие свойства изделий радиоэлектронных систем: место обновления изделия, место фиксации отказа изделия и наличие способов эксплуатационного контроля в организации технического обслуживания.

Ключевые слова: обслуживание (обновление) радиоэлектронных систем, авиационные радиоэлектронные системы, оценка эффективности базовых вариантов.

REFERENCES

1. Gertsbakh, Reliability theory with applications to preventive maintenance. N.Y.: Springer Verlag, 2000, 219 p.
2. T. Nakagawa, "Two-unit redundant models, Stochastic Models in Reliability and Maintenance", *Springer*, Issue 1, pp. 165–185, 2002.
3. G. Konakhovych, "Research of variants of construction of a system of technical maintenance and repair in aircraft engineering", *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*, Issue 1, pp. 52–56, 2012.
4. G. Konakhovych and I. Kozlyuk, "Optimization of Operation of Advanced Aircraft by Technical and Economic Criteria", *Problems of Informatization and Control*, pp. 79–85, 2005.
5. Yu. Kovalenko, L. Rybalka, and M. Burlaka, "Analysis of the efficient functioning of the software in information control systems", *Measuring and Computing Engineering in Technical Processes*, Issue 1, pp. 95–100, 2016.
6. O. Kucher and P. Vlasenko, "Comparative Analysis of Reliability and Efficiency Indicators in Foreign and National Aviation", *Knowledge-based Technology*, Issue 2, pp. 11–19, 2009.
7. O. Kucher and P. Vlasenko, "Management of reliability of airline aircraft fleet", *Aerospace Technology and Technology*, Issue 4, pp. 88–94, 2009.
8. J.W.S.W. Liu, *Real-Time Systems*, 1st edn. NJ, USA: Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2000.
9. S. Zelenov, "Scheduling strictly periodic tasks in real time systems", *Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*, vol. 20, pp. 113–122, 2011.
10. A. Tretyakov, "Automation of scheduling for periodic real-time systems", *Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*, vol. 22, pp. 375–400, 2012. doi: 10.15514/ISPRAS-2012-22-20.
11. O. Kermia and Y. Sorel, "Schedulability Analysis for Non-Preemptive Tasks under Strict Periodicity Constraints", *Proceedings of the 2008 14th IEEE International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications*, pp. 5–32, 2008.
12. P. Yomsi and Y. Sorel, "Schedulability Analysis for non-Necessarily Harmonic Real-Time Systems with Precedence and Strict Periodicity Constraints using the Exact Number of Preemptions and no Idle Time", *Proceedings of the 4th Multidisciplinary International Scheduling Conference, MISTA '09*, Dublin, Ireland, August, 2009.
13. A. Zykov, *Fundamentals of graph theory*. Moscow: University book, 2004.

УДК 004.925.8
DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2020.4.10

ВЗАЄМОДІЯ МОДЕЛЕЙ З РЕАЛЬНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ЯК СПОСІБ УДОСКОНАЛЕННЯ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

О.С. БЕЗПАЛЬКО

Анотація. На відміну від чисто віртуального світу користувачеві значно складніше повірити у реальність об'єктів доповненої реальності. Через відсутність правильного освітлення, або тіней може видатися, що предмет плаває у повітрі, від'єднаний від реальних предметів навколо нього. Однією очевидною проблемою, яка існує в доповненій реальності, є те, що віртуальний об'єкт видається віддаленим від реального об'єкта, проте він все ще з'являється перед ним. Запропоновано підхід, за якого стане можливою взаємодія реальних та віртуальних об'єктів. Як реальні, так і віртуальні об'єкти можуть бути переміщені й обертатись у сцені, зберігаючи перекривання. Віртуальний об'єкт також може міститися перед реальним об'єктом або позаду нього відносно камери, яка вирішить, чи має відбуватися перекриття, чи ні. Запропоновано алгоритм, що складається з п'яти етапів та архітектури системи. Оцінка проводиться на основі п'яти визначених критеріїв. Подано результати та способи вдосконалення для майбутніх досліджень.

Ключові слова: взаємодія моделей, перекривання, розпізнавання образів.

ВСТУП

Доповнена реальність (AR), або розширена реальність — захоплива сфера в інформатиці, що лише останнім часом набула популярності. Розширена реальність має на меті поєднувати реальний світ з віртуальним світом таким чином, щоб він видавався природним, використовуючи певний тип екрана для накладання віртуальних об'єктів на реальний світ, який захоплюється камерою в режимі реального часу. Мета полягає в тому, щоб реальні та віртуальні об'єкти в середовищі користувача безперешкодно зливалися. Щоб це було переконливо, реальні та віртуальні об'єкти повинні реально взаємодіяти. Поширений приклад — поставити віртуальну чашку на справжній стіл, який буде виглядати і вести себе як справжня чашка. Натепер багато компаній інвестують, щоб спробувати стати передовою компанією, яка використовує таку технологію. Існує безліч сфер, де використовується розширена реальність (ігри, освіта, обмін інформацією тощо). Щодня вивчається та розробляється дедалі більше випадків використання.

Дослідження проблеми в доповненій реальності обрано завдяки зростанню популярності галузі та набуттю певного досвіду, який, імовірно, стане корисним у майбутньому.

ПРОБЛЕМАТИКА

Мета роботи — запропонувати підхід, за якого стане можливою взаємодія реальних та віртуальних об'єктів. Як реальні, так і віртуальні об'єкти можуть бути переміщені й обертаються у сцені, зберігаючи перекривання. Віртуальний об'єкт також може перебувати як перед реальним об'єктом, так і позаду нього відносно камери, яка вирішить, чи має відбуватися перекривання, чи ні. Необхідно з'ясувати чи працює перекривання в ідеалізованому середовищі (наприклад, уніфікована таблиця з малою кількістю предметів), у менш контрольованому середовищі (наприклад, на вулиці), або якщо реальні чи віртуальні об'єкти перекладаються та обертаються, а також які фактори підвищують або зменшують продуктивність системи відносно перекривання.

ПОВ'ЯЗАНІ РОБОТИ

Існує багато підходів до вирішення проблеми оклюзії в межах доповненої реальності. Їх можна поділити на два типи: на основі глибини та на основі моделей.

У модельному підході іноді використовуються попередні знання про реальні об'єкти, які потім переводяться на геометричні моделі. У дослідженні, проведеному Д. Бріном [1], модель 3D-сцени вже відома. Але мати тривимірну модель, доступну в будь-який час у додатку AR, не можливо, вона може працювати лише для конкретних випадків використання.

У праці [2] у пропонованому вирішенні не використовується інформація про глибину чи реконструкцію моделі. Замість цього дозволяється користувачу спочатку визначити об'єкт для перекривання у першому кадрі, який відстежується у наступних кадрах. Користувач визначає деякі пікселі, що відповідають фоновому режиму, так, щоб алгоритм міг поділити всі пікселі на об'єктні або фонові. Це потребує тісної взаємодії з користувачем, щоб об'єкт завжди перекривав віртуальні об'єкти не залежно від того, чи реальне розміщення об'єкта за ним чи перед ним.

Щоб усунути вимогу мати попередньо виготовлену 3D-модель сцени, К. Онг [3] запропонував метод першої сегментації силуетів реального об'єкта вручну у вибраних «ключових кадрах». Їх потім використовують для автоматичної побудови приблизних 3D-комп'ютерних моделей, які маскують реальні об'єкти. Ці маски стають невидимими, хоч вони все ще можуть закрити віртуальний об'єкт. Установлення цих масок потребує ручного налаштування користувачем.

У підході, заснованому на глибині, запропонованому Шмідтом [4], використовується система бінокулярної стереокамери для обчислення щільних карт нерівномірності. Результати дослідження за допомогою цього методу є задовільними, але більшість пристроїв доповненої реальності сьогодні накладаються на одну камеру, а не на декілька, що робить цей метод для них непридатним. У майбутньому можливе звичайне встановлення систем камер для звичайних користувачів.

