

Харківський національний
університет радіоелектроніки

Kharkiv National
University of Radio Electronics

Державне підприємство
"Південний державний
проектно-конструкторський
та науково-дослідний інститут
авіаційної промисловості"

State Enterprise
"Southern National Design
&
Research Institute
of Aerospace Industries"

**СУЧАСНИЙ СТАН
НАУКОВИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ
ТА ТЕХНОЛОГІЙ
В ПРОМИСЛОВОСТІ**

**INNOVATIVE
TECHNOLOGIES
AND
SCIENTIFIC SOLUTIONS
FOR INDUSTRIES**

№ 3 (17), 2021

No. 3 (17), 2021

*Щоквартальний
науковий
журнал*

*Quarterly
scientific
journal*

Харків
2021

Kharkiv
2021

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Бодянський Євгеній Володимирович,
д-р. техн. наук, професор

Заступник головного редактора
Айзенберг Ігор Наумович,
канд. техн. наук, професор (США);
Шекер Серхат,
д-р. техн. наук, професор (Туреччина)

Члени редколегії:

Артиух Роман Володимирович, канд. техн. наук;
Бабенко Віталіна Олексіївна, д-р. екон. наук, канд. техн. наук, професор;
Безкоровайний Володимир Валентинович, д-р. техн. наук, професор;
Гасімов Юсіф, д-р. мат. наук, професор (Азербайджан);
Гопсєнко Віктор, д-р. техн. наук, професор (Латвія);
Го Цян, д-р. техн. наук, професор (КНР);
Джавад Хамісабаді, канд. техн. наук, доцент (Іран);
Зайцева Єлена, д-р. техн. наук, професор (Словаччина);
Зачко Олег Богданович, д-р. техн. наук, доцент;
Коваленко Андрій Анатолійович, д-р. техн. наук, професор;
Костін Юрій Дмитрович, д-р. екон. наук, професор;
Левашенко Віталій, д-р. техн. наук, професор (Словаччина)
Лемешко Олександр Сергійович, д-р. техн. наук, професор;
Малєєва Ольга Володимирівна, д-р. техн. наук, професор;
Момот Тетяна Валеріївна, д-р. екон. наук, професор;
Музика Катерина Миколаївна, д-р. техн. наук, професор;
Назарова Галіна Валентинівна, д-р. екон. наук, професор;
Невлюдов Ігор Шакирович, д-р. техн. наук, професор;
Опанасюк Анатолій Сергійович, д-р. фіз.-мат. наук, професор;
Павлов Сергій Володимирович, д-р. техн. наук, професор;
Перова Ірина Геннадіївна, д-р. техн. наук, доцент;
Петленков Едуард, канд. техн. наук (Естонія);
Петришин Любомир Богданович, д-р. техн. наук, професор (Польща);
Рубан Ігор Вікторович, д-р. техн. наук, професор;
Семенець Валерій Васильович, д-р. техн. наук, професор;
Сетлак Галіна, д-р. техн. наук, професор (Польща);
Терзіян Ваган Якович, д-р. техн. наук, професор (Фінляндія);
Телетов Олександр Сергійович, д-р. екон. наук, професор;
Тімофєєв Володимир Олександрович, д-р. техн. наук, професор;
Філатов Валентин Олександрович, д-р. техн. наук, професор;
Чумаченко Ігор Володимирович, д-р. техн. наук, професор;
Чухрай Наталія Іванівна, д-р. екон. наук, професор;
Юн Джин, канд. фіз.-мат. наук, професор (КНР);
Ястремська Олена Миколаївна, д-р. екон. наук, професор.

ЗАСНОВНИКИ

Харківський національний університет радіоелектроніки,
Державне підприємство "Південний державний
проектно-конструкторський та науково-дослідний
інститут авіаційної промисловості"

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14
Інформаційний сайт: <http://itssi-journal.com>
E-mail редколегії: journal.itssi@gmail.com

EDITORIAL BOARD

Editor in Chief
Bodyanskiy Yevgeniy,
Dr. Sc. (Engineering), Professor, Ukraine

Deputy Chief Editor
Igor Aizenberg,
PhD (Computer Science), Professor (United States)
Serhat Seker,
Dr. Sc. (Engineering), Professor (Turkey)

Editorial Board Members:

Artiukh Roman, PhD (Engineering Sciences) (Ukraine);
Babenko Vitalina, Dr. Sc. (Economics); PhD (Engineering Sciences), Professor (Ukraine);
Bezkorovainyi Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Gasimov Yusif, Dr. Sc. (Mathematical), Professor (Azerbaijan);
Gopcyenko Victors, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Latvia);
Guo Qiang, Dr. Sc. (Engineering), Professor (P.R. of China);
Javad Khamisabadi, PhD (Industrial Management), Associate Professor (Iran);
Zaitseva Elena, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovak Republic);
Zachko Oleh, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Kovalenko Andrey, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Kostin Yuri, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Levashenko Vitaly, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Slovakia);
Lemeshko Oleksandr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Malyeyeva Olga, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Momot Tetiana, Dr. Sc. (Economics), Professor, (Ukraine);
Muzyka Kateryna, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Nazarova Galina, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Nevliudov Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Opanasyuk Anatoliy, Dr. Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Ukraine);
Pavlov Sergii, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Perova Iryna, Dr. Sc. (Engineering), Associate Professor (Ukraine);
Petlenkov Eduard, PhD (Engineering Sciences) (Poland);
Petryshyn Lubomyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Ruban Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Semenets Valery, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Ukraine);
Setlak Galina, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Poland);
Terziyan Vagan, Dr. Sc. (Engineering), Professor, (Finland);
Teletov Aleksandr, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Timofeyev Volodymyr, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Filatov Valentin, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chumachenko Igor, Dr. Sc. (Engineering), Professor (Ukraine);
Chukhray Nataliya, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine);
Yu Zheng, PhD (Physico-Mathematical Sciences), Professor (P.R. of China);
Iastremaska Olena, Dr. Sc. (Economics), Professor (Ukraine).

ESTABLISHERS

Kharkiv National University of Radio Electronics,
State Enterprise "National Design & Research Institute
of Aerospace Industries"

EDITORIAL OFFICE ADDRESS:

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauka Ave, 14
Information site: <http://itssi-journal.com>
E-mail of the editorial board: journal.itssi@gmail.com

Журнал включено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" наказом Міністерства освіти і науки України від 16.07.2018 №775 (додаток 7).

Затверджений до друку Науково-технічною Радою Харківського національного університету радіоелектроніки (Протокол № 10 від 17 вересня 2021 р.).

Свідоцтво про державну реєстрацію журналу Серія KB № 22696-12596P від 04.05.2017 р.

ЗМІСТ

Інформаційні технології

- 5 **Воробйов Ю. А., Шостак І. В., Кривова С. Г., Зубаньов О. Є.**
Розробка онтологічної системи інформаційної підтримки процесу переговорів щодо коопераційного виробництва в літакобудуванні (eng.)
- 13 **Золотарьов Д. О.**
Мікросервісна архітектура побудови розподілених автоматизованих обчислень високої доступності у хмарній інфраструктурі. (eng.)
- 23 **Мелешко Є. В., Якименко М. С., Босько В. В.**
Метод програмного імітаційного моделювання поведінки користувачів та ботів у рекомендаційній системі з використанням графової бази даних NEO4J (eng.)
- 32 **Новожилова М. В., Крамаренко В. І., Чуб О. І.**
Моделювання інформаційної технології управління матеріальними ресурсами будівельного підприємства (eng.)
- 41 **Порошин С. М., Усик В. В.**
Особливості використання четвертого етапу акустичної експертизи для приміщень спеціального призначення
- 62 **Раскін Л. Г., Сіра О. В., Сухомлин Л. В., Корсун Р. О.**
Розробка моделі динаміки імовірностей станів напівмарковських систем (eng.)
- 69 **Рудницький В. М., Хаді Аміне.**
Методичні засоби реалізації інформаційної технології експертного оцінювання якості важкої автомобільної техніки в процесі її експлуатації (eng.)

Сучасні технології управління підприємством

- 78 **Соколова Л. В., Дюжев В. Г., Верясова Г. М., Курденко О. В., Аль-Фахор Ескндер Суліман Салти**
Науково-методичне забезпечення фінансового експрес-аналізу малих промислових підприємств України (eng.)

Інженерія та промислові технології

- 91 **Луцький С. В.**
Системно-інформаційний підхід до невизначеності параметрів процесів і систем техносфери (eng.)
- 106 **Невлюдов І. Ш., Євсєєв В. В., Демська Н. П., Стародубцев М. Г.**
Вирішення питання модернізації виробничого обладнання з використанням кібер-фізичних виробничих системи керування
- 117 **Савранська А. В., Денісенко О. І.**
Побудова областей стійкості для керованих систем з параметричною та динамічною невизначеностями (eng.)
- 123 **Алфавітний показчик**

CONTENTS

Information Technology

- 5 ***Vorobyov Yu., Shostak I., Kryvova S., Zubanyov A.***
Development of ontological decision making system of the negotiation process on cooperation production in aircraft
- 13 ***Zolotariov D.***
Microservice architecture for building high-availability distributed automated computing system in a cloud infrastructure
- 23 ***Meleshko Ye., Yakymenko M., Bosko V.***
A method of computer simulation modeling of user and bot behavior in a recommendation system using the graph database NEO4J
- 32 ***Novozhylova M., Kramarenko V., Chub O.***
Modeling of information technology of material resources management of a construction company
- 41 ***Poroshin S., Usik V.***
Specific features of using the fourth stage of acoustic expertise for special purpose premises
- 62 ***Raskin L., Sira O., Sukhomlyn L., Korsun R.***
Development of a model for the dynamics of probabilities of states of Semi-Markov systems
- 69 ***Rudnytskyi V., Hadi Amineh***
Methodological tools for the implementation of information technology for expert assessment of the quality of heavy automobile equipment in the process of its exploitation

Modern Enterprise Management Technologies

- 78 ***Sokolova L., Dyuzhev V., Veriasova G., Kurdenko O., Al-Fakhore Esknder Suliaman Salty***
Scientific and methodological support of financial express analysis of small industrial enterprises of Ukraine

Engineering & Industrial Technology

- 91 ***Lutskyy S.***
System-information approach to uncertainty of process and system parameters
- 106 ***Nevliudov I., Yevsieiev V., Demska N., Starodubcev N.***
Solving the issue of modernization of production equipment using cyber-physical manufacturing control systems
- 117 ***Savranska A., Denisenko O.***
Construction of stability areas for controlled systems with parametric and dynamic uncertainty
- 123 **Alphabetical index**

YU. VOROBYOV, I. SHOSTAK, S. KRYVOVA, A. ZUBANYOV

DEVELOPMENT OF ONTOLOGICAL DECISION MAKING SYSTEM OF THE NEGOTIATION PROCESS ON COOPERATION PRODUCTION IN AIRCRAFT

Subject matter: means of information support for the negotiation process on the organization of cooperative production of aircraft. **Goal:** an outline of the process of developing effective means of information support for negotiations on cooperative production, which will provide financial savings, firstly, by reducing the negotiation time, and secondly, is reducing the likelihood of making irrational decisions that can lead to additional costs during project implementation. **Tasks:** Increase the efficiency of the negotiation process on the organization of cooperative production by creating a problem-oriented methodological basis, and on this basis - software tools for the development, deployment and operation of the appropriate decision support system. **Methods:** system analysis and set theory, for the formal presentation of relevant information about the subject area "Negotiations on cooperative aircraft production"; ontological engineering, in particular the IDEF5 standard, as well as elements of expert systems technology, for building an ontological decision support system. **Results:** an aggregate of methodological tools for the synthesis of ontological decision support systems was developed during negotiations on the organization of cooperative production of aircraft, a scenario example of organizing an ontological dialogue in the environment of an ontological decision support system for defining an aircraft model as an object of cooperative production was given. **Conclusions:** the need to supplement the mathematical support of traditional negotiation support systems with special methodological means is shown to increase the efficiency of information support for the negotiation process on organizing cooperative production in aircraft construction; it is substantiated that for the program implementation of the system of information support for negotiations on the organization, it is advisable to use the ontological approach; the architecture of the intellectual core of the ontological decision support system for organizing the negotiation process for organizing the cooperative production of aircraft in the form of a hierarchy of frames, with the organization of knowledge-based inference by means of attached procedures is proposed; a scenario example of the formation of a decision on the choice of an aircraft model for the organization of cooperative production in the environment of an ontological decision support system is given.

Keywords: aircraft construction; cooperative production; decision support system; ontological approach; frame hierarchy; decision maker.

Introduction

Today, cooperative production is a fairly common form of industrial organization, in particular, aircraft construction. In aircraft construction, the efficiency of cooperative production largely depends on the proper level of organization of negotiations between subcontractors, as the cost of correcting incorrect decisions made during negotiations will increase during the project, and may result in unacceptably high values. A key feature of the negotiations on the organization of cooperative production (NOCP) is the need to directly involve, especially at the stage of project initiation, a significant number of narrow specialists – experts. This raises the issue of prompt coordination of different, often contradictory opinions of experts, which slows down the process of NOCP and negatively affects its effectiveness in terms of unreasonably high entertainment costs, especially when it comes to international projects.

This study is devoted to the organization of information support of the NOCP process by developing a specialized information environment, which will present the knowledge of experts on technical, technological, financial and social issues of NOCP organization, and means of manipulating this knowledge for the rapid formation of agreed solutions.

Formulation of a scientific problem and its significance

The problem of insufficient efficiency of the NOCP negotiation process arises due to, inter alia, the lack of

specialized computer support tools, which in the formation of appropriate solutions, would allow to take into account the specifics of individual stages of NOCP, including the most critical stage – project initiation and subject area "Cooperative production in aircraft construction".

A constructive way to solve the stated problem is to develop an ontological decision support system (ODSS) on a set of issues of the NOCP organization.

Solving this problem by creating and using effective means of information support NOCP will save money, firstly, by reducing the time of negotiations, and secondly, by reducing the likelihood of irrational decisions that lead to additional costs during the project.

Analysis of publications on the stated problem

From the standpoint of situation analysis [1], NOCP is a process of exchanging views in order to reach an agreement on mutually beneficial cooperation.

The main distinguishing feature of NOCP from other types of negotiations is the presence of at least two participating parties with goals that do not coincide in part, personal interests, opinions and intentions. This partial disagreement is, in essence, a conflict. Another feature of the NOCP process is that they always occur, according to the classification of negotiation environments by D.O. Pospelov [2], in the most complex, transformed environment, which is problematic not only to create a deterministic description of the whole process, but also local models negotiations. The characteristics of the transformed environment are unstable and strongly

depend on the actions of the participating agents. The second of these features determines the feasibility of using in the analysis of NOCP conflict management tools.

The process of computerization of negotiation processes in various spheres of human activity, except for the organization of production, has been going on for a relatively long time [3], and today in a number of subject areas successfully used decision support systems (DSS) in negotiations [4]. At the same time, the peculiarities of aircraft construction and, accordingly, the processes of management of cooperative aircraft production projects [5], do not allow to directly apply the available on the software market means of information support of negotiations at the stage of NOCP initiation.

The **purpose** of the article is to solve the problem, which is to increase the efficiency of the NOCP process, by creating a problem-oriented methodological basis, and on this basis – software tools for development, deployment and operation of the relevant ODSS.

Materials and methods of the study

Let's consider the process of creating an ODSS NOCP in the form of a fragment that reflects the formation of a number of solutions for the assembly of the aircraft (AC). We will describe this process in accordance with the requirements of the standard of ontological research IDEF5 [6], as well as using approaches that are well known in the practice of ontological engineering [7-10].

We will assume that the ODSS NOCP AC F_{OS} fragment includes three ontologies:

$$F_{OS} = \{F_{OS}^M, F_{OS}^T, F_{OS}^{Sub}\}, F_{OS}^M \cap F_{OS}^T \cap F_{OS}^{Sub} = 0, \quad (1)$$

where F_{OS}^M – metaontology "Types and models of AC"; F_{OS}^T – ontology of tasks "Manufacturability of aircraft constructions"; F_{OS}^{Sub} – subject area ontology "AC assembly".

In this case, for any ontology F in the F_{OS} ODSS fragment $\forall F | F \subset F_{OS}$ it is true that

$$F = \{f[1], f[(j+1)_i]\}, j_i = \overline{1, M_i}, i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

where $f[1]$ – root frame of the ontology F ; $\{f[(j+1)_i]\}$ – descendant frames in any ontology that is part of F_{OS} ; i – aspect number to which the frame (set of frames) belongs; j_i – sequence number of the frame in the aspect; N – number of aspects of the ontology F ; M_i – the number of frames in the i -th aspect of the ontology F .

Each frame $f[(j+1)_i]$ can be represented as a combination of two types of slots $\{S_k\}$ and $\{S_l\}$. In this case, the slots from the set S_k inherit the features of higher-level frames and, thus, reflect the genus connections within the frame hierarchy; the set S_l also contains its own slots of this frame. Obviously, any root frame $f[j]$ contains only its own slots $\{S_l\}$:

$$\begin{aligned} \forall f[j] | f[j] \in F, f[j] = \{S_l\}; \\ \forall f[(j+1)_i] | f[(j+1)_i] \in F; \\ f[(j+1)_i] = \{\{S_k\}, \{S_l\}\}; \end{aligned} \quad (3)$$

$$k = \overline{1, K_{j_i}}, l = \overline{(K_{j_i} + 1), L_{j_i}},$$

where L_{j_i} is the number of frame slots $f[j_i]$.

The set of slots $\{S_l\}$ details the description of this or that ontological aspect, and also realizes communications with the lower hierarchical level.

One or more facets $C[j_i]$ are directly connected to any slot $S[j_i]$, and the number of facets determines the power of that slot. Facets are quantitative or qualitative restrictions on the characteristics determined by the slots.

Using the previously introduced notation, as well as methodological tools, considered in [11-13], we describe the ontological system ODSS in the form of a formal axiomatic theory of the first order Φ with a logical basis $\{\vee, \wedge, \rightarrow\}$.

Let the signature $\sigma^{(*)}$ is given for any ontology $F_{OS}^{(*)}$ that is part of an ontological system F_{OS} where $(*)$ can have the meaning of "M", "T" or "Sub", indicating that the symbols of the formal theory belong to "Metaontology", "Ontology of Tasks" or "Ontology of Subject Area", respectively.

$$\begin{aligned} \sigma^{(*)} = \{F^{(*)}[1], F^{(*)}[2_1], \dots, F^{(*)}[5_7], S_1^{(*)}[1], \dots, \\ S_4^{(*)}[1], S_1^{(*)}[2_1], \dots, S_7^{(*)}[5_7], T_1^{(*)}[2_1], \dots, \\ T_7^{(*)}[5_7], V_1^{(*)}[2_1], \dots, V_7^{(*)}[5_7]\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Such a description makes it possible to present a description of any ontology $F_{OS}^{(*)}$ as a model $M^{(*)}(\Phi)$ of the described theory Φ . Logical inference within the ODSS NOCP AC fragment under consideration is performed by activating the attached procedures, which have the form of product rules:

$$P_{OS} \supset P_k \cup P_l, |P_{OS}| = |S_{OS}|. \quad (5)$$

Attached procedures from the set $\{P_k\}$ belong to the type "Procedures – demons", and from the set $\{P_l\}$ – to the type "Procedures – servants", with a bijective reflection $G: P_{OS} \rightarrow S_{OS}$. Restrictions contained in facets are part of the antecedent rules – products from the set $\{P_l\}$.

Let's assume that all ontologies in the ODSS fragment have the same structure in the sense that they have the same number of aspects $N=4M$ and, in addition, the number of frames representing each aspect.

In addition, we will assume that each ontology that is part of F_{OS} is internally consistent, i.e. the following conditions are met for it:

- 1) all element names are defined in the glossary;
- 2) all files in the taxonomy are connected by hierarchical relations "is a"; at the top level of the taxonomic hierarchy, only one frame is defined;
- 3) for all elements defined in the ontology there are restrictions on their belonging to the frames;
- 4) frames and their elements have unique names;
- 5) all frames located at the lower level of the taxonomy have as a consequence of the attached procedures attributes included in the glossary of the ontological system;
- 6) restrictions within individual ontologies and the ontological system as a whole are consistent;
- 7) the associative connections between the frames that are part of different ontologies are explicitly given, these connections are described in the form of meta-rules.

Because the ODSS NOCP AC fragment is a dialog system by nature, the process of its operation consists in the iterative procedure of synthesis of text objects of the "REPORT" type by analyzing the corresponding objects of the "REQUEST" type. This analysis involves the consistent implementation within the ontological system of standard operations of ontological engineering: SEARCH; SAMPLE; CONNECTIONS; CUT OFF [14, 15].

The search operation involves:

- 1) analysis of the text object "REQUEST" in order to highlight a set of keywords (SKW);
- 2) reflection of SKW in terms of the glossary V :

$$V = \{Term\}, Term = (ID, Keyword Set, Description), \quad (6)$$

where ID – term identifier (corresponds to the identifier of the concept included in the glossary); $Keyword Set = \{Keyword Entry\}$ – a set of keywords belonging to a certain term; $Keyword Entry = (Keyword ID, Keyword)$ – a pair consisting of the keyword ID and the keyword itself; $Description$ – description of the meaning of the term;

- 3) search in each ontology $F \supset F_{OC}$ for the names of the frames by ID , obtained after the previous step. In result

$$\forall ((f[j]) \vee (f[(j+1)])) | (\bullet) \in (F_{OS}^M \vee F_{OS}^T \vee F_{OS}^{Sub}) \quad (7)$$

the set is formed $\{f[j_i]\}$ such that

$$\exists q \in Q_i : Term(q) \in V, \quad (8)$$

where $S^{(sub)}[3_2^2]$ – the identifier (ID) of the term corresponding to the frame name (the name of the frame q element).

At the sampling stage, the microcontext of the "REPORT" object is formed by activating the meta-rules that reflect the associative connections between the elements $\{f[j_i]\}$ that are part of different ontologies:

- 1) in each ontology that is a part of F_{OS} , frames and their elements connected through meta-rules with frames of other ontologies are distinguished. Since the ontologies in the ontological system are of the same type and there are taxonomies, such an operation is performed in each taxonomy, starting from the root frame and ending with the terminal elements of the lower levels;

- 2) this step involves removing from the ontological system of existing contexts by forming an appropriate set of sets;

- 3) the sets obtained in the previous step are sorted by the number of frame names (and their elements) contained in them, which coincided with the terms of the glossary.

The connection operation involves the formation of the macro-context of the "REPORT" object by combining elements isolated and extracted from the ontological system at the previous stage.

The clipping operation is used to remove excess elements from the REPORT object.

Excess elements include the names of frames without specifying their slots, facets and procedures, elements without specifying their belonging to frames, as well as elements that do not meet the requirements of relevance.

When creating AC co-production projects, one of the most critical, relative to the overall effectiveness of NOCP, is the initiation stage of the project, at which the parties to the negotiations determine the specific AC model, based on the needs and capabilities of potential cooperants [5]. The main task of this stage is the complex consideration of a significant number of parameters characterizing AC, the future object of CP. There is a problem of semantic combination of these parameters, because in nature (technical, technological, financial, social or mixed), they are heterogeneous.

The macrostructure of dialogue and ontological engineering procedures is given in table 1, and the list of concepts used in the example of the dialogue scenario of the decision-making person (DMP) with ODSS NOCP AC - in table 2.

Table 1. Macrostructure of dialogue and ontological engineering procedures for the choice of AC model for CP organization

| Macrostructure of dialogue | | Ontological engineering procedures | | |
|----------------------------|--|---|---|---|
| Dialog step number | Dialogue content Initializing the user dialogue Reaction (intercept initiative system) | Type of procedure | Meta rule from the conflict set, launched at the moment of dialogue | Graphical representation of the procedure |
| 1 | Which AC model meets the basic parameters that reflect the needs of CP participants? | SEARCH: - allocation of SKW; -display SKW in glossary terms; -search for element names in OS ontologies corresponding to SKW | | |
| | Object type Plane Helicopter Remotely piloted vehicle ... | CONNECTION: -generating a request from the system by activating the meta rule; -creating the "Object type" menu | $(S^{(sub)}[3_1^2]) \wedge (S^{(sub)}[3_2^2]) \rightarrow ((S_1^{(sub)}[1]) \wedge (F^{(sub)}[2_1]))$ | |
| 2 | Plane (user selection from the menu) | | $(S^{(np)}[2_1^1]) \rightarrow (F^{(np)}[3_2])$ | |
| | Type of aircraft maneuvering transport passenger's ... | CONNECTION | | |
| 3 | Passenger's (user selection from the menu) | | | |
| | Type of aircraft trunk regional for local airlines... | CONNECTION | | |

The end **Table 1.**

| | | | | |
|---|---|------------|---|--|
| 4 | Regional (selection of ODM from the menu) | | | |
| | Airplane model AN-140 IL-114 SSJ-100 ERJ-145 ... | CONNECTION | | |
| 5 | AN-148 (ODSS CP AC response) | | $(S^{(SUB)}[5_1^3]) \rightarrow (F^{(3)}[2_1])$ | |

Table 2. A list of concepts used in the example of the ODM dialogue scenario with ODSS

| The name of the concept and its position in ODDS | The meaning of the concept |
|--|---------------------------------|
| 1 | 2 |
| $F^{(sub)}[1]$ | Assembly of aircraft structures |
| $S_1^{(sub)}[1]$ | Aircraft |
| $F^{(sub)}[2_1]$ | Object type |
| $S^{(sub)}[2_1^1]$ | Plane |
| $S^{(sub)}[2_1^2]$ | Helicopter |
| $S^{(sub)}[2_1^3]$ | UAV |
| ... | |
| $S_2^{(sub)}[1]$ | Assembly units |
| $F^{(sub)}[3_1]$ | Wing |
| $S^{(sub)}[3_1^2]$ | Centroplan |
| $S^{(sub)}[3_2^2]$ | Negative part of the wing (NPW) |
| $F^{(sub)}[3_2]$ | Type of aircraft |
| $S^{(sub)}[3_2^1]$ | Maneuvering |
| $S^{(sub)}[3_2^2]$ | Transport |

| | |
|----------------------------------|--|
| $S^{(sub)} \left[3_2^3 \right]$ | Passenger's |
| $S^{(sub)} \left[3_2^4 \right]$ | General aviation aircraft (GAA) |
| ... | |
| $S_3^{(sub)} [1]$ | Subsonic aircraft |
| $F^{(sub)} [4_3]$ | Types of subsonic aircraft |
| $S^{(sub)} \left[4_3^1 \right]$ | Trunk |
| $S^{(sub)} \left[4_3^2 \right]$ | Regional |
| $S^{(sub)} \left[4_3^3 \right]$ | For local airlines |
| ... | |
| $F^{(sub)} [5_1]$ | Model range of regional aircraft |
| $S^{(sub)} \left[5_1^1 \right]$ | AN-140 |
| $S^{(sub)} \left[5_1^2 \right]$ | IL-114 |
| $S^{(sub)} \left[5_1^3 \right]$ | SSJ-100 |
| $S^{(sub)} \left[5_1^4 \right]$ | ERJ-145 |
| ... | |
| $F^{(t)} [1]$ | The task of assembling aircraft structures |

In the following scenario, ODSS NOCP AC forms the answer to the ATS question "Which AC model meets the basic parameters that reflect the needs of CP participants?"

Conclusions and prospects for further research

1. The necessity of supplementing the mathematical support of traditional systems of support of negotiations with special methodical means for increase of efficiency of information support of process of negotiations

concerning the organization of cooperative production in aircraft building is shown.

2. It is substantiated that for software implementation of the NOCP information support system it is expedient to use the ontological approach.

3. It is proposed to build the intellectual core of the ontological decision support system for the NOCP AC process in the form of a hierarchy of frames with the organization of knowledge output using the attached procedures.

4. A scenario example of forming a decision on the choice of AC model for the organization of CP in the ODSS environment is given.

References

- Whitty, S. J., Schulz, V. F. (2006), "The PM BOK CODE", *20th IPMA World Congress on Project Management*, No. 1, P. 466–472.
- Pospelov, D. A. (1986), *Situational management: theory and practice*, Moscow : Science, Ch. ed. Phys.-Math Lit., 288 p.
- Eom, S. B. (1995), "Decision support systems research: reference disciplines and a cumulative tradition", *The International Journal of Management Science*, Vol. 23, No.5, P. 511–523.
- Kislyakova, Y. V., Tarasov, B. V. (2005), "Computer systems for negotiation support", *Applied Informatics*, Moscow, No. 4, P. 46–51.
- Krivova, S. G., Zubanov, O. E. (2019), "Approaches to the correction of early stages of science-intensive engineering projects", *Technological systems*, Kyiv, No. 4 (89), P. 45–49.
- <https://www.r-p-c.ru/resheniya/metodologiya-idef-integrated-definition-modelirovaniya-biznes-processov.html>
- Standard Upper Ontology Working Group (SUO) IEEE P1600.1, <http://suo.ieee.org/>

8. Gruber, T. R. (1995), "Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing", *International Journal of Human-Computer Studies*, No. 43 (5-6), P. 907–928.
9. Guarino, N. (1995), "Formal Ontology: Conceptual Analysis and Knowledge Representation", *International Journal of Human-Computer Studies*, No. 43 (5-6), P. 625–640.
10. Sowa, J. F. (1984), *Conceptual Structures. Information Processing in Mind and Machine*, Reading, MA : Addison Wesley.
11. Shostak, I., Kapitan, R., Volobuyeva, L., Danova, M. (2018), "Ontological Approach to the Construction of Multi-Agent Systems for the Maintenance Supporting Processes of Production Equipment", *In Proc. : IEEE International Scientific and Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PICS&T-2018), Ukraine, Kharkiv, October 9-12*, P. 209–214.
12. Shostak, I., Danova, M., Romanenkov, Y., Bugaienko, O., Volk, M., Karminska-Bielobrova, M. (2018), "Organization of information support for business processes at aviation enterprises by means of ontological engineering", *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 2, No. 2 (92), P. 45–55. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126673
13. Pavlenko, V., Shostak, I., Morozova, O., Danova, M. (2018), "Information support for business processes on the virtual enterprises with the use of multi-agent technologies", *Proc. DEpendable Systems, SERVICES and Technologies - DESSERT'2018. Ukraine, Kyiv May 24-27*, IEEE Ukraine Section.
14. Vorobiev, Yu. A., Nechiporuk, N. V., Kobrin, V. N., Shostak, I. V. (2014), "Models of ontologies and an ontological decision support system for the choice of hand-held impulse devices", *Science Notes: Mizhvuz. zb. sciences. pr.*, Luts. Nat. tech. un-t. – Lutsk, No. 46, P. 77–83.
15. Vorobiev, Yu. A., Nechiporuk, N. V. (2017), "Technology of creation of metaontology "Manual impulse devices"", *Aviation and space technology i technology*, No. 6 (141), P. 4–10.