Спроба побудувати віртуальний 3D-об'єкт, який відповідав би реальному об'єкту без заздалегідь відомих даних про об'єкт, виявилась непростю, що спонукало дослідити контурно-орієнтований підхід. Таким чином, не потрібно знати або виявляти 3D-форму об'єкта. Вирішення, яке викорис-

товує контурний підхід, запропонував М. Бергер [5]. У цій праці автор аналізує і порівнює карту краю сцени та карти віртуального об'єкта з різних точок зору для визначення їх відносних позицій. Складність полягає в тому, що віртуальні та реальні об'єкти мають бути статичними у сцені, а це потребує перерахунку, якщо об'єкти рухаються.

Підхід, що розглядається у цій роботі, не потребує взаємодії з користувачем, крім переміщення камери для пошуку площини. Об'єкти можуть вільно переміщатися по площині, і алгоритм автоматично в режимі реального часу визначатиме розташування віртуального об'єкта — чи він за реальним об'єктом, чи перед ним, і відповідно виконуватиме перекривання.

ЗАПРОПОНОВАНИЙ ПІДХІД ТА МЕТОДИ

Проблеми перекривання

На відміну від чисто віртуального світу, користувачу значно складніше повірити у реальність об'єктів доповненої реальності. Це зумовлено тим, що віртуальні об'єкти не виглядають правильно, коли їх застосовують до стандартних об'єктів реального світу. Ось чому деякі особливі ефекти у фільмі можуть видатися непоказними, коли в суто віртуальній сцені вони добре сприймаються. Через відсутність правильного освітлення, або тіней може видатись, що предмет плаває у повітрі, від'єднаний від реальних предметів навколо нього. Однією очевидною проблемою, яка існує в доповненій реальності, є те, що віртуальний об'єкт виглядає далі від реального об'єкта, проте він все ще виникає перед реальним об'єктом, як це видно на рис. 1. Цю проблему можна було б вирішити за ідеального перекривання. Досягнути ідеального перекривання надзвичайно складно, утім воно і не має бути ідеальним, щоб бути корисним у сучасних програмах.



Рис. 1. Приклад некоректного перекривання

Основна мета в разі перекривання — збереження правильного відображення в межах сцени додаткової реальності. Будь-які віртуальні об'єкти, що містяться за реальними об'єктами, мають ховатися частково або повністю за цим реальним об'єктом. Це підсилює глибинне сприйняття об'єкта всередині сцени і усуває будь-які сумніви щодо того, де віртуальний об'єкт насправді перебуває у сцені.

Метод

Підхід, який пропонується в роботі, полягає у вибіркового запобіганні візуалізації частин віртуальної сцени на екрані на основі знань про реальну сцену, отриману за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору. Це робиться за п'ять кроків:

- 1) знаходження принаймні однієї горизонтальної площини у сцені;
- 2) пошук об'єктів реального світу, розташованих на виявленій горизонтальній площині;

- 3) визначення відносної відстані між реальним об'єктом та камерою;
- 4) реконструкція віртуального 2D-силуету реального об'єкта;
- 5) надання цьому силуету прозорої маски, яка перекриває будь-які віртуальні об'єкти за ним.

Найбільш важливою частиною є пошук різних предметів реального світу та перетворення їх у правильний віртуальний силует. Трудність різко зростає зі збільшенням кількості різноманітних об'єктів у сцені. Крім того, фон може складатися з різних типів будівель, кожна з яких має свої унікальні розміри та форми. Правильне визначення і відокремлення з динамічним та автоматичним створенням реалістичних масок оклюзії потребують великої обчислювальної потужності або дуже ефективного алгоритму. Додатковими обмежувальними факторами є поганий діапазон поточних пристроїв розширеної реальності і дещо низька роздільна здатність.

Пошук горизонтальної площини та відстань до об'єкта. ARKit має можливість виявляти горизонтальні поверхні, наприклад, столи чи підлоги. Це робиться шляхом пошуку особливостей у зображенні, знятому камерою для кожного кадру, а потім відстеженням цих функцій через кадри, одночасно зчитуючи різні датчики руху пристрою для обчислення того, як камера переміщується між кадрами. Знайдені площини можна використовувати для розміщення віртуальних об'єктів у програмі доповненої реальності. Ці площини також дають уявлення про глибину двовимірних зображень, отриманих камерою, за допомогою яких можна визначити відстань від камери до реальних об'єктів, розташованих на одній з цих площин.

Якщо силует об'єкта реального світу виявлено, його можна правильно розмістити у віртуальному світі за умови, що об'єкт розташований на виявленій горизонтальній площині. Тоді точки, де силует торкається площини, можна використати, щоб визначити відстань до камери. Цю відстань можна використовувати для встановлення відповідного силуету у віртуальному світі на правильній відстані від камери. Віртуальні об'єкти у сцені можуть чітко визначити, чи вони містяться за силуетом чи перед ним, оскільки вони мають однаковий параметр відстані.

Пошук реальних предметів у сцені та побудова силуету. Правильне й ефективне сегментування фону та переднього плану сцени потребує великої роботи. Метод, який пропонується в цьому дослідженні, — це перетворення зображення, знятого з камери кожного кадру, у відтінок сірого. Із зображенням сірого кольору легше працювати щодо розрізнення об'єктів на основі контрастів. Зображення розмивається і видаляється частина візуального шуму перед проведенням операції з визначення порогового значення.

Операція з визначення порогового значення сегментує зображення у сірому форматі на бінарне зображення суто чорно-білого. Порогове значення визначає значення пікселя, виходячи з його інтенсивності. Якщо інтенсивність нижча за порогове значення, то піксель стане чорним, а якщо вища — піксель стане білим. Математично це можна описати так.

Для правильного визначення потрібно знати, чи фон від переднього плану світліший, чи темніший. Алгоритм, який використовується для цього, обчислює середнє значення всіх значень інтенсивності світла і відбирає його для кількох кадрів.

Після встановлення порога зображення можуть бути застосовані додаткові морфологічні операції для видалення шуму та заповнені невеликі отвори, які можуть з'явитися на зображенні. Це робиться шляхом застосування операцій закривання та відкривання. Операцією закривання знаходяться ізо-

льовані чорні ділянки і пікселі перетворюються в білі пікселі, тоді як операцією відкривання виявляються ізольовані білі ділянки і вони перетворюються у чорні.

Щоб мати можливість створити віртуальний силует об'єкта, потрібно знайти лише контур об'єкта, оскільки об'єкт вважається повністю непрозорим. Знайти контури у двійковому зображенні просто, оскільки він буде скрізь, де чорний натрапляє на білий. Деякі об'єкти можуть після встановлення порога містити отвори всередині об'єкта. Ці отвори іноді є в самому об'єкті, наприклад, у пончику, тоді як інколи це зумовлено неправильним порогом, спричиненим відбитим світлом, або непрозорою частиною, яка має подібний колір до фону. Фільтрування цих отворів створює проблеми в першому випадку, але значно зменшує проблеми у другому, що трапляється дуже часто.

Після того, як контур знайдений, він міститиме багато вершин за рахунок порогового зображення, яке має багато нерівних країв через збільшення масштабу. Для зниження обчислювальної потужності під час побудови віртуального силуету контур спочатку має бути наближеним, щоб зменшити кількість вершин за допомогою алгоритму Дугласа–Пейкера. Після зменшення вершин проводиться триангуляція і створюється віртуальний силует. На нього наносять спеціальну текстуру, яка визначає, як буде передаватися силует, щоб зробити його невидимим, але він ще здатний перекривати інші віртуальні об'єкти.

Архітектура системи

Пропонується використовувати ARKit як платформу для доповненої реальності, оскільки вона була однією з найбільших платформ з постійними оновленнями, або ж використовувати AR Core Google.