Received 25.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Воробійов Юрій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського "ХАІ", декан літакобудівного факультету, Харків, Україна; email: Yuriy.Vorobyov@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6401-7790>.

Воробьев Юрий Анатольевич – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского "ХАИ", декан самолетостроительного факультета, Харьков, Украина.

Vorobyov Yuriy – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Dean of the Aircraft Faculty, Kharkiv, Ukraine.

Шостак Ігор Володимирович – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського "ХАІ", професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Харків, Україна; email: iv.shostak@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3051-0488>.

Шостак Ігорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского "ХАИ", профессор кафедры инженерии программного обеспечения, Харьков, Украина.

Shostak Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Professor of the Department of Software Engineering, Kharkiv, Ukraine.

Кривова Світлана Георгіївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", доцент кафедри динаміки і міцності машин та опору матеріалів, Київ, Україна; email: skr081077@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-1112-5677-3729>.

Кривова Светлана Георгиевна – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", доцент кафедры динамики и прочности машин и сопротивления материалов, Киев, Украина.

Kryvova Svetlana – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Associate Professor of the Department of Dynamics and Strength of Machines and Strength of Materials, Kyiv, Ukraine.

Зубаньов Олександр Євгенійович – магістр, АТ "Український науково-дослідний інститут авіаційної технології", провідний інженер, Київ, Україна; email: info@ukrniat.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8649-1450>.

Зубанев Александр Евгеньевич – магистр, АО "Украинский научно-исследовательский институт авиационной технологии", ведущий инженер, Киев, Украина.

Zubanyov Alexander – Master, JSC "Ukrainian Research Institute of Aviation Technology", Leading Engineer, Kyiv, Ukraine.

РОЗРОБКА ОНТОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ ПРОЦЕСУ ПЕРЕГОВОРІВ ЩОДО КООПЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА В ЛІТАКОБУДУВАННІ

Предмет: засоби інформаційної підтримки процесу проведення переговорів по організації коопераційного виробництва (ПОКВ) повітряних суден (ПС). **Мета:** викладення процесу розробки ефективних засобів інформаційної підтримки переговорів про коопераційне виробництво, які забезпечать економію фінансів, по-перше, за рахунок скорочення термінів переговорів, а по-друге – зниження ймовірності прийняття нерациональних рішень, що призведуть до додаткових витрат при

реалізації проекту. **Завдання:** Підвищення ефективності процесу проведення переговорів щодо організації кооперативного виробництва, за рахунок створення проблемно-орієнтованого методичного базису, а на цій основі - програмних засобів розробки, розгортання і експлуатації відповідної системи підтримки прийняття рішень. **Методи:** системний аналіз та теорія множин, для формального представлення релевантної інформації щодо предметної галузі "Переговори про кооперативне виробництво повітряних суден"; онтологічний інжиніринг, зокрема стандарт IDEF5, а також елементи технології експертних систем для побудови онтологічної системи підтримки прийняття рішень (ОСППР). **Результати:** розроблено комплекс методичних засобів розроблення онтологічних систем підтримки прийняття рішень в ході проведення переговорів про організацію кооперативного виробництва (КВ) повітряних суден (ПС); наведено сценарний приклад організації онтологічного діалогу у середовищі ОСППР щодо визначення моделі ПС як об'єкту КВ. **Висновки:** показана необхідність доповнення математичного забезпечення традиційних систем підтримки переговорів спеціальними методичними засобами для підвищення ефективності інформаційної підтримки процесу переговорів щодо організації кооперативного виробництва в літакобудуванні; обґрунтовано, що для програмної реалізації системи інформаційної підтримки (ПОКВ) доцільне використання онтологічного підходу; запропоновано інтелектуальне ядро онтологічної системи підтримки прийняття рішень щодо процесу ПОКВ) ПС побудувати у формі ієрархії фреймів з організацією виведення на знаннях за допомогою преднатих процедур; наведено сценарний приклад формування рішення щодо вибору моделі ПС для організації КВ у середовищі ОСППР.

Ключові слова: літакобудування; кооперативне виробництво; система підтримки прийняття рішень; онтологічний підхід; фреймова ієрархія; особа, яка приймає рішення

РАЗРАБОТКА ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЦЕССА ПЕРЕГОВОРОВ О КООПЕРАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ В САМОЛЕТОСТРОЕНИИ

Предмет: средства информационной поддержки процесса проведения переговоров по организации кооперационного производства (ПОКП) воздушных судов (ВС). **Цель:** изложение процесса разработки эффективных средств информационной поддержки переговоров о кооперационном производстве, которые обеспечат экономии финансов, во-первых, за счет сокращения сроков переговоров, а во-вторых - снижения вероятности принятия нерациональных решений, которые могут привести к дополнительным затратам при реализации проекта. **Задача:** Повышение эффективности процесса проведения переговоров по организации кооперационного производства, за счет создания проблемно-ориентированного методического базиса, а на этой основе – программных средств разработки, развертывания и эксплуатации соответствующей системы поддержки принятия решений. **Методы:** системный анализ и теория множеств, для формального представления релевантной информации о предметной области "Переговоры о кооперационном производстве воздушных судов"; онтологический инжиниринг, в частности стандарт IDEF5, а также элементы технологии экспертных систем, для построения онтологической системы поддержки принятия решений (ОСППР). **Результаты:** разработан комплекс методических средств синтеза онтологических систем поддержки принятия решений в ходе проведения ПОКП ВС, приведен сценарный пример организации онтологического диалога в среде ОСППР по определению модели ВС как объекта кооперационного производства. **Выводы:** показана необходимость дополнения математического обеспечения традиционных систем поддержки переговоров специальными методическими средствами, для повышения эффективности информационной поддержки процесса переговоров по организации кооперативного производства в самолетостроении; обосновано, что для программной реализации системы информационной поддержки ПОКП целесообразно использование онтологического подхода; предложена архитектура интеллектуального ядра ОСППР по организации процесса ПОКП ВС в форме иерархии фреймов, с организацией вывода на знаниях с помощью присоединенных процедур; приведен сценарный пример формирования решения по выбору модели ВС для организации кооперационного производства в среде ОСППР.

Ключевые слова: самолетостроение; кооперационное производство; система поддержки принятия решений; онтологический подход; фреймовая иерархия; лицо, принимающее решения

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Воробйов Ю. А., Шостак І. В., Кривова С. Г., Зубаньов О. Є. Розробка онтологічної системи інформаційної підтримки процесу переговорів щодо кооперативного виробництва в літакобудуванні. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.005>

Vorobyov, Yu., Shostak, I., Kryvova, S., Zubanyov, A. (2021), "Development of ontological decision making system of the negotiation process on cooperation production in aircraft", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.005>

D. ZOLOTARIOV

MICROSERVICE ARCHITECTURE FOR BUILDING HIGH-AVAILABILITY DISTRIBUTED AUTOMATED COMPUTING SYSTEM IN A CLOUD INFRASTRUCTURE

The article is devoted to the research and development of a highly available distributed automated computing system by iterative algorithms based on the microservice architecture in a cloud infrastructure. The **subject** of the research is the practical foundations of building high-availability automated computing systems based on microservice architecture in a cloud-based distributed infrastructure. The **purpose** of the article is to develop and to substantiate practical recommendations for the formation of the infrastructure of a high-availability automated computing system based on the microservice architecture, the choice of its constituent elements and their components. The **task** of the work: to identify the necessary structural elements of a microservice automated computing system and to analyze the constituent components and functional load for each of them, set specific tasks for building each of them and justify the choice of tools for their creation. In the course of the research, **methods** of system analysis were used to decompose a complex system into elements and each element into functional components, and **tools**: information technologies Apache Kafka, Kafkacat, Wolfram Mathematica, nginx, Lumen, Telegram, Dropbox, and MySQL. As a **result** of the study, it was found that the system infrastructure should consist of: fault-tolerant interservice transport, a high-availability computing microservice, and communication microservices with end customers, which save or process the results. For each of them, recommendations are provided regarding the formation and selection of implementation tools. According to the recommendations, one variant of implementation of such system has been developed, the principles of its operation are shown and the results are presented. It has been proven that when using a Kafka queue it is efficient to publish batches of results rather than one at a time, which results to significant overhead on queue servers and data latency for its clients. Recommendations are given on the implementation of the CI/CD system to build a continuous cycle of adding and improving microservices. Conclusions. Practical foundations have been developed for the implementation of high availability distributed automated computing systems based on microservice architecture in a cloud infrastructure. The flexibility in processing the results of such a system is shown due to the possibility of adding microservices and using third-party analytical applications that support connection to the Kafka queue. The economic benefit of using the described system is shown. Future ways of its improvement are given.

Keywords: high availability; cloud technologies; distributed infrastructure; automated calculations; saving resources and funds; iterative algorithms; Mathematica; Kafka; Telegram.

Introduction

Recent years have been marked by the rapid development of software products built on microservice architecture: web services [1-2], Internet banking [3], data streaming [4-5], Internet of Things (IoT) [6-7] and others. Its advantages include: ease of construction, updating and modification of elements (microservices), ease of addition, removal and replacement due to the independence of operation – as a consequence, much greater flexibility in the development of the system as a whole. In addition, the distribution of infrastructure in such systems is an integral part: the elements are interconnected only through data delivery mechanisms – queue managers or other.

Therefore, it is not surprising that the advantages and prospects of such architecture are appreciated by more and more developers of complex services, and gradually bring its elements to non-profit areas. As shown in [8], the achievements of modern applied science are largely the result of interdisciplinary teams of scientists, researchers and engineers, resulting in the use of each member of the group familiar in its field tools for development, research and analysis that can be combined only through specialized interaction systems for the transfer of results between participants. Also, such systems that allow the exchange of research results in automatic mode in real or near real time, have become relevant in today's environment, when researchers may be distributed around the world or otherwise not be able to be with the team.

The introduction of calculation systems based on microservice architecture in scientific systems aims to give each participant the opportunity to process or generate data with the usual tools and transfer the result to other colleagues through a unified for all researchers' communication mechanism - queue manager. With the use of cloud IaaS-technologies, which allow to approach the construction of infrastructure by renting the technology park for the right time in the right amount and with the right resources, you can achieve maximum efficiency from the cost of deployment and maintenance of such a system.

This work is a logical continuation and extension of the ideas presented for the first time in [8]. This article focuses on the problem of building a system of automated calculations based on microservice architecture for the use of iterative algorithms based on cloud IaaS service, and is designed to use the widest range of both service microservices and end customers through the use of queue manager as a communication channel.

Iterative algorithms are chosen because their feature is the "natural" ability to save the state after each iteration – the results of all previously calculated iterations can be saved and loaded, thus completely restoring the saved state of the program for a certain step of the algorithm. "Window" algorithms, such as those used in [9-12], are best suited for these purposes. Non-iterative algorithms that are able to store their state and the results of intermediate calculations for processing can also be used.

The purpose of this article is to develop and substantiate practical recommendations for the formation of the infrastructure of such a system, the choice of its components and their components. The task is to identify the necessary structural elements and provide for each of them an analysis of the components and functional load, to justify the choice of tools for their construction.

General structure of the system

To build a system of automated calculations by iterative methods for microservice architecture, we identify the problems that need to be solved. These will be, first, the construction of inter-service transport for the transmission of near-real-time messages from one microservice to another. Secondly, launching the calculation program as the sole initiator of calculations and automatic supervision of its correct operation. Third, long-term storage of computational results in a random access system. And, fourth, maintaining backward compatibility with the customer system developed in [8].

To solve the problems we formulate problems in the form of characteristics of elements by directions.

Transport – is a channel of communication between microservices that generate or process data, transmits in real time the results of their work to other microservices, and is fault-tolerant in understanding the construction of a cluster and the failure of one of the servers.

Computing microservice – consists of a computing initiator and a computing server. The first – has secure network access to the second, launches the calculation program itself. The second – provides secure network access for the initiator of calculations, executes this program, instantly notifies of failure in the calculation process, transfers results of calculation of each iteration to interservice transport.

Long-term data storage microservice - accepts the results of calculations of each iteration from the transport, processes them for storage suitability in a relational DBMS and saves.

Microservice, which is responsible for maintaining backward compatibility with the system described in [8], - receives the results of calculations of each iteration from the transport, processes them for storage in separate files in the format of the specified system, saves and sends them to Dropbox.

Also, the system can have many other microservices, which is implied in the architectural approach. These can include both computational results processors and ancillary services: sending notifications to various communication channels, constructing graphical images of the calculation progress, and so on.

The block diagram of the basic implementation of such a system of calculations, which will be considered below, is shown in fig. 1. It should be noted that this is one of its possible implementations: each element of the system, including transport, can be replaced according to specific circumstances.