Unity пропонується як двигун для побудови системи. Unity пропонує простий у користуванні інтерфейс і дуже потужні інструменти для оброблення всіх віртуальних об'єктів та створення необхідного користувацького інтерфейсу.

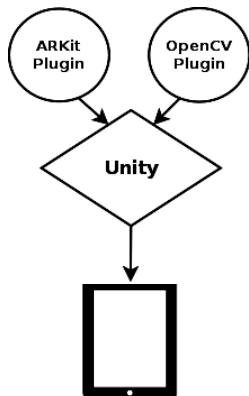


Рис. 2. Архітектура запропонованої архітектури

OpenCV — бібліотека програмного забезпечення для комп'ютерного зору. Вона містить алгоритми для оброблення зображень, які можна застосовувати для отримання великої кількості різної інформації зі сцени. Крім того, матимемо не лише механізм оброблення відео чи зображень, а і механізм автоматичного виявлення перекривання об'єктів, використовуючи плагін для OpenCV в Unity.

Запропоновану архітектуру показано на рис. 2, а спосіб оброблення одного кадру — на рис. 3. Спочатку ARKit аналізує кадр і порівнює його з попередніми кадрами для знаходження площин. Далі OpenCV обробляє кадр для виявлення силуетів, які Unity використовує для створення віртуальних сіток, що відповідають силуетам.

Обмеження

Пропонується підхід насамперед для роботи в ідеалізованому середовищі, де об'єкти та фон добре визначені. Це означає, що в приміщенні рівномірне освітлення, коли предмети, що перекриваються, не надто схожі на фон.

Зроблено це з метою спрощення дослідження через зменшення змінних, які потрібно враховувати, оскільки враховувати всі можливі змінні надто складно і це потребує спеціалізованої команди. Дія у зовнішніх умовах все ще буде оцінена. Головне завдання роботи — пропозиція концепції, а не продукт.

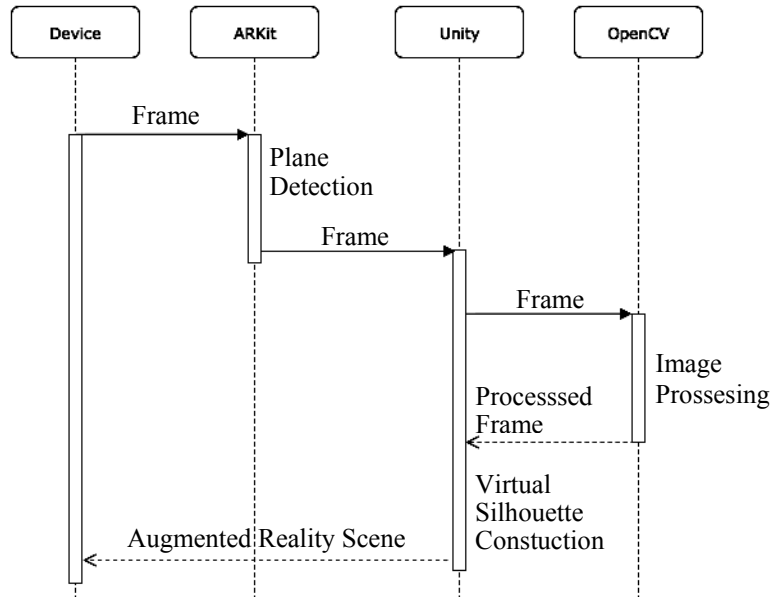


Рис. 3. Спосіб оброблення одного кадру

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Передусім слід зазначити, що система перебуває на початковому етапі розроблення і працює лише в тестовому режимі. Утім головною метою роботи є не розроблення готового додатка, а висвітлення існуючої проблеми і пропозиція можливої архітектури та алгоритму роботи для її вирішення.

Умови експериментів

Експерименти проводилися як у приміщенні, так і на відкритому повітрі. Поверхні, що використовуються в приміщенні, — це однакові столи з різними кольорами, як світлими, так і темними, на яких розміщувались реальні предмети. Об'єкти були непрозорими або блискучими, або матовими для визначення ефекту, коли на об'єкт відбивається освітлення. Об'єкти мали різні розміри, форми та кольори. Освітлення змінювалося від прямого світла, спричиняючи нерівномірне освітлення, до непрямого світла, яке рівномірно освітлює сцену.

На відкритому повітрі експерименти проводилися на сусідній вулиці під прямими сонячними променями і в тіні. Поверхнями, на яких проводились експерименти, були асфальт, бруківка, трава тощо. Використовувані об'єкти — це звичайні речі, такі як машини, дерева і т.ін.

Оцінювання

Критерії для оцінювання системи в кожному експерименті:

- 1) чи працює перекривання за призначенням, коли камера статична;

- 2) чи мерехтить віртуальний об'єкт;
- 3) чи зберігається перекривання із переміщенням камери;
- 4) чи перекривання коректне лише тоді, коли віртуальний об'єкт розташований за реальним об'єктом, а не попереду;
- 5) чи додавання прямого світла негативно впливає на сцену.

Переміщення віртуального об'єкта перед реальним об'єктом має означати, що він більше не перекривається, а переміщення його назад за реальний об'єкт повинно змусити його знову перекриватися.

Експерименти

Проведено шість пробних тестів. Продемонструємо найкращий і найгірший випадки.

Експеримент з найкращими результатами проведено в приміщенні на чорному столі з білими предметами для перекривання (рис. 4). Освітлення рівномірне і непряме. Перекривання працює тут за призначенням. Немає візуального мерехтіння, а переміщення камери по сцені зберігає перетинання. Переміщення віртуального об'єкта за реальний об'єкт або перед ним усе ще зберігає коректне перекривання. Додавання прямого світла не мало негативного впливу на оклюзію. Якщо один з білих предметів перекривався білою стіною, це призводило до того, що вся стіна стає перекривальним об'єктом.



Рис. 4. Приклад найкращого функціонування системи

Експеримент з найгіршим результатом проводився на вулиці біля машини (рис. 5). Перекривання ледве спрацювало за призначенням, маючи незначну проблему від тіней дерев, коли камера була статичною під певним кутом. Об'єкт мерехтів, а переміщення камери зіпсувало перекривання.



Рис. 5. Приклад найгіршого функціонування системи

Переміщення віртуального об'єкта перед автомобілем не дозволило належним чином відділити автомобіль від віртуального об'єкта. Додавання прямого освітлення не мало ефекту, оскільки сонячне світло було надто сильним для створення помітної різності.

Загальні результати шести експериментів можна бачити в таблиці. Результати демонструють, що алгоритм працює в приміщенні краще порівняно із зовнішнім середовищем щодо критеріїв, які використовувались для оцінювання

Результати експериментів

Номер експеримента	Статичне перекривання	Мерехтіння	Рух камери є коректним	Перекривання коректне, якщо модель за об'єктом	Вплив прямого світла відсутній
1	Так	Ні	Так	Так	Ні
2	Так	Ні	Так	Так	Так
3	Ні	Ні	Ні	Ні	Так
4	Іноді	Так	Ні	Ні	Так
5	Іноді	Так	Ні	Ні	Так
6	Ні	Так	Ні	Ні	Так

ДИСКУСІЯ ТА ПІДСУМКИ

Етап оброблення зображень, що стосується відокремлення переднього плану від фону, можна вдосконалити. Виявлення об'єктів на передньому плані є важливою частиною системи, і якщо цю частину вдосконалити, то систему можна застосовувати в більш складних середовищах з більш точним перекриванням. Однак це є великою проблемою, яку не легко вирішити, коли камера рухома, а це означає, що фон не буде статичним. Це було б більш можливим з додатковим обладнанням, таким як подвійне установа камери, яка забезпечує два дещо різні перегляди однієї сцени кожного кадру. Обчислення різностей між переглядами може дати більше інформації про те, яка частина сцени є фоном, а яка переднім планом.