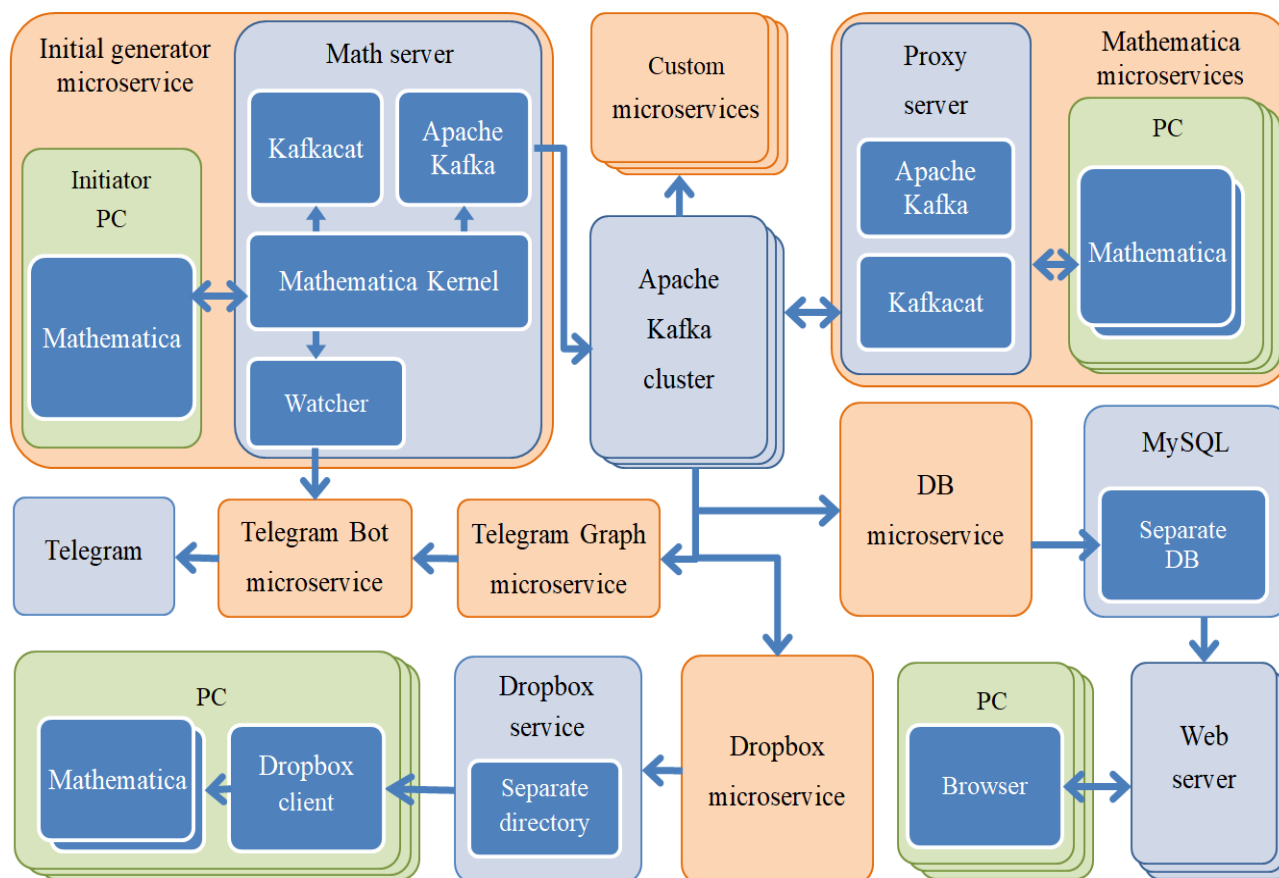


Fig. 1. Decomposition of the system of automated calculations into structural elements

The system consists structurally of Apache Kafka transport and subsequent microservices.

The main complex microservices "Initial generator microservice" is the center of computing, and "Mathematica microservices" are the main clients with mathematical processors.

Auxiliary microservices: "Telegram Bot microservice" is responsible for providing a mechanism for sending messages to the Telegram messenger, "Telegram Graph microservice" is responsible for displaying to Telegram in real time the progress of calculations and the form of text and graphs.

Designed for backward compatibility: "Dropbox microservice" is used to save the results of calculations on a third-party service, Dropbox and "DB microservice" is used to display progress in the web browser of the end customer.

The system also assumes in the future the possibility of connecting to the transport of other arbitrary microservices, which are indicated in fig. 1 as "Custom microservices", in unlimited quantities.

Let's consider each element of the system in more detail.

Transport

In the original work [8], a third-party Dropbox service was used as a transport, which has the main disadvantage of not being controlled by the administrator, and is a "bottleneck" of the whole system – in case of failure, the whole complex fails due to lack of communication. To avoid these shortcomings when using the queue manager, you need to achieve the following goals:

- use only own or leased servers,
- use a distributed server system that minimizes the possibility of their failure at the same time,
- as the software part to choose the most fault-tolerant products that work in real time,
- and those that are available for connection to customers from various fields of research and engineering.

The Apache Kafka real-time content delivery platform meets all these requirements. This is one of the most frequently used [14] and fault-tolerant queue managers, which allows you to build a distributed system of brokers, able to dynamically adapt to the load and, if necessary, easily scale both vertically and horizontally. It has many libraries already built to connect to the queue of different software packages and open mechanisms for developing their applications in different programming languages.

To be able to run smoothly on N servers from the queue cluster, the cluster must include at least $2N + 1$ servers, which is also noted in the Kafka documentation.

It is also worth noting that the use of the queue manager as a delivery mechanism is not the only way to use it. With the correct queuing time, it can also be used for easy and fast operation of the calculation results storage mechanism, which guarantees their delivery to the client even when connected to the queue with a significant delay or even after the publication of data from the source.

And gives the chance, having saved once results of calculation, to process them by various analytical and statistical software complexes, without disturbing the computing microservice or even having excluded it from system.

As a result, the transport configured in this way allows easy duplication of the microservice of calculations in case of failure of the working copy, and guarantees data preservation even in the event of a physical accident on any of the components of the microservice of calculation.

Microservice of calculations

The Wolfram Mathematica mathematical processor [15] was chosen as a tool for building a computational microservice through internal client-server architecture: Mathematica client and WolframKernel kernel - and server platform independence. It is one of the world leaders in the field of symbolic and numerical data processing and is used in almost every field of engineering and science, which is clearly seen, for example, in publications [16-18], where it is used to solve various application technologies.

The generator is a complex system, built by analogy with that in [8], consisting of a computer-initiator of calculations with a client of the mathematical processor Wolfram Mathematica and a calculation server based on the Mathematica kernel. It has network access between them organized through the ssh-channel using asymmetric encryption keys, which ensure the security of command transmission and reception of results from the computing server.

Monitoring the operation of the Mathematica core on the server with instant notification in case of failure is carried out in the same way as in the original work [8], with the addition of using as a notification channel Telegram messenger, which is connected using the microservice "Telegram Bot microservice ».

As shown in [19], the Wolfram Mathematica processor does not have built-in mechanisms to connect to the Kafka queue cluster. This opportunity to work in two directions: publishing messages in the queue and consuming messages from it - provides the use of a package with [19] with the extension [20] for use on a computing server. To run it on the computing server, Apache Kafka is additionally installed as a queue client and third-party Kafkacat software [21].

The following principles are used to construct the interaction of the Mathematica kernel with the Kafka queue manager. A separate queue is created for each calculation, which in its name has all the input parameters for unambiguous identification "calculation - queue". When you restart calculations, if such a queue already exists, it is cleared. This approach allows you to have only one source of truth for the results of calculations. All additional data to be stored with the iteration result is added to the headers fields of the message being written to the queue.

The system intentionally does not use the ability to store calculation results locally in dump files due to the use of the DumpSave function in Mathematica. This is

done to follow the paradigm of the only source of truth, which is the turn of Kafka. Of course, this approach leads to a longer recovery of the program while continuing the interrupted calculation.

The protocol of the calculation program is stored on a hybrid basis. On the computation initiator, it is output to the document and automatically saved with it using the Mathematica NotebookSave function or the NotebookAutoSave document option. On the computing server it is stored locally in separate files without access from external systems, quite similarly [8]. Despite the fact that the microservice does not have a built-in possibility of external use of the work protocol, it can be implemented according to [8] through a specially created application based on bash-scripts or other tools. This will allow it to be duplicated in Dropbox files, in a separate database table or even in a separate queue Kafka - in each case, the advantage will be the formation of a remote independent of the microservice computing copy, which is always stored, and access to it does not load the calculation server.

Microservices based on mathematical processors

For random processing of calculation results, the system may have microservices based on mathematical processors. Which allow flexible processing of results using all available arsenal of built-in analytical and numerous tools, various processing and analysis tools, as well as changing algorithms of such processing at any time. To implement this capability, it is necessary to have an appropriate mechanism for connecting the mapacket to the Kafka queue.

For example, MathWorks MATLAB already has such a module [22] with a rather rich functionality for publishing and consuming messages from the queue.

For the Wolfram Mathematica package, such a package was developed in [20], which allows a group of similar clients to connect to the queue through a single proxy server. For individual connection to the queue without additional implementation of the proxy server, you can use the method described in [19]. But it requires additional software to be installed locally on the client computer.

Such microservices can have a similar [8] functional load, and another depending on the challenges facing researchers at the moment. As noted above, these microservices can appear in the system and be excluded from it if necessary without affecting its other elements.

The disadvantage of such microservices is that access to the analysis results is available only on the computer where they were obtained. To provide access to them to other microservices or end customers, they can publish their results to Kafka queues specially designated for such tasks.

Backward Compatibility Microservices

The source system describes [8] the processing and visualization of the calculation process on client computers in close to real time is implemented in two

ways. First, through a Mathematica-based client that processes files obtained through a third-party Dropbox file service into the computer's local directory. Second, a browser on the end-user device connecting to the web server connects to the database server where the calculation results are stored.

The following two microservices have been added to maintain backward compatibility with the previous system [8].

To display the calculation progress in the client browser, a microservice "DB microservice" has been added to the system, which in real time receives the results of calculating each iteration from the queue, parses them, prepares them for inclusion in the database and stores them in a dedicated database. Web servers are already connected to the latter, which are described in detail in [8], through which end users receive an integrated environment in a mobile or computer browser with display of graphic and text results.

The importance of maintaining this backward compatibility is due to the fact that through the multi-client architecture that is present in any web server, the number of clients connected through the browser is limited only by the power of the server and can be increased if necessary. In addition, the number of web servers connected to a single database is also limited only by the power of the latter. That is, despite the fact that the tool for analyzing results on the web server and in the browser is very limited, this is compensated by the speed of processing requests and the lack of load on the central microservices and the Kafka queue.

The second microservice is designed to preserve the ability of clients to work based on processing files containing the results of each iteration calculation. "Dropbox microservice" in real time receives data from the queue, formats it to write to a file, and saves these files on a third-party Dropbox file service according to the same principles as described in [8].

Maintaining this backward compatibility is important because Dropbox does not limit not only the number of service clients, but also the number of simultaneously running applications on one client, parallel processing the same data in different ways. That is, the same - this microservice and its customers load other microservices and the Kafka queue.

Auxiliary Microservices

The proposed system architecture has two auxiliary microservices.

The first microservice "Telegram Bot microservice" is responsible for providing a mechanism for sending messages to the Telegram messenger and processing feedback from the user. Messages with text or image can be sent through it, and already existing messages can be updated (replaced).

Microservice in the process of work refers to a specially registered bot in Telegram. It is important to note the security side: at the moment, Telegram does not provide for private bots, so privacy is achieved due to the

restriction of message processing only from certain Telegram users.

Unlike all others in the system, this microservice does not work through the Kafka queue, but through REST access using the HTTPS protocol. It is used, among other things, to work as a notification mechanism for starting the Mathematica kernel, closing it, and failing the Initial generator microservice calculation server.

To report real-time calculation progress in the form of graphs and text notifications, the Telegram Graph microservice is used, which is a constantly running set of systemd system services, with an automatic restart in case of failure.

Each service is responsible for monitoring a separate calculation (queue in Kafka): it receives messages from its Kafka queue, processes them, creating notifications about the calculation progress, and sends them to Telegram through the use of the capabilities of the previous microservice. At the first start - saves the identifiers of these Telegram messages, and in future work updates them. This achieves compactness and information for the end user.

The microservice has the following capabilities for operating services: Adds a service to a specific Kafka queue that creates a service description file and adds it to systemd but does not start. Start and stop running a previously added service for a specific Kafka queue. Deletes the service for a specific Kafka queue from the systemd and its description file. Also displays a description of all added services with queue names and the current status obtained by executing the `systemctl status` command.

Other Microservices

The set of microservices is not limited to those described above. Arbitrary consumers can be connected to the Kafka queue, having an integrated queue connection mechanism and the ability to process messages in JSON format.

It is also possible to develop individual-purpose microservices through the use of libraries created by Kafka developers and other users for almost every of the common programming languages [23]: C, PHP, Python, Go, Node.js and others.

Notes on iterative algorithms

Finally, we provide remarks on improving the efficiency of the considered system for iterative algorithms of computational programs.

The proposed system is based on a microservice architecture and allows simultaneous parallel processing in real time of the results of calculating each iteration by a set of distributed clients. With the ability to stop, restart and replace at any time of each client microservice system, including central microservice computing. The latter is possible due to the automatic full recovery of the iterative algorithm of the program after loading from the queue the results of all previously calculated iterations.

In the case of missing or damaged iteration results, the program must take only the results up to the first correct and full inclusive, and discard others. Its implementation will begin so that the allegedly rejected iterations are not yet calculated.

This way of working with iteration results is logging for high availability. This principle is well described by the authors of Apache Kafka: "the process that performs local calculations can be made fault-tolerant by leaving the changes that it makes to its local state so that another process can reload these changes and continue if it fails" [13]. This principle is used in the proposed system to significantly increase its reliability and fault tolerance of calculations.

It should also be borne in mind that in cases of short-term interruption of a network connection, data may be duplicated in the queue due to re-sending by the microservice. To solve this problem, you need to save the results of calculations in a way that relies not on order, but on the unambiguous difference between the results of two arbitrary iterations.

To create a more economical system, you can store the intermediate data of each step of the current iteration (and only its) in a separate queue, designed only to restart the calculations in case of a failure. This allows you to load the results of all the calculated iterations and the results of the intermediate steps of the last iteration from the queue, and fully restore the saved state of the program with accuracy to a certain step of the algorithm.

Demonstration of the work

To demonstrate the operation of the proposed system, cloud technologies were used as a basis for infrastructure construction. Choosing them has the following key benefits: Servers can be quickly deployed and quickly configured to meet the needs of the task. One of the world leaders in cloud technologies DigitalOcean, where servers based on Ubuntu 20.04 LTS x64 OS were located, was chosen as the capacity:

- Kafka queue cluster servers in the amount of 3 pieces based on Apache Kafka 2.6.0,
- computing server with Wolfram Mathematica 11.3.0 for Linux x86 (64-bit), Kafkacat 1.5.0 and Apache Kafka 2.6.0, built according to [8,20] for a computing microservice,
- intermediary server for queuing with Kafkacat 1.5.0 and Apache Kafka 2.6.0, built according to [20] for microservices "Mathematica microservices",
- server based on Lumen 8.x framework and MySQL 8.0.20 Community Server database for DB microservice,
- server based on nginx 1.18.0 web server and Lumen 8.x framework for REST-microservice "Telegram Bot microservice",
- server based on the Lumen 8.x framework for Dropbox microservice and Telegram Graph microservice, the latter using the high-performance Amenadiel \ JpGraph php library, which is responsible for plotting near real time.

The capabilities of the implemented microservice "Telegram Graph microservice" are presented in fig. 2 and

fully comply with the requirements set out above and include the following: "Add" - adding a service for a specific queue Kafka, returns an error if the queue does not exist. "Start" / "Stop" - starts / stops the previously

added service for the specified Kafka queue. "Remove" - removes the service for the specified Kafka queue. "Status" - returns the status of all services.



Fig. 2. Capabilities of microservice "Telegram Graph microservice"

The result of the Status command, which returned a description of the only added service instance to handle messages from the math-list queue that is currently running, is shown at the bottom of figure 2.

The calculation of the Airy momentum propagation [10,12] in a one-dimensional plane-layered medium by the method of approximating functions [9,11] is chosen as a problem. Simulation area: normalized time $t = [0, 100]$ and normalized space $x = [0, 1]$, simulation step $h = 0.01$. The result of solving the problem is the value of the desired function in the nodes of the simulation grid.

The intermediate progress of calculating the task built by the Telegram Graph microservice for the slice at $x = 0.6$ is shown in figure 3 below. The graphs are obtained at arbitrary times and are arranged chronologically as follows: from the top left, from the bottom left, from the right - and are displayed by replacing each other in a single message of the Telegram messenger, which is pointed to the right.