Частина системи пошуку відстані покладається на ARKit та одну з його виявлених площин. Це можна зробити окремо від ARKit, щоб дозволити пошук відстані навіть тоді, коли площину не виявлено. Із додатковим обладнанням, наприклад подвійними камерами, або інфрачервоним датчиком відстані, це можна реалізувати без особливих ускладнень. Алгоритм, що визначає, чи фон переважно білий, чи переважно чорний, за середньої інтенсивності світла, імовірно можна покращити. За наявності більшої інформації про те, яка частина зображення на передньому плані, а яка є фоном, цей алгоритм може стати більш продуктивним.

ВИСНОВКИ

Перекривання працює за призначенням, коли реальні об'єкти розташовані перед віртуальним об'єктом, що перекривається, а реальні об'єкти за віртуальним об'єктом не включають у себе сам віртуальний об'єкт. Нерівномірний рух камери може спричинити в алгоритмі стрибки вперед і назад між тим, що він виявляє як об'єкти для перекривання, і тим, що він визначає як фон. Це може зумовити ефект мерехтіння на віртуальному об'єкті. Переміщення камери навколо сцени може спричинити збій перекривання через зміни у фоні та передньому плані, через що алгоритм іноді працює лише з певних ракурсів у середині сцени. Зміна освітлення сцени може впливати на перекривання.

ЛІТЕРАТУРА

1. D.E. Breen, R.T. Whitaker, E. Rose, and M. Tuceryan, “Interactive occlusion and automatic object placement for augmented reality”, *Computer Graphics Forum*, vol. 15, no. 3, pp. 11–22, 1996.
2. Y. Tian, T. Guan, and C. Wang, “Real-time occlusion handling in augmented reality based on an object tracking approach”, *Sensors*, vol. 10, no. 4, pp. 2885–2900, 2010.
3. K.C. Ong, H.C. Teh, and T.S. Tan, “Resolving occlusion in image sequence made easy”, *The Visual Computer*, vol. 14, pp. 153–165, Oct 1998.
4. J. Schmidt, H. Niemann, and S. Vogt, “Dense disparity maps in real-time with an application to augmented reality”, in *Sixth IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, 2002 (WACV 2002). Proceedings*, pp. 225–230, Dec 2002.
5. M. Berger, “Resolving occlusion in augmented reality: a contour based approach without 3d reconstruction”, in *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 91–96, June 1997.

Надійшла 21.06.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Oleksandr S. Bezpalko, ORCID: 0000-0001-7595-6179, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: bos0x0mail@gmail.com

INTERACTION OF MODELS WITH REAL OBJECTS AS A WAY TO IMPROVE AUGMENTED REALITY / O.S. Bezpalko

Abstract. Unlike a purely virtual world, it is much more difficult for the user to believe in the reality of augmented reality objects. Due to the lack of proper lighting or shadows, the object may appear to be floating in the air, detached from the real objects around it. One obvious problem with augmented reality is that a virtual object appears remote from the real object, but it still appears in front of it. An approach is proposed that will allow the interaction of real and virtual objects. Both real and virtual objects can be moved and rotated in the scene, preserving overlaps. A virtual object can also be placed in front of or behind a real object relative to the camera, which decides whether or not to overlap. The proposed algorithm consists of five stages and the system architecture. The evaluation is based on five defined criteria. Results and ways of improvement for the future research are presented.

Keywords: model interaction, overlap, pattern recognition.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МОДЕЛЕЙ С РЕАЛЬНЫМИ ОБЪЕКТАМИ КАК СПОСОБ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ / А.С. Безпалько

Аннотация. В отличие от чисто виртуального мира пользователю значительно сложнее поверить в реальность объектов дополненной реальности. Из-за отсутствия правильного освещения, или теней может показаться, что предмет плавает в воздухе, отсоединен от реальных предметов вокруг него. Одной очевидной проблемой, которая существует в дополненной реальности, является то, что виртуальный объект кажется отдаленным от реального объекта, однако он все еще появляется перед ним. Предложен подход, при котором станет возможным взаимодействие реальных и виртуальных объектов. Как реальные, так и виртуальные объекты могут быть перемещены и вращаться в сцене, сохраняя перекрытия. Виртуальный объект также может находиться перед реальным объектом или позади него относительно камеры, которая решит, должно происходить перекрытия или нет. Предложен алгоритм, который состоит из пяти этапов и архитектуры системы. Оценка производится на основе пяти определенных критериев. Представлены результаты и способы совершенствования для будущих исследований.

Ключевые слова: взаимодействие моделей, перекрытия, распознавания образов.

UDC 519.925.51

DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2020.4.11

CELLULAR AUTOMATA MODELS WITH COMPLEX VALUED TRANSITION FUNCTIONS

A.S. MAKARENKO

Abstract. The new class of mathematical models for computation theory is considered — namely cellular automata (CA) with branching complex-valued transition functions. The key point is possible multivaluedness of cell's states with such transition functions. Different cases with complex-value transition functions had been considered. Dynamics CA on one branch and on different isolated branches are described. Also the case of transitions of states between branches is proposed. The case of continuous-valued CA and their finite-valued approximations are discussed. The problem of approximation of multivalued CA is stated.

Keywords: cellular automata, complex-valued transition functions, Riemann surface, continuous-valued CA, branching, approximation of multivaluedness, computations.

INTRODUCTION

Typically, classical cellular automatic machines (CA) have a cell assembly structure with a certain set of possible states. The states change at discrete points in time according to certain rules. Up to now, as far as we know, these dynamic rules have been defined using unambiguous transition functions. Recently, there has been a need to investigate CA with multi-valued transition functions and multi-valued states of the cells [1, 2]. The multi-valued case is much more difficult than single-valued case. Further study of such new CA (with multivaluedness) depends on examining specific examples of such objects. In this paper, we propose complex-valued cellular automata with a branched (multi-valued) structure with values on the Riemann surface. CA with the location of cells on the Riemann surface is also considered. Using complex-valued CA allows using the rich set of mathematical tools of complex-valued analysis.

So we propose the setting of many research problems in case of complex-valued CA. The structure of the paper is the next. In the section 2 we give the formal description of common cellular automata.

The section 3 is devoted to remembering some elements of complex-valued analysis. One — dimensional case of CA is considered in section 4. There are proposed many new problems for investigations. One of the main problems is approximation problem. Such problem is very important for approximate calculation of multivalued solutions.

DESCRIPTION OF THE CELLULAR AUTOMATON

Here we give the formal description of cellular automata with anticipation. First of all we follow the papers on CA (see for example [1–7]). We pose here the description one-dimensional CA from [1] but the description can be modified to many-dimensional cases.

One-dimensional CA is represented by an array of cells x_i where $i \in \Sigma$ (integer set) and each x takes a value from a finite alphabet Σ . Thus, a sequence of cells $\{x_i\}$ of finite length n represents a string or global configuration c on Σ . This way, the set of finite configurations will be represented as Σ^n . An evolution is represented by a sequence of configurations $\{c^t\}$ given by the mapping $\Phi: \Sigma^n \rightarrow \Sigma^n$; thus their global relationship is as follows:

$$\Phi(c^t) \rightarrow c^{t+1}.$$

Where t time steps and every global state c of affairs are defined by a sequence of cell states. Also the cell states in configuration c^t are updated at the next configuration c^{t+1} simultaneously by a local function φ as follow $s^?$:

$$\varphi(x_{i-r}^t, \dots, x_i^t, \dots, x_{i+r}^t) \rightarrow x_i^{t+1};$$

φ — multi-valued complex function. Note that classical studies assume that an unambiguous transition function [3–6]. At the same time, there may be various variants of using branching complex-digit functions with Riemann surfaces. The simplest cases are given here, which convey some of the behaviour of this class of objects. Let us preliminarily recall the description of functions with Riemann surfaces.