Graphs are built in two types at once and combined on one image for easy reading: red dots for each individual value of the function (grid node), and blue lines for clarity. Fig. 3 (right) shows a complete graphical Telegram message, which includes: a dynamically updated schedule, action buttons with the service (from left to right: start, get current status, stop). The buttons duplicate the same from fig. 2, but are designed for instant action, because they do not require entering the name of the service in contrast to the universal in fig. 2.

At the top of each graph is given the information about the name of the queue from which the data is taken, and the number of points - the values of the function present on the graph. Due to the fact that the microservice is designed to be universal, only the ordinal numbers of the graph points are given on the abscissa axis without using the real coordinates of the modeled area. This can be changed as needed, as the graphics library itself supports scaling of various kinds and relative markers on the coordinate axes.

After testing the system on a complete simulation and obtaining a complete solution for the problem, the experiment was continued in the direction of stress testing. To do this, the Kafka queue cluster was replaced by a single server with 1GB of RAM, a single processor core and an SSD - the minimum available server configuration on DigitalOcean. The Apache Kafka process was allocated RAM of at least 150MB. Using the solution of the initial problem obtained above allowed to send the finished result to the queue as quickly as possible without the cost of calculation. Thus, the testing of the system is artificially achieved at maximum loads on the queue manager and microservices-consumers.

The essence of the experiment is as follows. The initiator of the calculation selects a "window" of simulation, which contains 1000 point values of the desired function in the nodes of the grid, and publishes up to the queue 1000 messages with a single point value. Pauses for 1 minute, shifts the "window" to the next and repeats the operation. This algorithm emulates a real calculation on a high-performance workstation or server, where during one iteration lasting 1 minute, the solution of the problem for 1000 nodes of the simulation grid is obtained. The experiment was repeated 5 times to exclude error with the same result.

On the message generator side, 1000 messages are published almost instantly. On the side of the Telegram Graph microservice and Mathematica microservices, consumption is also almost real. But queuing messages takes a few minutes for every 1000 messages, and the Kafka process CPU load on the queue server is constantly around 17%. Confirmation that the system bottleneck is the queue server is provided by the fact that after full processing of all messages by the queue manager, the above microservices were restarted for the purity of the experiment and showed almost instantaneous retrieval of all values from the queue and their processing.

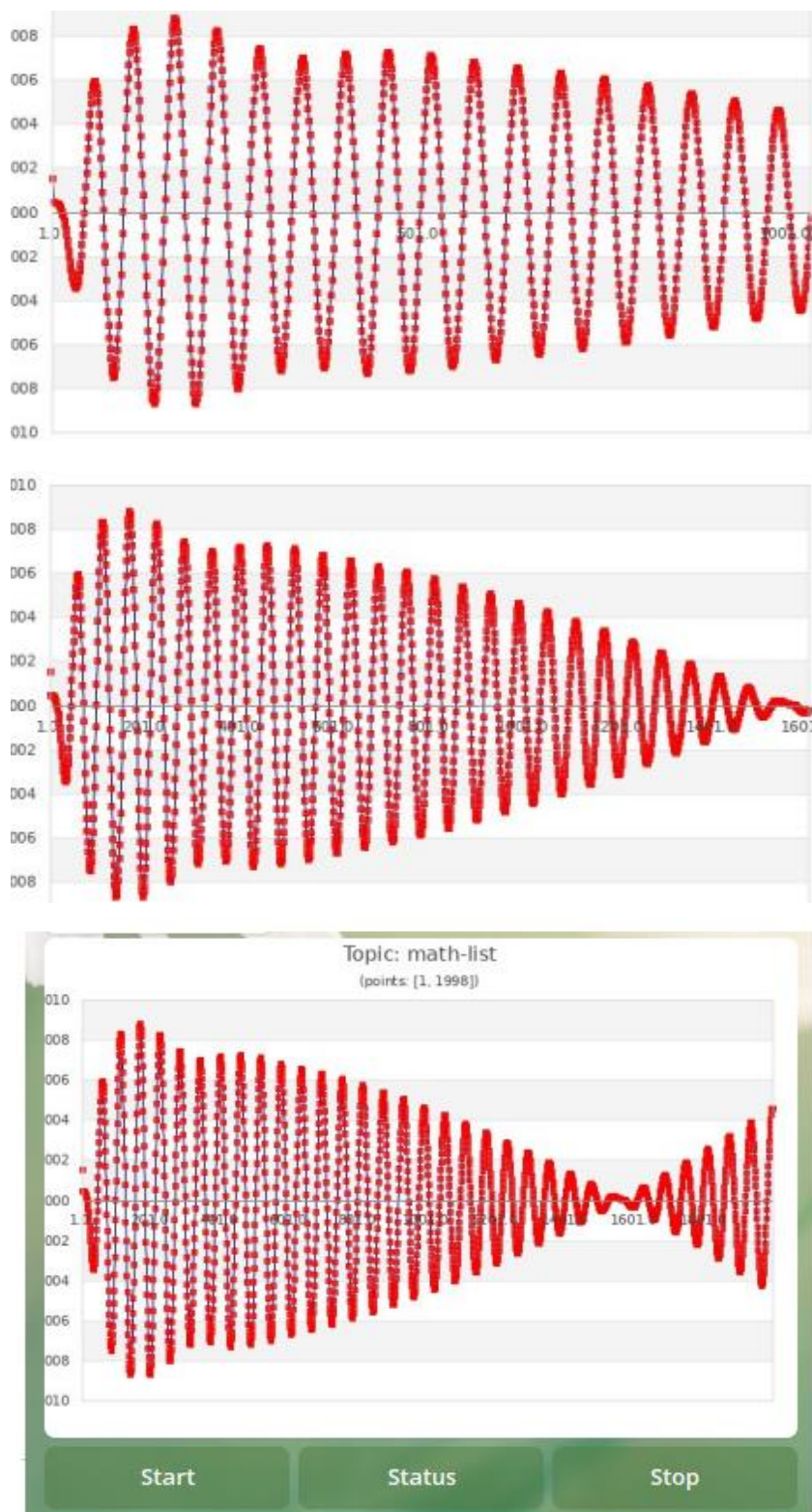


Fig. 3. Display of calculation progress in the form of graphs to Telegram through the microservice "Telegram Graph microservice"

The conclusions from the experiment are as follows. Improving the performance of the computing server will lead to the need to improve the performance of the Kafka cluster in the first place, and only in the second – the notification microservice or clients implemented on the basis of the mathematical package Mathematica. Publishing a large number of small messages is not

effective for the Kafka queue manager, who works in compressed resource conditions.

The next step in the experiment was to change the publishing method to the opposite: the values of the function for one "window" of 200 points with the same pause were completely published once in a row. To create such a data package, you must first convert an array of

values to a JSON object by using the following construct in Mathematica.

```
str = ExportString[arr, "JSON", Compact -> True];
```

On the Mathematica client side of the queue, the inverse transformation takes the form:

```
json = ImportString[str, "JSON"];
```

```
payload = "payload" /. json;
```

```
points_array = ImportString[payload, "JSON"];
```

This approach put a negligible load on the Kafka queue manager on the CPU of the queue server with a peak value of 5-6% for 1-2 seconds. As a result, all customers received data in near real time. The speed of micro-client services and micro-service notifications remained at the same level. To confirm the result, the experiment was also repeated 5 times.

The conclusion from the experiment is as follows. Batch data acquisition and analysis by the above microservices does not lead to significant delays. Unlike a single publication of the results of calculations to the Kafka queue, batch publishing gives an insignificant and inconspicuous load on the servers of the queue and in no way slows down the work of its clients, so this method of publishing in the system can use much cheaper servers.

Prospects for further development of the system

Prospects for further development of the developed system are the following architectural improvements.

Transfer the proxy server from the mechanism of interaction with clients described in [20] to RESTfull interaction according to the HTTPS protocol. A similar mechanism has already been developed in [24-25], although at the moment none of them has built-in capabilities for queuing - only publishing or receiving messages.

Microservice architecture allows easy dynamic addition and change of its elements, often situational - for a specific task of analysis or data processing, followed by removal of the service from the system. Therefore, it is important to anticipate that the proposed system will dynamically add new elements and improve existing ones. To facilitate this process, it is promising to build a specially designed CI / CD system that will meet modern requirements for the creation, testing and implementation of software and infrastructure components.

Conclusions

The ideas developed in [8] on the formation of a system of flexibly interconnected elements were further developed in the work. Developed and substantiated practical bases for the implementation of a system of distributed automated calculations of high availability by iterative algorithms based on microservice architecture in the cloud infrastructure.

One of the possible options for such a system is implemented, consisting of: Apache Kafka distributed

content delivery platform as high-reliability interservice transport, calculation microservice based on the core of the Mathematica math package, microservices for processing calculation results, including based on this matpack, microservice of visual notification of the calculation progress to the Telegram messenger, REST microservice of interaction with Telegram bot, and microservices of saving results to the database and Dropbox.

The backward compatibility with the elements of the original system [8] is preserved for easier replacement of the latter with the developed one.

It is explained that the proposed system has the greatest advantages when using iterative algorithms to build a calculation program that allows it to be interrupted at any step and continue from the last completed iteration, and with the described additional state savings - and the last interrupted iteration step.

The approaches described in the article to the formation of the system have increased the reliability of saving the results of calculation through the use of a failover queuing cluster and their duplication in Dropbox microservices and databases. Analyze and process data by various means and on different servers or computers with the ability to connect to the queue, provide user-friendly remote monitoring of computing progress and response to computing microservice failures through any smartphone or tablet.

It has been proven that publishing a large number of small messages is not effective for the Kafka queue manager operating under compressed resource conditions and leads to significant resource overruns of queue servers and data delays for queue clients. It is shown that batch publishing is much more profitable due to the fact that it gives an insignificant load on queue servers, does not slow down the work of its clients and provides the possibility of using less powerful, that is cheaper, queue servers.

It is shown that using the developed version of the proposed system, increasing the performance of the computing server will lead to the need to increase the performance of the Kafka cluster earlier than microservices clients.

The flexibility of the proposed system is due to the possibility of dynamically adding and eliminating situationally necessary microservices at an arbitrary moment of time without impeding the operation of the entire system and its individual elements. Prospects of development of this peculiarity are shown through implementation of CI/CD system for continuous improvement of microservices.

The economic benefit of using the described system is achieved through maximum automation, which leads to improved quality of work of researchers. Also due to the reduction of computer costs of employees - each of them has the opportunity to conduct research on the results of calculations on available and convenient for him equipment, if it has access to the queue. Due to the use of cloud technologies, the cost of ownership of the system infrastructure and the cost of its modification are the lowest.

References

- Lichtenthäler, R., Prechtel, M., Schwille, C. et al (2020), "Requirements for a model-driven cloud-native migration of monolithic web-based applications", *SICS Softw.-Inensiv. Cyber-Phys. Syst.*, Vol. 35, P. 89–100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00450-019-00414-9>
- Fernández-García, A. J., Iribarne, L., Corral, A. et al. (2019), "A microservice-based architecture for enhancing the user experience in cross-device distributed mashup UIs with multiple forms of interaction", *Univ Access Inf Soc*, Vol. 18, P. 747–770. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10209-017-0606-0>
- Bucchiarone, A., Dragoni, N., Dustdar, S., Larsen, S. T., Mazzara, M. (2018), "From Monolithic to Microservices: An Experience Report from the Banking Domain", *IEEE Software*, Vol. 35, No. 3, P. 50–55, DOI: 10.1109/MS.2018.2141026.
- Alaasam, A. B., Radchenko, G., Tchernykh, A. et al. (2020), "Analytic Study of Containerizing Stateful Stream Processing as Microservice to Support Digital Twins in Fog Computing", *Program Comput Soft*, Vol. 46, P. 511–525. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0361768820080083>
- Kim, Y. K., Kim, Y., Jeong, C. S. (2018), "RIDE: real-time massive image processing platform on distributed environment", *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, Vol. 2018, No. 39. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0279-5>
- Santana, C., Andrade, L., Delicato, F.C. et al. (2020), "Increasing the availability of IoT applications with reactive microservice", *SOCA*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11761-020-00308-8>
- Razzaq, A. A (2020), "Systematic Review on Software Architectures for IoT Systems and Future Direction to the Adoption of Microservices Architecture", *SN COMPUT. SCI*, Vol. 1, Article 350. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00359-w>
- Zolotariov, D. (2020), "The distributed system of automated computing based on cloud infrastructure", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 47–55. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.047>
- Zolotariov D., Nerukh A. (2011), "Extension of the approximation functions method for 2d nonlinear Volterra integral equations", *Applied Radio Electronics*, Vol. 10, No. 1, P. 39–44.
- Nerukh, A. G., Zolotariov, D. A., Nerukh, D. A. (2012), "Properties of decelerating non-diffractive electromagnetic Airy pulses", *Applied Radio Electronics*, Vol. 11, No. 1, P. 77–81.
- Nerukh, A., Zolotariov, D., Benson T. (2015), "The approximating functions method for nonlinear Volterra integral equations", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 47, P. 2565–2575. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11082-015-0141-2>
- Nerukh, A., Zolotariov, D., Kuryzheva, O., Benson T. (2016), "Dynamics of decelerating pulses at a dielectric layer", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 48, No. 89. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11082-016-0386-4>
- Apache Kafka (2021), "Apache Kafka", available at: <https://kafka.apache.org/documentation/> (last accessed 10 January 2021).
- GitHub (2021), "Ultimate Comparison", available at: <https://ultimate-comparisons.github.io/ultimate-message-broker-comparison/> (last accessed 10 January 2021)
- Wolfram (2021), "Wolfram Mathematica: Modern technical calculations", available at: <https://www.wolfram.com/mathematica/> (last accessed 10 January 2021).
- You, X., Chen, D. R. (2018), "A new sequence convergent to Euler–Mascheroni constant", *Journal of Inequalities and Applications*, Vol. 2018, Article 75. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13660-018-1670-6>
- Ghorbani, M. A., Singh, V. P., Sivakumar, B. et al. (2017), "Probability distribution functions for unit hydrographs with optimization using genetic algorithm", *Applied Water Science*, Vol. 7, P. 663–676. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0278-y>
- Rehman, S., Idrees, M., Shah, R. A. et al. (2019), "Suction/injection effects on an unsteady MHD Casson thin film flow with slip and uniform thickness over a stretching sheet along variable flow properties", *Boundary Value Problems*, Vol. 2019, No. 26. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13661-019-1133-0>
- Zolotariov, D. (2021), "The mechanism for creation of event-driven applications based on Wolfram Mathematica and Apache Kafka", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.053>
- Zolotariov, D. (2021), "The platform for creation of event-driven applications based on Wolfram Mathematica and Apache Kafka", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (16), P. 12–18. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.16.012>
- GitHub (2021), "edenhill/kafkacat: Generic command line non-JVM Apache Kafka producer and consumer", available at: <https://github.com/edenhill/kafkacat> (last accessed 10 January 2021).
- GitHub (2021), "mathworks-ref-arch/matlab-apache-kafka: MATLAB Interface for Apache Kafka", available at: <https://github.com/mathworks-ref-arch/matlab-apache-kafka> (last accessed 10 January 2021).
- Apache Software Foundation (2021), "Clients - Apache Kafka", available at: <https://cwiki.apache.org/confluence/display/KAFKA/Clients> (last accessed 5 January 2021).
- GitHub (2021), "dspeterson/dory: Producer daemon for Apache Kafka", available at: <https://github.com/dspeterson/dory> (last accessed 10 January 2021).
- Confluent Documentation (2021), "Confluent REST APIs", available at: <https://docs.confluent.io/platform/current/kafka-rest/index.html> (last accessed 10 January 2021).