RIEMANN SURFACES

Riemann's hierarchy is the traditional name for one-dimensional complex differentiable diversity in comprehensive analysis. Such surfaces were systematically studied by Bernhard Riemann (Fig. 1, 2) Examples of Riemann surfaces include

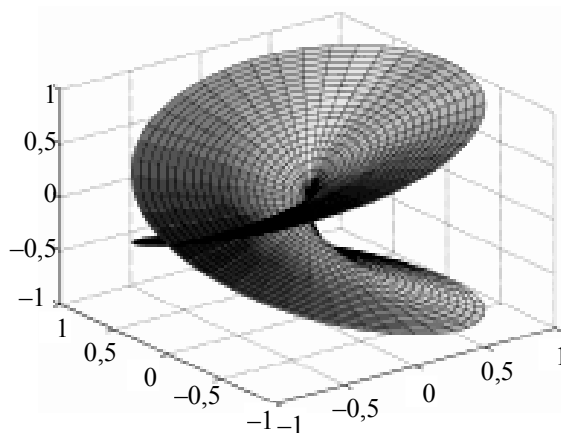


Fig. 1. Riemann surface for the function $f(z) = \sqrt{z}$

the complex plane and sphere of Riemann. The surface of Riemann allows geometrically to present multi-valued functions of a complex variable in such a way that each of its points corresponds to one value of multi-valued function, and at continuous movement on a surface the function also changes continuously. The canonical view of the Riemann surface is the representation as a flatbread with some number of holes [8–11].

According to Felix Klein, the idea of the Riemann surface still belongs to Galois: in his suicide letter he mentions some research on “ambiguity of functions” among his achievements (Fig. 3) [11]. The topological characteristic of the Riemann surface is the genus; the genus surface is a sphere, the genus surface is a torus [8–11].

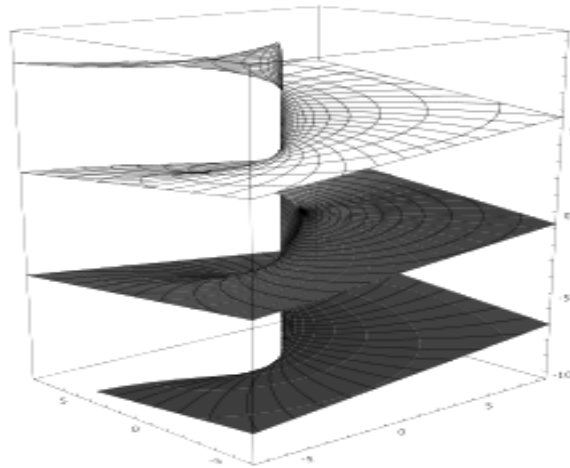


Fig. 2. Riemann surface for function $f(x) = \log z$

As an example, we also give the function of a complex variable with a single branching point, for example

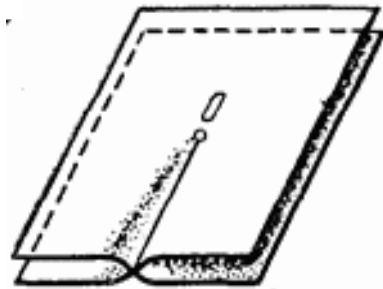


Fig. 3. Details of the construction of the Riemann surface function $f(z) = \sqrt{z}$

ONE-DIMENSIONAL CASE

In this paragraph we will illustrate the new research problems in the simplest cases.

One branching point. One branching point where branching conditions are not met for any point (e.g. all values during evolution are on the same branch of a function, e.g. on a function branch. Then the branching point is the only point, but let the CA values be outside the vicinity of the branching point. This corresponds to the class of unambiguous CA, but with certain generalizations. Namely, in our general case, CA looks like:

$$x_i^{n+1} = \varphi(\{\bar{x}^n\}_N; \bar{\alpha}),$$

x_i^n — state value of i cell at n moment of time ($n = 0, 1, 2, \dots$). In the case of classic CA, such as a game of life, the state of the cell is 0 или 1. In our case, the

complex function φ , $x_i^n \in M$, $M \subset \mathbb{C}^1$ where M — some subset of the space of complex numbers. Very conventionally, this can be represented in the form of a figure (Fig. 4)

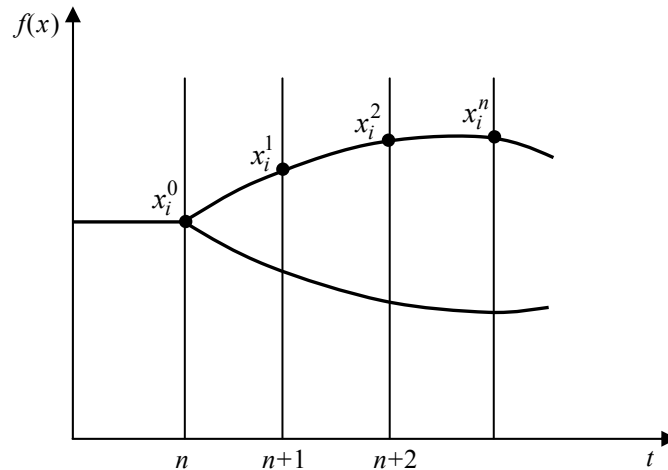


Fig. 4. Evolution of one cell by one branch

Here we represent the evolution of the values of one cell (Fig. 5). Other cells in case without branching have the same qualitative evolution depending on initial condition in the neighborhood of cell. Note that just in such case we have essential difference from the classical case. We can assume a whole set of values M , including $\text{card } M = \infty$, when a continuum of values is also allowed. (Remark that in classical case $M = \{0, 1\}$). Note that in general case it is possible to consider approximations of a continuum set M using a discrete set $M_K \subset M$ with a finite number K of possible cell values. This can be roughly seen in the figure

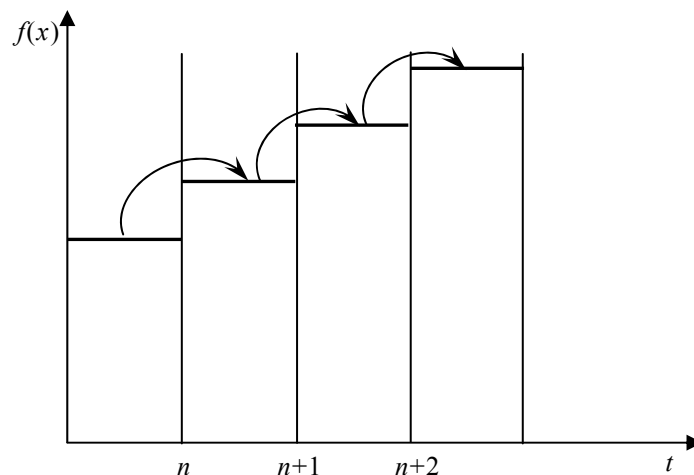


Fig. 5. Using approximations in evolution

An interesting task is the rigorous mathematical study of the applicability of such approximation, as well as the crystallization of the approximation.

An interesting task is the rigorous mathematical investigation of the applicability of such approximation as well as questions of marginal behaviour over time.

It can be assumed that assigning a rule to the CA transition as an analytical function can simplify the investigation of such questions.

Case of branching of transition function. A more complicated case is when the branching point of the transition function appears in the value range for only one cell. An illustration of chiefs appearing in the value range for only one cell is given in the figure below (Fig. 6).

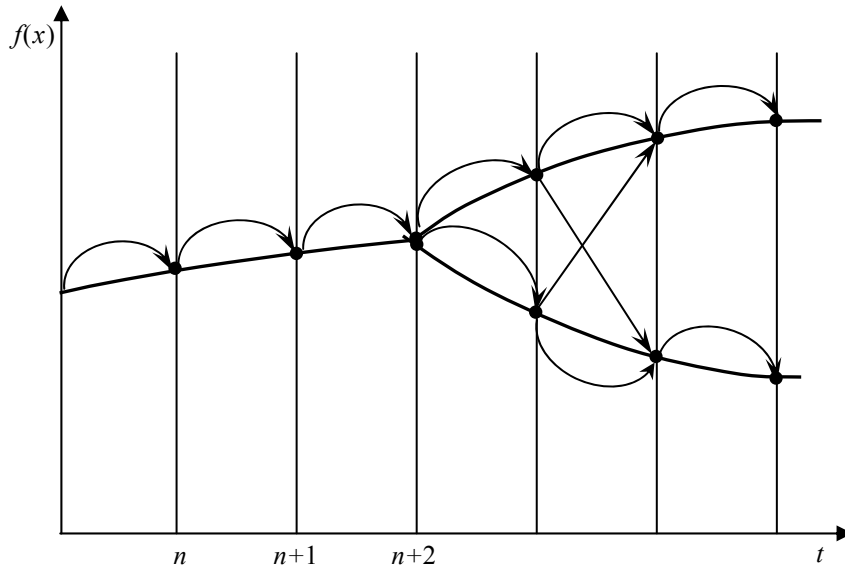


Fig. 6. General cases for an arbitrary transition function with possible dynamic transitions between two branches

A simpler case appears to be implemented for the function $\sqrt{\varphi}$, presumably with no jumps between branches, which requires further research. In this case, the idea of approximation with a finite set of values by branches can also be applied.

However, for arbitrary analytical functions case may exist with a large number of branches (or even an infinite number of branches). In this case, all studies on the limit behavior of CA remain valid. However, limit behavior must be investigated for a multi-valued case, for which the theory of multi-valued dynamic systems should be involved [12]. Along the way, we will point out another new class of research problems. For ordinary traditional cellular automata (including the game of Life) we can set the following problem: according to the well-known rules of CA, to find CA with a complex-valued transition function such that traditional CA is an approximation of complex-valued CA.

In this case, it is possible to raise the problem of studying traditional CA. Probably, the function $\sqrt{\varphi}$ can only evolve over two branches independently of each other (without jumping from branch to branch). At the same time, in the case of an arbitrary function it is possible and the situation with jumps between branches is possible.

This creates a whole new set of problems associated with finding special function φ . The first class of problems is related to the construction related to a specific CA (including traditional ones). For some CA, it is possible to find the exact function by deforming known complex functions. Another possibility is to determine on the basis of known approaches from artificial intelligence: for example, identification methods or machine learning. But, it may turn out that pre-

cise definition of a function is very resource-intensive or unconstructive. Then it is necessary to simplify problem definition and achieve only the proximity of a given CA solution with a certain complex function $\widehat{\varphi}$ at a certain time range $[0, T]$. Closely related to this is the question of the stability of the behaviour of solutions to such approximation with a small change in function φ . It is also possible to use functions φ with an infinite number of branching points. It is also important to construct a function with given branching points so that these branching points set a fixed behavior of the solution or at least approximate the required behavior of a multi-valued solution on a certain range.

The next class of tasks related to the selection of functionality for the task is to build an algorithm for solving a particular task or with the theory of calculations. Note that possible links with quantum computing are viewed here. It is also possible to introduce a special category of complex-valued CA with branches.

The problems above are easy to generalize for other problems as well. Thus, nothing limits the transfer from the case of 1D space with only one branching point in one cell to the case of possible branching points in each cell of the cell space. Everything said above is carried over to the case of 2D, 3D, ND spaces. But it is also possible to generalize the very concept of cellular automata. Thus, it is possible to consider cell automata on Riemann surfaces. A particular problem is the study of the dependence of the dynamics of CA on the topology of the space in which CA is given.

By the way, the transition from CA with a continuum of possible values to approximations of finite sets correlates with the study of continuous dynamical systems with the methods of symbolic dynamics in ergodic theory.

CONCLUSIONS

Thus in proposed paper we had been introduced new class of cellular automata with presumable multivaluedness. New research problems are proposed for such cellular automata. The most important problem is the problem of approximation. Also further more complex research problem are described including the investigation of CA on the Riemann surfaces.

REFERENCES

1. A. Makarenko, "Multivaluedness in cellular automata with strong anticipation and prospects for computation theory", *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, vol. 17, pp. 69–79, 2020.
2. A. Makarenko, "Cellular Automata with anticipation: Some new Research Problems", *Int. Journal of Computing Anticipatory Systems (Belgium)*, 20, pp. 230–242, 2008.
3. D. Krushinskiy and A. Makarenko, "Cellular automata with anticipation: examples and presumable applications", *AIP Conference Proceedings (USA)*, vol. 1303, pp. 246–254, 2010.
4. A. Illiachinski, *Cellular Automata. A Discrete Universe*. Singapore: World Scientific Publishing, 2001.
5. S. Wolfram, *New kind of science*. USA: Wolfram Media Inc., 2002.
6. B. Chopard and M. Droz, *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1998.

7. L. Faccetti and A. Makarenko, ““Game of Life” with Modifications: Non-regular Space, Different Rules and Many Hierarchical Levels”, *Int. J. Information Content & Processing*, 4 (1), pp. 21–50, 2017.
8. V.V. Golubev, *Lectures on analytical theory of differential equations* [in Russian]. M.-L.: Gostekhizdat, 1941, 400 p.
9. A.I. Markushevich, *Theory of analytical functions* [in Russian]. M., 1967.
10. B.V. Shabat, *Introduction to complex analysis*. Publisher: Lan, 577 p. Available: https://scask.ru/o_book_cmp.php?id=32.
11. *Riemann_surfaces*. Available: [En/Wikipedia/Riemann_surfaces](https://en.wikipedia.org/wiki/Riemann_surfaces)
12. M.Z. Zgurovsky and V.S. Melnik, *Nonlinear analysis and control of physical processes and fields*. Springer Science&Business Media, 2012, 508 p.

Received 09.12.2020

INFORMATION ON THE ARTICLE

Alexander S. Makarenko, ORCID: 0000-0001-6728-3058, Educational and Scientific Complex “Institute for Applied System Analysis” of the National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, e-mail: makalex@i.com.ua

МОДЕЛІ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ З КОМПЛЕКСНОЗНАЧНИМИ ФУНКЦІЯМИ ПЕРЕХОДУ / О.С. Макаренко

Анотація. Розглянуто новий клас математичних моделей для теорії обчислень — клітинні автомати (КА) з розгалуженими комплекснозначними перехідними функціями. Ключовим моментом є можлива багатозначність станів клітини з такими перехідними функціями. Розглянуто різні випадки з перехідними функціями з комплексними значеннями. Описано динаміку КА на одній гілці та на різних ізольованих гілках. Запропоновано розгляд випадку переходів станів між гілками, а також випадку неперервнозначних КА та їх кінцевозначних наближень. Поставлено проблему апроксимації багатозначних КА.

Ключові слова: клітинні автомати, комплекснозначні перехідні функції, поверхні Рімана, неперервнозначні КА, розгалуження, наближення багатозначності, обчислення.

МОДЕЛИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ С КОМПЛЕКСНОЗНАЧНЫМИ ФУНКЦИЯМИ ПЕРЕХОДА / А.С. Макаренко

Аннотация. Рассмотрен новый класс математических моделей теории вычислений — клеточные автоматы (КА) с ветвящимися комплекснозначными переходными функциями. Ключевым моментом является возможная многозначность состояний клетки с такими переходными функциями. Рассмотрены различные случаи с комплексными переходными функциями. Описана динамика КА на одной ветке и на разных изолированных ветвях. Предложено рассмотрение случая переходов состояний между вервями, а также случая непрерывнозначных КА и их конечнозначных приближений. Поставлена проблема аппроксимации многозначных КА.