Received 23.07.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Золотарьов Денис Олексійович – кандидат фізико-математичних наук, Харків, Україна; email: denis@zolotariov.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4907-7810>.

Золотарёв Денис Алексеевич – кандидат физико-математических наук, Харьков, Украина.

Zolotariov Denis – PhD (Physics and Mathematics Sciences), Kharkiv, Ukraine.

МІКРОСЕРВІСНА АРХІТЕКТУРА ПОБУДОВИ РОЗПОДІЛЕНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ ОБЧИСЛЕНЬ ВИСОКОЇ ДОСТУПНОСТІ У ХМАРНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

Стаття присвячена дослідженню та розробці розподіленої системи автоматизованих обчислень високої доступності ітеративними алгоритмами на базі мікросервісної архітектури у хмарній інфраструктурі. **Предметом** дослідження є практичні засади побудови систем автоматизованих розрахунків високої доступності, що засновані на мікросервісній архітектурі у розподіленій інфраструктурі на базі хмарних технологій. **Метою** статті є розробка та обґрунтування практичних рекомендацій щодо формування інфраструктури системи автоматизованих обчислень високої доступності на базі мікросервісної архітектури, вибору її складових елементів та їх компонентів. **Завдання** роботи: виявити необхідні структурні елементи мікросервісної системи автоматизованих обчислень та надати для кожного з них аналіз складових компонентів та функціонального навантаження, поставити конкретні задачі для побудови кожного із них та обґрунтувати вибір інструментів для їх вирішення. У ході дослідження використано **методи** системного аналізу для декомпозиції складної системи на елементи та кожного елемента на функціональні компоненти, та засоби: інформаційні технології Apache Kafka, Kafkacat, Wolfram Mathematica, nginx, Lumen, Telegram, Dropbox, MySQL. У **результаті** дослідження встановлено, що інфраструктура системи має складатися з: відмовостійкого міжсервісного транспорту, мікросервісу обчислень високої доступності, та мікросервісів зв'язку із кінцевими клієнтами, що зберігають або обробляють результати. Для кожного з них надані рекомендації щодо формування та вибору інструментарію для побудови. За отриманими рекомендаціями розроблений один із варіантів такої системи, показані принципи її роботи та наведені результати. Доведено, що при використанні черги Kafka ефективною є публікація пакетів результатів, а не по одному, що призводить до значних перевитрат ресурсів серверів черги та затримкам даних для її клієнтів. Дані рекомендації щодо впровадження системи CI/CD для побудови безперервного циклу додавання та вдосконалення мікросервісів. **Висновки.** Розроблені практичні основи для реалізації систем розподілених автоматизованих обчислень високої доступності на базі мікросервісної архітектури у хмарній інфраструктурі. Показана гнучкість у обробці результатів такої системи через можливість доповнення її мікросервісами та використання сторонніх аналітичних додатків, що підтримують завантаження даних із черги Kafka. Показана економічна вигода від використання описаної системи. Наведені майбутні шляхи її вдосконалення.

Ключові слова: висока доступність; хмарні технології; розподілена інфраструктура; автоматизовані обчислення; економія ресурсів та коштів; ітеративні алгоритми; Mathematica; Kafka; Telegram.

МИКРОСЕРВИСНАЯ АРХИТЕКТУРА ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ВИСОКОЇ ДОСТУПНОСТИ В ОБЛАЧНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ

Статья посвящена исследованию и разработке распределенной системы автоматизированных вычислений высокой доступности итерационными алгоритмами на базе микросервисной архитектуры в облачной инфраструктуре. **Предметом** исследования являются практические основы построения систем автоматизированных вычислений высокой доступности, основанных на микросервисной архитектуре в распределенной инфраструктуре на базе облачных технологий. **Целью** статьи является разработка и обоснование практических рекомендаций к формированию инфраструктуры системы автоматизированных вычислений высокой доступности на базе микросервисной архитектуры, выбору ее составных элементов и их компонентов. **Задача** работы: выявить необходимые структурные элементы микросервисной системы автоматизированных вычислений и провести для каждого из них анализ составляющих компонентов и функциональной нагрузки, поставить конкретные задачи для построения каждого из них и обосновать выбор инструментов для их решения. В ходе исследования использованы **методы** системного анализа для декомпозиции сложной системы на элементы и каждого элемента на функциональные компоненты, и средства: информационные технологии Apache Kafka, Kafkacat, Wolfram Mathematica, nginx, Lumen, Telegram, Dropbox, MySQL. В **результате** исследования установлено, что инфраструктура системы должна состоять из: отказоустойчивого межсервисного транспорта, микросервиса вычислений высокой доступности, и микросервисов связи с конечными клиентами, которые сохраняют или обрабатывают результаты. Для каждого из них предоставлены рекомендации относительно формирования и выбора инструментов реализации. Согласно полученным рекомендациям разработан один из вариантов реализации такой системы, показаны принципы его работы и приведены результаты. Доказано, что при использовании очереди Kafka эффективной является публикация пакетов результатов, а не по одному, что приводит к значительному перерасходу ресурсов серверов очереди и задержкам данных для ее клиентов. Даны рекомендации относительно внедрения системы CI/CD для построения непрерывного цикла добавления и совершенствования микросервисов. **Выводы.** Разработаны практические основы для реализации систем распределенных автоматизированных вычислений высокой доступности на базе микросервисной архитектуры в облачной инфраструктуре. Показана гибкость в обработке результатов такой системой благодаря возможности дополнения ее микросервисами и использования сторонних аналитических приложений, которые поддерживают загрузку данных из очереди Kafka. Показана экономическая выгода от использования описанной системы. Приведены будущие пути ее усовершенствования.

Ключевые слова: высокая доступность; облачные технологии; распределенная инфраструктура; автоматизированные вычисления; экономия ресурсов и денег; итерационные алгоритмы; Mathematica; Kafka; Telegram.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Золотарьов Д. О. Мікросервісна архітектура побудови розподілених автоматизованих обчислень високої доступності у хмарній інфраструктурі. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.013>

Zolotariov, D. (2021), "Microservice architecture for building high-availability distributed automated computing system in a cloud infrastructure", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 13–22. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.013>

YE. MELESHKO, M. YAKYMENKO, V. BOSKO

A METHOD OF COMPUTER SIMULATION MODELING OF USER AND BOT BEHAVIOR IN A RECOMMENDATION SYSTEM USING THE GRAPH DATABASE NEO4J

The **subject** matter of the article is the process of computer simulation modeling of complex networks. The **goal** is to develop a method of computer simulation modeling of ordinary user and bot behavior in a recommendation system based on the theory of complex networks to test the accuracy and robustness of various algorithms for generating recommendations. The tasks to be solved are: to develop a computer simulation model of user and bot behavior in a recommendation system with the ability to generate datasets for testing recommendation generation algorithms. The **methods** used are: graph theory, theory of complex networks, statistics theory, probability theory, methods of object-oriented programming and methods of working with graph databases. **Results.** A method of computer simulation modeling of users and objects in a recommender system was proposed, which consists of generating the structure of the social graph of a recommender system and simulating user and bot behavior in it. A series of experiments to test the performance of the developed computer simulation model was carried out. During the experiments, working and testing datasets were generated. Based on the working datasets, the preferences of users by the method of collaborative filtering were predicted. Based on testing datasets, the accuracy of prediction predictions was checked. The results of the experiments showed that the jitter of the investigated values of the Precision, Recall and RMSE of prediction predictions in most practical cases confidently fits within the allowable fluctuation limits, and therefore the users' behavior in computer simulation model was not random and it real users' behavior with certain preferences was simulated. This confirms the reliability of the developed computer simulation model of a recommendation system. **Conclusions.** A method of computer simulation modeling of user and bot behavior in a recommendation system, which allows generating datasets for testing the algorithms for generating recommendations, was proposed. The developed method makes it possible to simulate the behavior of both ordinary users and bots, which makes it possible to create datasets for testing the robustness of recommender systems to information attacks, as well as for testing the effectiveness of methods for detecting and neutralizing botnets. The structure of relations between users and objects of the recommender system was modeled using the theory of complex networks. Information attacks of bots were modeled on the basis of known models of profile-injection attacks on recommender systems.

Keywords: recommendation systems; computer modeling; simulation modeling; complex networks; social networks; social graph; bot network; profile-injection attacks; websites; databases.

Introduction

To conduct research in the field of recommendation systems, it is necessary to have a set of data on the actions of users and objects of a system to create and test the quality of recommendation lists. Such data sets can be obtained in the following ways: 1) have access to a database of a real web resource or application; 2) use one of the existing open datasets; 3) create an application for automatic collection of open data from web resources; 4) create a software model of the recommendation system to generate data about its users and objects.

The easiest way to do this is to use an open data set. At the same time, the most complete information for creating and testing the quality of recommendation lists is available to administrators and website owners. They also have the ability to track users' reactions to generated recommendations in real time. But the vast majority of researchers do not have access to such data. In this case, if the information from open datasets is insufficient, there are two ways - parsing open data from websites or create a software simulation model of the recommendation system based on known information about a system (website or application).

The collection of open data from web resources can be done in two ways - either using API-functions [1, 2], or by developing and using the own web crawler [2, 3]. API functions are easy to use, but not all sites provide the opportunity to gather the necessary information thanks to API functions - such functions may be completely absent

or have truncated functionality and a number of restrictions and conditions for use. Also, the interface of API functions changes from time to time, and their new versions may contain fewer features [4].

By using your own web crawler, you can collect any publicly available information from the website. But writing a web crawler is a much more difficult task, you need to understand the html-layout of someone else's website, develop your own functions for collecting data from html-code, make changes or completely rewrite the web crawler every time on the website html-layout changes. Also, large websites block automatic data collection if you notice it. One of the promising ways to parsing websites is to use the library to automate the actions of the web browser and its testing Selenium (for Java, C #, Ruby, Python, Javascript) [5]. This library creates time delays between its actions typical of human behavior, which bypasses the protection of websites from automatic data collection, but it also makes its work rather slow and unsuitable for collecting large amounts of data.

The use of open datasets, as well as the collection of data using API-functions or web-crawler from websites do not allow to study the reaction of users to the proposed recommendations and the impact of botnets.

When developing methods to increase the resilience of the recommendation system to information attacks, there is a problem of lack of open data sets to test the quality of their work. There is no bot profile information in the available datasets. Also, such information cannot be collected by parsing open data from websites. And even

system administrators who have access to all the information and can record data on bot attacks are not able to collect such data when it is necessary to test certain algorithms in the right quantity and quality in a given period of time. Therefore, there is a need to create a software simulation model of users and objects of the recommendation system to generate data sets that will also contain bot profiles.

Based on the research conducted in this paper, it was decided to create a software simulation model of user and bot behavior in such systems for the analysis of recommendation systems.

A referral system is a network of connections between users and web resource objects. It can be considered as a kind of social graph. A social graph is a graph whose nodes are social objects (for example, users, user communities, content objects, etc.) and whose edges are social connections between them. It is convenient to present the data of the recommendation system in the form of a graph, where users and objects are the vertices of the graph, and user actions (views, evaluations, etc.) and results of the recommendation system (recommendations, similarities, etc.) are edges.

A review of publications on various methods of modeling social graphs and networks was conducted.

There are several approaches to modeling social networks and social graphs, in particular, the following are most often used [6-20]: models of random graphs [6-11], game-theoretic models [7, 11-14], models of complex networks [7, 15-20] and so on.

It was decided to use the theory of complex (complex) networks to model the relationships between users and objects of the recommendation system, because it allows, compared to other approaches, to model more properties of social graphs [7, 15-25]. A study of the properties of complex networks and methods of their modeling was conducted. Complex networks are stochastic networks with non-trivial topology, in particular, they differ from classical stochastic networks by the presence of a small number of nodes with a large number of connections (such vertices are called hubs) [7, 15-20].

The components of networks that reflect social connections have the following main properties, which are indicated in the studied works by approximately the same list [15-24]: scalelessness, distribution of degrees of nodes (number of connections in nodes) by power distribution, small network diameter, high clustering coefficient and high transitivity coefficient, giant connected component (more than 80% of nodes are interconnected), hierarchical connections are present, complex cluster formations are present (clicks, clans, etc.), assortativity (occurrence connections between vertices that are somewhat similar to each other).

The main known models of generation of stochastic and complex networks: Barabasi-Albert model [15, 16, 24, 26], Erdős-Renyi model [24, 26, 27], Bollobas-Riordan model [26, 28, 29].

The aim of this work is to build a software simulation model of user and bot behavior in the recommendation system of a social network or content-

oriented website based on the theory of complex networks and using the Neo4j graph database to study and test methods of creating lists of recommendations.

The proposed method of software simulation of users and objects of the recommendation system consists of two parts:

- Generation of the structure of the social graph of the recommendation system, which has already been proposed in [30].
- And the simulation of the behavior of users and bots of the recommendation system, which will be considered in this paper.

The main material

In this paper, a software simulation model of the behavior of users of the recommendation system was created to test the methods of generating lists of recommendations, in particular, in order to determine and compare the accuracy and stability of different methods.

To model the structure of relations in the social graph of the recommendation system, it was decided to take as a basis, but modify taking into account the specifics of the problem, the principles on which the Barabashi-Albert model is based (namely, "growth" and "desirable accession"). easy to implement and allows you to create a stochastic graph with the properties of social networks. The structure of the social graph was modeled using the graph database Neo4j [31] and the Python programming language. The stages of the proposed method of generating the structure of the social graph of the recommendation system are considered in [30]. The developed model of the social graph of the recommendation network was tested to check the similarity of the properties of the structure of its connections to the structure of real social graphs. The average values of the parameters generated in the proposed software simulation model of social graphs of the recommendation system, which were calculated using Gephi: the average degree of nodes: 5.7, network diameter: 4.0, graph density: 0.22, average clustering factor: 0.61, average path length: 1.98, which corresponds to the parameters of real social networks.

The next step was to model the behavior of users and bots of the recommendation system. It was decided to develop the model in such a way as to obtain a data set similar to MovieLens datasets [32] in structure and statistical properties.

Stages of the proposed method of software simulation of ordinary users and bots in the recommendation system:

Stage 1. Initialize system parameters, including the choice of the number of users and objects, the number of possible properties in them, the percentage of active users, the percentage of popular objects, the number of time iterations after which the model will complete its work, and so on. If it is necessary to simulate an information attack, the type of attack, the number of bots and the number of attack targets are selected. A set of possible properties for system elements implemented in the model

by hidden factors is created, and element cluster templates are generated based on these properties.