Ключевые слова: клеточные автоматы, комплекснозначные переходные функции, римановы поверхности, непрерывнозначные КА, ветвление, аппроксимация многозначности, вычисления.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Безпалько Олександр Сергійович,

магістр кафедри технічної кібернетики факультету інформатики та обчислювальної техніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Бейко Іван Васильович,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри математичної фізики фізико-математичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Гурєєв Павло Михайлович,

доцент, доктор економічних наук, доцент кафедри інноваційного менеджменту ФГБООУ «Державний університет управління», Російська Федерація, Москва

Єпіфанов Сергій Валерійович,

професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів факультету авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, Харків

Жураковська Оксана Сергіївна,

кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління факультету інформатики та обчислювальної техніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Зінько Тарас Петрович,

кандидат технічних наук, молодший науковий співробітник НДС «Проблем системного аналізу» факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Україна, Київ

Зінько Петро Миколайович,

доцент, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри системного аналізу та теорії прийняття рішень факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Україна, Київ

Коваленко Юлія Борисівна,

доцент, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри безпеки інформаційних технологій Національного авіаційного університету, Україна, Київ

Козлюк Ірина Олексіївна,

професор, доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікаційних систем Національного авіаційного університету, Україна, Київ

Конахович Георгій Філімонович,

професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри телекомунікаційних систем Національного авіаційного університету, Україна, Київ

Кочубей Ілля Юрійович,

студент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління факультету інформатики та обчислювальної техніки КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Круш Ігор Володимирович,

аспірант ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Кудін Григорій Іванович,

доцент, кандидат фізико-математичних наук, молодший науковий співробітник НДС «Проблем системного аналізу» факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Україна, Київ

Макаренко Олександр Сергійович,

професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач відділу прикладного нелінійного аналізу ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ

Меняйлов Євген Сергійович,

старший викладач кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, Харків

- Мсняйлов Андрій Володимирович,**
кандидат технічних наук, спеціальний консультант з аеродинаміки компресорів ТОВ «Комерційна авіадвигунобудівна компанія», Китай
- Михалько Віталій Геннадійович,**
аспірант ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ
- Мокій Михайло Стефанович,**
професор, доктор економічних наук, професор ФГБОУ «Державний університет управління», Російська Федерація, Москва
- Наконечний Олександр Григорович,**
професор, доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри системного аналізу та теорії прийняття рішень факультету комп'ютерних наук та кібернетики Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Україна, Київ
- Петренко Анатолій Іванович,**
професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри системного проектування ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ
- Савастьянов Володимир Володимирович,**
молодший науковий співробітник ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ
- Співак Юлія Володимирівна,**
аспірантка кафедри математичної фізики фізико-математичного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ
- Ткаченко Дмитро Анатолійович,**
аспірант ІПСА КПІ ім. Ігоря Сікорського, Україна, Київ
- Ткаченко Юлія Григорівна,**
доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри державного і муніципального управління Південного федерального університету, Російська Федерація, Таганрог
- Трофимова Ірина Олексіївна,**
старший викладач кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, Харків
- Тюшняков Віталій Миколайович,**
доцент, кандидат економічних наук, доцент кафедри державного і муніципального управління Південного федерального університету, Російська Федерація, Таганрог
- Угрюмов Михайло Леонідович,**
професор, доктор технічних наук, професор кафедри теоретичної та прикладної системотехніки факультету комп'ютерних наук Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Україна, Харків
- Фуртель Олеся Вікторівна,**
асистент кафедри інформатики фізико-математичного факультету Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка, Україна, Кам'янець-Подільський
- Хусточка Олександр Миколайович,**
дійсний член Інженерної Академії України, заступник головного конструктора ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» ім. академіка О.Г. Івченка», Україна, Запоріжжя
- Черниш Сергій Вікторович,**
аспірант факультету систем управління літальних апаратів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, Харків
- Чумаченко Дмитро Ігорович,**
доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту факультету систем управління літальними апаратами Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна, Харків

Зміст журналу
«Системні дослідження та інформаційні технології»
за 2020 р.

ЗМІСТ № 1

<i>Панкратова Н.Д., Бідюк П.І., Голинко І.М.</i> Синтез многомерной системы управления для прецизионного комплекса искусственного микроклимата	7
<i>Хабраман Х., Мозговой Д.К.</i> Реконструкция 3D моделей зданий по их теням с помощью спутниковых снимков	21
<i>Pankratova N.D., Ptukha Y.A.</i> Estimation computational models of the cyber-physical systems functioning	28
<i>Danilov V., Gozhyj O., Kalinina I., Belas A., Bidyuk P., Jirov O.</i> Adaptive forecasting and financial risk estimation	34
<i>Matsuki Y., Bidyuk P.I.</i> Numerical simulation of gravitational waves from a black hole, using curvature tensors	54
<i>Зайченко Ю.П., Здор К.А., Гамидов Г.</i> Диагностика МРТ-изображений опухолей головного мозга с использованием гибридных сверточных нейронных сетей	68
<i>Кісельова О.М., Притоманова О.М.</i> Нечітка задача оптимального розбиття множин із обмеженнями на розміщення центрів підмножин	78
<i>Kulian V., Korobova M., Yunkova O.</i> Optimal stock portfolio diversification under market constraints	90
<i>Зак Ю.А.</i> Эвристические алгоритмы построения эффективных последовательностей выполнения заданий на одной машине во взаимосвязанных производственных системах	98
<i>Кирилюк В.С., Левчук О.І.</i> Моделирование контактной взаимодействия двух трансверсально-изотропных пружных півпросторів за наявності жорсткого дископодібного включення між ними і тиску на ділянці розшарування	107
<i>Городецький В.Г.</i> Теорема про реконструкцію деяких динамічних систем	120
<i>Спекторський І.Я., Галганов О.А.</i> Метод трикутника для побудови полінома Жегалкіна: зв'язок з трикутником Паскаля	129
Реферати	146
Відомості про авторів	154

ЗМІСТ № 2

<i>Коршевнюк Л.О.</i> Системний аналіз: еволюція і перспективи подальшого розвитку	7
<i>Хижняк А.В., Федоровський О.Д.</i> Методичні засоби системного аналізу як складові методології аерокосмічного геомоніторингу розв'язання природоресурсних і екологічних завдань	27
<i>Кислий Р.В., Петренко А.І.</i> Розпізнавання людської діяльності за допомогою портативних натільних датчиків	41
<i>Безпалько О.С.</i> Дослідження систем розпізнавання маркерів доповненої реальності	55
<i>Кузнєцова Н.В., Черниш З.С.</i> Застосування регресійних моделей для аналізу і прогнозування показників якості фінансової діяльності підприємства	67
<i>Криваковська Р.В.</i> Використання байєсових мереж для оцінювання точності результатів моделювання поширення димішок у повітрі за умови неточних вхідних даних	82
<i>Zaychenko H., Zaychenko Yu.</i> Fuzzy portfolio optimization problem under uncertainty conditions with application of computational intelligence methods	88
<i>Федин С.С., Зубрецькая Н.А.</i> Нейросетевое моделирование и оптимизация технологических параметров контактной точечной сварки	103
<i>Леднікова А.А., Шипік Д.В., Бідюк П.І.</i> Аналіз ризиків проекту за допомогою текстового інтелектуального аналізу даних коментарів у системі управління проектами JIRA	121
<i>Кирилюк В.С., Левчук О.І., Гавриленко О.В., Вітер М.Б., Харитонова Л.В.</i> Математичне моделювання напруженого стану в ортотропному електропружному просторі з довільно орієнтованою сфероїдальною порожниною (під внутрішнім тиском)	137
Відомості про авторів	149

ЗМІСТ № 3

<i>Kryvyy S.L., Pogorilyu S.D., Slynko M.S., Kramov A.A.</i> Method of semantic application verification in GPGPU technology	7
<i>Мельник І.В., Починок А.В.</i> Дослідження класу алгебричних функцій для інтерполяції межових траєкторій короткофокусних електронних пучків	23
<i>Мухомід А.В., Курило Е.А.</i> Расширенная интеграция системы электронного документооборота с пакетом офисных программ (работа с персоналом)	40
<i>Drogobyt'skij I.N.</i> Systematicity of organizational management	51
<i>Bodyanskiy Eu., Zaychenko Yu., Hamidov G., Kuleshova N.</i> Multilayer GMDH-neuro-fuzzy network based on extended neo-fuzzy neurons and its application in online facial expression recognition	66
<i>Рудзевич А.-М.П.</i> Методи машинного навчання в сентимент-аналізі текстової інформації на прикладі настроїв користувачів стосовно кандидатів у президенти України 2019	78
<i>Sineglazov V., Riazanovskiy K., Chumachenko O.</i> Multicriteria conditional optimization based on genetic algorithms	89
<i>Статкевич В.М.</i> Регулярные выражения для некоторых языков сетей Петри в задаче о производителе и потребителе	105
<i>Matsuki Y., Bidiyuk P.I.</i> Simulating the rotation of a black hole and antigravity	124
<i>Kirilyuk V.S., Levchuk O.I., Gavrilenko V.V., Viter M.B.</i> Modeling of contact interaction of a heated plane rigid elliptical punch with a transversally isotropic elastic half-space	138
Відомості про авторів	149

ЗМІСТ № 4

<i>Mokiy M.S., Gureev P.M.</i> The management of innovative processes in organizations. System-transdisciplinary approach	7
<i>Савастьянов В.В.</i> Розроблення інструментарію для аналізу текстів публічних та спеціалізованих джерел у завданнях передбачення та системного аналізу	15
<i>Tyushnyakov V.N., Tkachenko Y.G.</i> Using cognitive maps to study issues concerning the improvement of the quality of life of population in the frame of interregional disparities	29
<i>Ткаченко Д.А., Круш І.В., Михалько В.Г., Петренко А.І.</i> Машинне навчання під час діагностування і моніторингу сонного апное	43
<i>Жураковська О.С., Кочубей І.Ю.</i> Використання медіани Кемені в алгоритмі формування рекомендацій	59
<i>Trofymova I., Meniailov I., Chernysh S., Yepifanov S., Khustochka O., Ugryumov M., Myenyaylov A., Chumachenko D.</i> Methodology of non-linear robust estimation for the solutions synthesis of inverse and direct multidisciplinary problems in engineering dimensional chains calculation based on discrete analog data	70
<i>Наконечный О.Г., Кудін Г.І., Зінько П.М., Зінько Т.П.</i> Наближені гарантовані оцінки матриць у задачах лінійної регресії з малим параметром	89
<i>Бейко І.В., Фуртель О.В., Співак Ю.В.</i> Узагальнені розв'язки задач оптимального керування	104
<i>Конахович Г.Ф., Козлюк І.О., Коваленко Ю.Б.</i> Оптимізація показників ефективності організаційної системи технічної експлуатації та оновлення радіоелектронних систем повітряних суден	115
<i>Безпалько О.С.</i> Взаємодія моделей з реальними об'єктами як спосіб удосконалення доповненої реальності	132
<i>Makarenko A.S.</i> Cellular automata models with complex valued transition functions	141
Відомості про авторів	148
Зміст журналу за 2020 р.	150
Автори статей за 2020 р.	152
<i>Системні дослідження та інформаційні технології, 2020, № 4</i>	151

АВТОРИ СТАТЕЙ ЗА 2020 р.

Безпалько Олександр Сергійович, № 2, 4
Бейко Іван Васильович, № 4
Белас Андрій Олегович, № 1
Бідюк Петро Іванович, № 1, 2, 3
Бодяньський Євгеній Володимирович, № 3
Вітер Михайло Богданович, № 2, 3
Гавриленко Олена Валеріївна, № 2, 3
Галганов Олексій Андрійович, № 1
Гамідов Галіб, № 1, 3
Гожий Олександр Петрович, № 1
Голінко Ігор Михайлович, № 1
Городецький Віктор Георгійович, № 1
Гурєєв Павло Михайлович, № 4
Данилов Валерій Якович, № 1
Дрогобицький Іван Миколайович, № 3
Спіфанов Сергій Валерійович, № 4
Жиров Олександр Леонідович, № 1
Жураковська Оксана Сергіївна, № 4
Зайченко Олена Юріївна, № 2
Зайченко Юрій Петрович, № 1, 2, 3
Зак Юрій Олександрович, № 1
Здор Костянтин Андрійович, № 1
Зінько Петро Миколайович, № 4
Зінько Тарас Петрович, № 4
Зубрецька Наталія Анатоліївна, № 2
Калініна Ірина Олександрівна, № 1
Кирилук Віталій Семенович, № 1, 2, 3
Кислий Роман Володимирович, № 2
Кісельова Олена Михайлівна, № 1
Коваленко Юлія Борисівна, № 4
Козлюк Ірина Олексіївна, № 4
Конахович Георгій Філімонович, № 4
Коробова Марина Віталіївна, № 1
Коршевнюк Лев Олександрович, № 2
Кочубей Ілля Юрійович, № 4
Крамов Артем Андрійович, № 3
Криваковська Регіна Володимирівна, № 2
Кривий Сергій Лук'янович, № 3
Круш Ігор Володимирович, № 4
Кудін Григорій Іванович, № 4
Кузнецова Наталія Володимирівна, № 2
Кулішова Нонна Євгенівна, № 3
Кулян Віктор Романович, № 1
Курило Олена Олександрівна, № 3
Левчук Ольга Іванівна, № 1, 2, 3
Леднікова Анна Андріївна, № 2
Макаренко Олександр Сергійович, № 4
Мацукі Йошіо, № 1, 3
Мельник Ігор Віталійович, № 3
Меняйлов Євген Сергійович, № 4
Меняйлов Андрій Володимирович, № 4
Михалько Віталій Геннадійович, № 4
Мозговий Дмитро Костянтинівич, № 1
Мокій Михайло Стефанович, № 4
Мухойд Олександр Вікторович, № 3
Наконечний Олександр Григорович, № 4
Панкратова Наталія Дмитрівна, № 1
Петренко Анатолій Іванович, № 2, 4
Погорілий Сергій Дем'янович, № 3
Починок Аліна Володимирівна, № 3
Притоманова Ольга Михайлівна, № 1
Птуха Юлія Анатоліївна, № 1
Рудзевич Анна-Марія Павлівна, № 3
Рязановський Кирило Денисович, № 3
Савастьянов Володимир Володимирович, № 4
Синєглазов Віктор Михайлович, № 3
Слинько Максим Сергійович, № 3
Спекторський Ігор Якович, № 1
Співак Юлія Володимирівна, № 4
Статкевич Віталій Михайлович, № 3
Ткаченко Дмитро Анатолійович, № 4
Ткаченко Юлія Григорівна, № 4
Трофимова Ірина Олексіївна, № 4
Тюшняков Віталій Миколайович, № 4
Угрюмов Михайло Леонідович, № 4
Федін Сергій Сергійович, № 2
Федоровський Олександр Дмитрович, № 2
Фуртель Олеся Вікторівна, № 4
Хабраман Хаді, № 1
Харитоновна Леся Василівна, № 2
Хижняк Анна Василівна, № 2
Хусточка Олександр Миколайович, № 4
Черниш Злата Святославівна, № 2
Черниш Сергій Вікторович, № 4
Чумаченко Дмитро Ігорович, № 4
Чумаченко Олена Іллівна, № 3
Шипік Данило Володимирович, № 2
Юнькова Олена Олександрівна, № 1