Stage 2. Creating a "Grain" of the social graph of the recommendation system - the initial number of users and objects is added to the graph, some number of objects are evaluated. Initial number of users, initial number of objects, and graph density are customizable parameters. Each new user and system object is assigned an offset value, a specific cluster, and a corresponding vector of hidden factor values, which determines the degree to which it belongs to each of the possible properties for the system elements. Estimates in the system are set based on the degree of coincidence of the hidden factors of the user and the object, as well as indicators of their displacements. The probability of viewing an object inside the Grain depends on the specified density of the graph. The probability of rating the viewed object for authentic users depends on the hidden factors of the user (determining his preferences), hidden factors of the object (determining its properties), user offset (which indicates a characteristic systemic understatement of the user or overestimation of estimates), the displacement of the object (which indicates the quality of the object, which always causes the receipt of estimates higher / lower than similar properties of objects), as well as random displacement (which occurs with a probability of 0-3 % and is a customizable parameter). In "Grain" bot profiles are absent; they begin to join the network at the 3rd stage.

Stage 3. Each time iteration of the model, a certain number of users and objects are added to the graph. This number is determined randomly and lies in the range from 0 to N, where N is less than the total number of system elements of the corresponding type. Also, at each iteration of the model time, a number of pairs of users and objects are selected for evaluation. The probability of viewing an object can be determined based on the principle of "desired connection" (1) from the Barabashi-Albert model or its modifications, for example (2):

$$P_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}, \quad (1)$$

$$P_i = \frac{q_{1i} + q_{2i} + q_{3i}}{\sum_j (q_{1j} + q_{2j} + q_{3j})}, \quad (2)$$

where q_{1i} – the number of views in the i -th object, q_{2i} – the number of estimates in the i -th object, q_{3i} – the number of comments in the i -th object.

The probability of rating a viewed object for authentic users depends on hidden user factors, hidden object factors, user offset, object offset, and random offset. The probability of viewing an object and rating it for bots is determined by the attack model used to create them.

Stage 4. Stopping the simulation model, saving the generated data set to a file for further use in methods of forming and testing lists of recommendations.

The software simulation model consists of the following elements: "System user model", "System object

model" and "Information process model in the recommendation system".

The system user model has the following parameters:

- Id - user identification number containing a digit;
- Active - takes True - if the user is active (puts more ratings than others) and False – if the activity level is normal;
- Bot - takes True – if the user is a bot (profile is involved in an attack on the referral system) and False - otherwise;
- Type - takes the value "Normal", if the user is not a bot, otherwise it contains the name of the attack applied to the re-recommendation system;
- Character - contains the type of character of the user in relation to the style of grading: "Normal", "Often gives good grades", "Gives only good grades";
- Registration time – contains the time of user registration in the system;
- Time of last activity – contains the time of the last activity of the user;
- Activity stop time - the time when the user stopped using the system;
- Hidden factors - a list of random variables that take values from -1 to 1, length K, which simulates the influence of certain characteristics of the object on the user's judgment about it;
- User offset - a random variable in the range from -1.0 to 1.0, which simulates the user's tendency to underestimate or overestimate the values of objects;
- Time of last preference change - used when necessary to simulate changes in user preferences over time, contains the time of the last overwrite of the list of hidden user factors.

The system object model has the following parameters:

- Id - identification number of the object, containing a digit;
- Popular - takes True - if the object is popular (gets more ratings than others) and False - if the popularity level is normal;
- Type for bots - takes the value "Target" - if the bots need to change the rating of the object in a certain direction and False - otherwise;
- Attack type - takes the value "None" if the object is not targeted, or indicates the type of attack "To decrease the rating", "To increase the rating";
- Add time - contains the time to add the object to the database of the recommendation system;
- Hidden factors - a list of random variables that take values from -1 to 1, length K, which simulates the expression of certain characteristics in the object, which affect the level of interest in the user;
- Object offset - a random variable in the range from -1.0 to 1.0, which simulates the overall quality of the object, which affects user ratings and leads to more low ratings due to low quality or more often high scores due to high quality. project.

The parameters of users and system objects are set during the creation and initialization of the corresponding instances of objects, and some of them may change during the operation of the program.

The model of information processes in the system has the following parameters:

- Rating matrix – contains a matrix of adjacency of the graph, in which the vertices are users and objects, and the evaluation edges are set by users to objects.

- Time matrix – contains a matrix of adjacency of the graph, in which the vertices are users and objects, and the edges are the time of evaluation of user-supplied objects.

- Set of possible estimates – contains a set of estimates that users can expose to objects, in the developed model the set of estimates is represented by the following list [0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0], which means the ability to rate in the form of the number of stars, a maximum of 5 stars, you can choose half a star.

- User list - contains a list of system users, instances of the User class.

- Object list – contains a list of system objects, instances of the Object class.

- Start time of the model – contains time in Unix time stamp format.

- Current model run time – contains the time in Unix time stamp format, which indicates the time of the last action in the system.

- List of bots – contains a list of bots in the developed model.

- Target list – contains a list of bot attack targets in the developed model.

- Number of clusters - contains a specified number of clusters, which can be divided into elements of the system based on data about their hidden factors.

- Cluster templates – contains a list of templates for modeling hidden factors of users / objects. In total, 19 random templates were created in the model to generate elements that may belong to 19 different clusters. Also in the model you can choose the option of modeling a certain percentage of elements that do not belong to the generated clusters.

The following functions were implemented to model the behavior of users and objects and information processes of the recommendation system:

- Model launch – starts the process of modeling users and objects of the recommendation system.

- Save model data to a file – saves all data and parameters of the developed software simulation model of users, objects and processes of the recommendation system to a file.

- Generating system elements – creating a given number of users and system objects and assigning them parameters.

- Generation of elements of clusters of elements – allows to generate templates of the hidden factors of elements for creation in the subsequent set of the elements relating to certain clusters.

- Generation of hidden factors of elements on the basis of cluster templates – at the input receives a cluster template, at the output provides a list of hidden factors that randomly differ from the data in the template, so as not to go beyond the cluster, but have their own unique values of factors.

- Generation of hidden factors of elements outside of clusters - generation of the list of hidden factors of an element randomly without use of templates.

- Grain generation of a social graph – creates an initial social graph of the recommendation system based on a given initial number of users, objects and graph density.

- Iterative model construction – allows you to simulate the change of time.

- One iteration of the model – within this function are called all the functions that implement the behavior of users and the work of the recommendation system at the current time.

- Generation of the current operating time of the model - the generation of the time interval between two events in the system – a random variable that lies in a given range.

- Adding a user to the system – modeling the process of user registration in the recommendation system, the user gets the time of registration and the opportunity to view objects and give them ratings.

- Adding an object to the system – modeling the process of adding an object to the database of the recommendation system, the object gets the time of adding to the database and the ability to receive views and ratings.

- Determining the probability of viewing an object – based on the principle of "Preferred connection" is determined by the probability of viewing a particular object by a particular user.

- Determining the probability of occurrence of the assessment - based on the principle of "Desired accession" is determined by the probability of assessment of a particular object by a particular user.

- Generation of an estimate based on the hidden factors of the respective object and user. The score for a user-object pair is determined by the following formulas:

$$d_{u,m} = \frac{\sum_{i=0}^n |f_{u,i} - f_{m,i}|}{n}, \quad (3)$$

$$r_{u,m} = \Psi(5d_{u,m} + b_u + b_m), \quad (4)$$

where $d_{u,m}$ – the distance between user u and object m in the multidimensional space of hidden factors, can take values from 0 to 1; n – the number of hidden factors in the system; $f_{u,i}$ – i -th hidden user u factor; $f_{m,i}$ – the i -th hidden factor of the object m ; b_u – user offset in object evaluation (content level); b_m – object offset in obtaining assessments (content quality level); $\Psi()$ – a function that converts the resulting fractional number into a discrete number from a set of estimates [0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0], for example, if the number is in the range from (4.000 - k) to (4.500 - k), where k is a small number (in the model was taken $k = 0.05$), it is converted to a score of 4.0.

- The decision to make an assessment and its adjustment. After the user "viewed" the object, and based

on hidden factors, it was determined which rating for the object corresponds to his preferences, this function is used, which determines the fact that the user will decide to put the viewed object evaluation. Also in this function, a slight adjustment of the assessment based on random factors is possible. With the help of this function, the probability of occurrence of estimates can be approximated to the frequencies of occurrence of estimates in the data set MovieLens datasets.

The model also developed bot rating generators for different types of attacks. Three known models of attacks on the recommendation system by injection of profiles [33-37] were used to generate bot estimates: random, medium and popular attacks.

- Random attack estimate generation – creates estimates for bot object pairs, where the bot randomly attacks the referral network. Generating a score for a random attack to increase the rating is as follows:

$$r_{u,m} = \begin{cases} \text{randomPattern}(), & \text{if an object is "random"} \\ 5.0, & \text{if an object is "target"} \end{cases}, \quad (5)$$

where $\text{randomPattern}()$ is a function that generates random estimates with given values of the probability of occurrence.

- Estimation for average attack – creates estimates for bot object pairs, where the bot performs an average attack on the referral network. The generation of the score for the average attack on the rating upgrade is as follows:

$$r_{u,m} = \begin{cases} \text{average Pattern}(), & \text{if an object is "random"} \\ 5.0, & \text{if an object is "target"} \end{cases}, \quad (6)$$

where $\text{average Pattern}()$ is a function that generates an average estimate for a randomly selected object.

- Generate a rating for a popular attack – creates ratings for bot object pairs, where the bot performs a popular attack on the referral network. The rating for a popular rating upgrade attack is generated as follows:

$$r_{u,m} = \begin{cases} \text{popular Pattern}(), & \text{if an object is "random"} \\ 5.0, & \text{if an object is "target"} \end{cases}, \quad (7)$$

where $\text{popular Pattern}()$ – function that generates for a randomly selected object from a set of popular objects its average rating.

- Determining the probability of changing preferences - used when necessary to simulate changes in preferences of system users over time, determines the probability that at the current time the specified user will change their preferences, if the time is known when he last changed preferences.

- Change user preferences – replaces the hidden factors of the specified user.

Therefore, based on the proposed method of modeling the structure of the links between the elements and the behavior of users of the recommendation system of the content-oriented website, a software simulation model of the recommendation system was developed.

The software simulation model of user and bot behavior in the recommendation system was developed in the Python programming language using the principles of object-oriented programming. All data of the software simulation model were written to the graph database Neo4j, and also at the end of work of model were stored in a file of own format.

The Neo4j database has the following structural elements that allow you to build a social graph:

- node - node of the graph, the number of nodes is limited to 235, ie ~ 34 billion.

- node label - node label, labels can be used to filter data.

- relation - an edge, a connection between two nodes. The number of edges is also limited to 235.

- relation identifier – connection type (edges), maximum number of connection types 32767.

- properties - properties of nodes and edges, allow to add information fields to them.

- node ID - a unique node identifier, analogous to the key field in relational databases.

The advantages of the Neo4j database are a flexible data model, real-time analysis, easy data retrieval and filtering capabilities, scalability and reliability, the presence of a visual interface, as well as the existence of the Neo4j Aura application for use as a cloud service.

Thus, the Neo4j database provides all the necessary tools to create a software simulation model of the social graph, which can be further used to model and study the behavior of users and bots in referral systems.

The social graph of the recommendation system in the software simulation model had the following format: vertices - users and objects, edges – connections such as "rated", "like", "recommended", etc. Both vertices and edges contain sets of parameters that correspond to the available information about them. For example, the "rated" edge contains the evaluation value and timestamp, and the user type vertex contains all the data fields that correspond to the parameters of the user model in the system.

A series of experiments was performed to verify the operability of the developed software simulation model. Many datasets were generated during the experiments. Each data set was divided into a working and a test sample. Based on the test sample, the accuracy of prediction of preferences was checked. The results of the experiments showed that the jitter of the studied values of accuracy, completeness and RMSE prediction of preferences in most practical cases confidently fits into the allowable limits of fluctuations, and therefore user behavior in the software model was not random, but simulated the behavior of real users with certain preferences. This confirms the reliability of the developed software simulation model of the recommendation system.

The results of the experiments are shown in fig. 1-3. During the experiments, the values of the following

indicators were calculated: $P_{prec}^{(i)}$ – precision prediction of

preferences, $P_{rec}^{(i)}$ – recall completeness and RMSE preference recognition error.

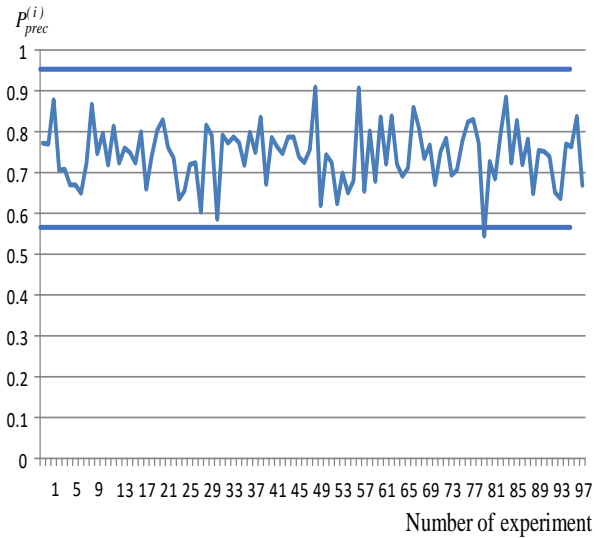


Fig. 1. Graph of changes in random characteristics of the frequency of correct prediction of preferences $P_{prec}^{(i)}$

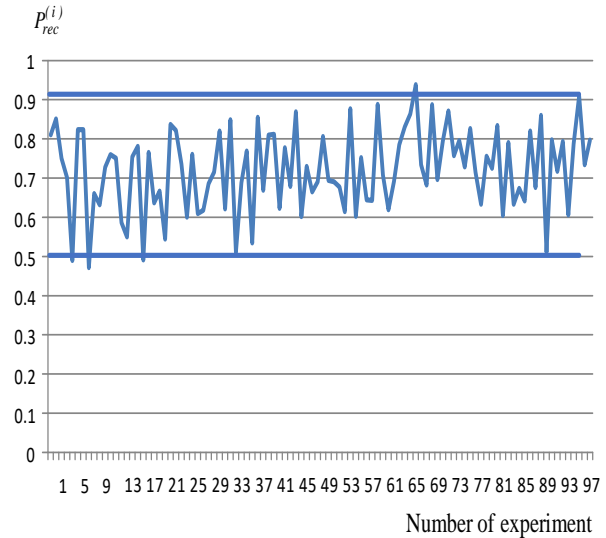


Fig. 2. Graph of changes in random characteristics of the frequency of correct prediction of preferences $P_{rec}^{(i)}$

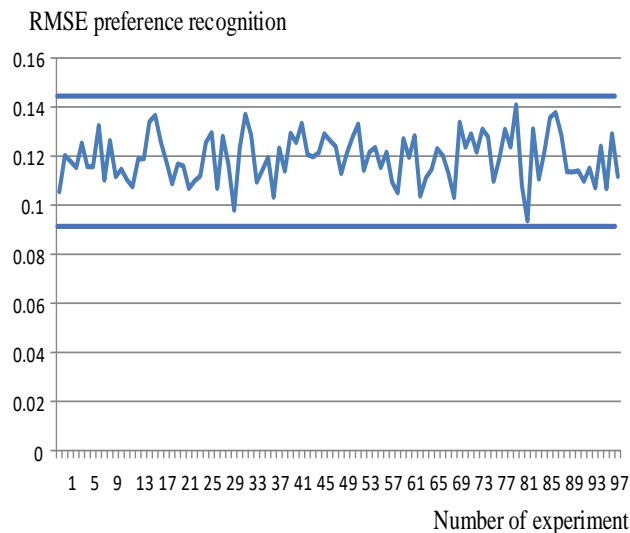


Fig. 3. Graph of changes in random frequency characteristics of RMSE preference recognition

Fig. 1-3 shows graphs of changes in random frequency characteristics $P_{prec}^{(i)}$, $P_{rec}^{(i)}$ and RMSE preference recognition, respectively. Also, these figures show the allowable limits of oscillation of these random variables, obtained as a result of the simulation.

As can be seen from the figures, jitter studied the random characteristics $P_{prec}^{(i)}$, $P_{rec}^{(i)}$ and RMSE preference recognition in most practical cases confidently fits within acceptable limits. This confirms the reliability of the developed software simulation model of the recommendation system.

Conclusions

This paper proposes a method of software simulation of users and objects of the recommendation system for a

social network or for a content-oriented website, which allows you to generate data sets for testing algorithms for generating recommendations. The developed method allows modeling the behavior of both regular users and bots, which makes it possible to create data sets to test the resilience of recommendation systems to information attacks, as well as the effectiveness of methods for detecting and neutralizing botnets. The structure of relationships between users and objects of the recommendation system was modeled using the theory of complex networks. Information attacks of bots were modeled on the basis of known models of attacks by injection of profiles on recommendation systems.

Further research in this area may be aimed at building software simulations of social graphs based on the theory of complex networks and using the graph database Neo4j to study not only the recommendation systems of social networks and content-oriented websites,

but also other applications and processes. occurring in social media, in particular, the processes of dissemination of information and information influences, applications with reputational systems, etc.

References

1. Segaran, T. (2011), *Programming Collective Intelligence*, Translated from English, Saint Petersburg : Symbol-Plus, 368 p.
2. Hogan, B. (2012), "Analysis of social networks on the Internet", PostNauka website about modern fundamental science and scientists, available at : <https://postnauka.ru/longreads/20259>
3. Meleshko, Ye. V., Okhotnyi, S. M., Bosko, V. V. (2019), "Development of software for collecting and analyzing data from social networks", *Collection of abstracts of the IX International scientific-practical conference "Integrated quality assurance of technological processes and systems"*, Vol. 2, Chernihiv, May 14-16, 2019, Chernihiv : ChNTU, P. 225–226.
4. Meleshko, Ye. V., Semenov, S. H., Khokh, V. D. (2018), "Research of methods of construction of recommendation systems on the Internet", *Collection of scientific works "Control, navigation and communication systems"*, Issue 1 (47), Poltava : PNTU, P. 131–136.
5. "The Selenium Browser Automation Project" (2021), available at : <https://www.selenium.dev/documentation/>
6. Kumar, R., Raghavan, P., Rajagopalan, S., Sivakumar, D., Tomkins, A., Upfal, E. (2000), "Stochastic models for the web graph", *Proceedings of the 41st Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS '00)*. IEEE Computer Society, Redondo Beach, CA, USA, P. 57–65. DOI: <https://doi.org/10.1109/SFCS.2000.892065>
7. Traag, V. A. (2014), "Algorithms and Dynamical Models for Communities and Reputation in Social Networks", *Springer International Publishing*, P. 229. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06391-1>
8. Li, Q. L. (2016), "Nonlinear Markov processes in big networks", *Special Matrices*, Vol. 4 (1), P. 202–217.
9. Rajgorodskij, A. M. (2012), "Mathematical models of the Internet", *Jornal "Kvant"*, No. 4, P. 12–16, available at : https://elementy.ru/nauchno-populyarnaya_biblioteka/431792
10. Rajgorodskij, A. M. (2010), "Random graph models and their applications", *Proceedings Moscow Institute of Physics and Technology*, Vol. 2, No. 4, P. 130–140.
11. Suslova, V. A., Gorodov, A. A. (2015), "Methods for modeling social networks", *Reshetnev readings*, No. 2 (19), P. 133–134, available at : <http://cyberleninka.ru/article/n/metody-modelirovaniya-sotsialnyh-setey>
12. Gubanov, D. A., Novikov, D. A., Chhartishvili, A. G. (2009), "Influence models on social networks", *Management of big systems*, No. 27, P. 205–281, available at : <http://cyberleninka.ru/article/n/modeli-vliyaniya-v-sotsialnyh-setyah>
13. Gubanov, D. A., Novikov, D. A., Chhartishvili, A. G. (2010), *Social networks: models of information influence, control and confrontation*, Physics and Mathematics Literature Publishing House, 228 p.
14. Melikov, S., Musatov, D., Savvateev, A. (2013), "Social networks' modeling", available at : https://kpfu.ru/docs/F117464271/MMS_socnet_cities.pdf
15. Barabási, A.-L. (2018), *Network science*, Cambridge University Press, 475 p., available at : <http://networksciencebook.com/>
16. Albert, R., Barabási, A.-L. (2002), "Statistical mechanics of complex networks", *Reviews of Modern Physics*, Vol. 74, P. 47–97. DOI: 10.1103/RevModPhys.74.47
17. Evin, I. A. (2010), "Introduction to the theory of complex networks", *Computer Research and Modeling*, Vol. 2, No. 2, P. 121–141.
18. Lande, D. V., Snarskij, A. A., Bezsudnov, I. V. (2009), *Internetics: Navigation in complex networks: models and algorithms*, Moscow : Librokom (Editorial URSS), 264 p., available at : <http://dwl.kiev.ua/art/internetica/>
19. Pasichnyk, V. V., Ivanushchak, N. M. (2010), "Research and modeling of complex networks", *Eastern European Journal of Advanced Technology*, Vol. 2, No. 3 (44), P. 43–48.
20. Snarskij, A. A., Lande, D. V. (2015), *Modeling complex networks: a tutorial*, Kyiv : Engineering, 212 p., available at : <http://dwl.kiev.ua/art/mss/>
21. Barabási, L.-A., Albert, R., Jeong, H. (2000), "Scale-free characteristics of random networks: the topology of the world-wide web", *Physica*, A281, P. 69–77.
22. Haidai, B., Artiukh, R., Malyeyeva, O. (2018), "Analysis and modelling the preferences of social networks users", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (3), P. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.3.005>
23. Watts, D. J., Strogatz, S. H. (1998), "Collective dynamics of "small-world" networks", *Nature*, Vol. 393 (6684), P. 440–442, available at : <https://www.nature.com/articles/30918>
24. Gusarova, N. F. (2016), *Analysis of social networks. Basic concepts and metrics*, Saint Petersburg : ITMO University, 67 p.
25. Barabási, A.-L., Albert, R. (1999), "Emergence of scaling in random networks", *Science*, Vol. 286, No. 5439, P. 509–512. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
26. Bernovskij, M. M., Kuzjurin, N. N. (2012), "Random graphs, models and generators of scaleless graphs", *Proceedings of the Institute for System Programming of the Russian Academy of Sciences*, Vol. 22, P. 419–432, available at : <https://cyberleninka.ru/article/n/sluchaynye-grafy-modeli-i-generatory-bezmasshtabnyh-grafov>
27. Erdős, P., Rényi, A. (1960), "On the evolution of random graphs", *Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, Vol. 5, P. 17–61.
28. Bollobás, B., Borgs, C., Chayes, T., Riordan, O. M. (2003), "Directed scale-free graphs", *Proceeding SODA '03 Proceedings of the fourteenth annual ACM-SIAM symposium on Discrete algorithms*, P. 132–139.
29. Bollobás, B., Riordan, O. (2003), "Mathematical results on scale-free random graphs", *Handbook of graphs and networks*, Weinheim : Wiley-VCH, P. 1–34.

30. Meleshko, Ye. (2019), "Computer model of virtual social network with recommendation system", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 2 (8), P. 80–85. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2019.8.080>
31. "Neo4j Documentation" (2021), Official website of the graph database Neo4j, available at : <https://neo4j.com/docs/>
32. Harper, F. M., Konstan, J. A. (2015), "The MovieLens Datasets: History and Context", *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems (TiiS)*, 19 p. DOI: <https://doi.org/10.1145/2827872>
33. Chirita, P. A., Nejdl, W., Zamfir, C. (2005), "Preventing shilling attacks in online recommender systems", *In Proceedings of the ACM Workshop on Web Information and Data Management*, P. 67–74.
34. Gunes, I., Kaleli, C., Bilge, A., Polat, H. (2014), "Shilling attacks against recommender systems: a comprehensive survey", *Artificial Intelligence Review*, Vol. 42, P. 767–799. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-012-9364-9>
35. Mobasher, B., Burke, R., Bhaumik, R., Williams, C. (2007), "Toward trustworthy recommender systems: An analysis of attack models and algorithm robustness", *ACM Transactions on Internet Technology*, Vol. 7 (4), P. 41. DOI: <https://doi.org/10.1145/1278366.1278372>
36. O'Mahony, M. P., Hurley, N. J., Silvestre, G. C. M. (2002), "Promoting recommendations: An attack on collaborative filtering" *DEXA, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2453, P. 494–503.
37. Ricci, F., Rokach, L., Shapira, B., Kantor, P. B. (Editors) (2011), *Recommender Systems Handbook*, Boston : Springer, 842 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3>

Received 18.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мелешко Єлизавета Владиславівна – доктор технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Кропивницький, Україна; email: elismelshko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8791-0063>.

Мелешко Єлизавета Владиславівна – доктор технических наук, доцент, Центральноукраинский национальный технический университет, доцент кафедры кибербезопасности и программного обеспечения, Кропивницкий, Украина.

Meleshko Yelyzaveta – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Software, Kropyvnytskyi, Ukraine.

Якименко Микола Сергійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, завідувач кафедри вищої математики та фізики, Кропивницький, Україна; email: m.yakymenko@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3290-6088>.

Якименко Николай Сергеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, Центральноукраинский национальный технический университет, заведующий кафедрой высшей математики и физики, Кропивницкий, Украина.

Yakymenko Mykola – PhD (Physical and Mathematical Sciences), Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University, Head of the Department of Higher Mathematics and Physics, Kropyvnytskyi, Ukraine.

Босько Віктор Васильович – кандидат технічних наук, доцент, Центральноукраїнський національний технічний університет, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Кропивницький, Україна; email: victorvv2@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4933-9676>.

Босько Виктор Васильевич – кандидат технических наук, доцент, Центральноукраинский национальный технический университет, доцент кафедры кибербезопасности и программного обеспечения, Кропивницкий, Украина.

Bosko Viktor – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Central Ukrainian National Technical University, Associate Professor of the Department of Cybersecurity and Software, Kropyvnytskyi, Ukraine.

МЕТОД ПРОГРАМНОГО ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ КОРИСТУВАЧІВ ТА БОТІВ У РЕКОМЕНДАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ З ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФОВОЇ БАЗИ ДАНИХ NEO4J

Об'єктом дослідження є процес програмного імітаційного моделювання складних мереж. **Метою** даної роботи є розробка методу програмного імітаційного моделювання поведінки звичайних користувачів та ботів у рекомендаційній системі на основі теорії складних мереж для можливості тестування точності та стійкості різних алгоритмів формування рекомендацій. **Задача:** розробити програмну імітаційну модель поведінки користувачів та ботів у рекомендаційній системі з можливістю генерації наборів даних для тестування алгоритмів формування рекомендацій. **Методи дослідження:** теорія графів, теорія складних мереж, теорія статистики, теорія ймовірностей, методи об'єктно-орієнтованого програмування та методи роботи з графовими базами даних. **Результати.** Запропоновано метод програмного імітаційного моделювання користувачів та об'єктів рекомендаційної системи, що складається з генерації структури соціального графу рекомендаційної системи та симуляції поведінки користувачів і ботів у ній. Було проведено серію експериментів для перевірки працездатності розробленої програмної імітаційної моделі. У ході експериментів було згенеровано множину робочих та тестових наборів даних. На основі робочої вибірки здійснювалося прогнозування вподобань користувачів методом колаборативної фільтрації. На основі тестової вибірки перевірялася точність прогнозування вподобань. Результати проведених експериментів показали, що джиттер досліджуваних значень точності, повноти та RMSE прогнозування вподобань у більшості практичних випадків впевнено вкладається в допустимі межі коливань, а отже поведінка користувачів у програмній моделі не була

випадковою, а імітувала поведінку реальних користувачів з певними вподобаннями. Це підтверджує достовірність розробленої програмної імітаційної моделі рекомендаційної системи. **Висновки.** Запропоновано метод програмного імітаційного моделювання користувачів у рекомендаційній системі, що дозволяє генерувати набори даних для тестування алгоритмів формування рекомендацій. Розроблений метод дозволяє моделювати поведінку як звичайних користувачів, так і ботів, що дає можливість створювати набори даних для тестування стійкості рекомендаційних систем до інформаційних атак, а також для тестування ефективності методів виявлення та нейтралізації бот-мереж. Структура зв'язків між користувачами та об'єктами рекомендаційної системи моделювалася за допомогою теорії складних мереж. Інформаційні атаки ботів моделювалися на основі відомих моделей атак ін'єкцією профілів на рекомендаційні системи.

Ключові слова: рекомендаційні системи; програмне моделювання; імітаційне моделювання; складні мережі; соціальні мережі; соціальний граф; мережа ботів; атаки ін'єкцією профілів; веб-сайти; бази даних.

МЕТОД ПРОГРАМНОГО ІМИТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДЕННЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ І БОТОВ В РЕКОМЕНДАЦІЙНІЙ СИСТЕМІ С ІСПОЛЬЗОВАННЯМ ГРАФОВОЇ БАЗИ ДАНИХ NEO4J

Объектом исследования является процесс программного имитационного моделирования сложных сетей. **Целью** данной работы является разработка метода программного имитационного моделирования поведения обычных пользователей и ботов в рекомендательной системе на основе теории сложных сетей для возможности тестирования точности и стойкости различных алгоритмов формирования рекомендаций. **Задача:** разработать программную имитационную модель поведения пользователей и ботов в рекомендательной системе с возможностью генерации наборов данных для тестирования алгоритмов формирования рекомендаций. **Методы** исследования: теория графов, теория сложных сетей, теория статистики, теория вероятностей, методы объектно-ориентированного программирования и методы работы с графовыми базами данных. **Результаты.** Предложен метод программного имитационного моделирования пользователей и объектов рекомендательной системы, состоящей из генерации структуры социального графа рекомендательной системы и симуляции поведения пользователей и ботов в ней. Была проведена серия экспериментов для проверки работоспособности разработанной программной имитационной модели. В ходе экспериментов было сгенерировано множество рабочих и тестовых наборов данных. На основе рабочей выборки осуществлялось прогнозирование предпочтений пользователей методом коллаборативной фильтрации. На основе тестовой выборки проверялась точность прогнозирования предпочтений. Результаты проведенных экспериментов показали, что джиттер исследуемых значений точности, полноты и RMSE прогнозирования предпочтений в большинстве практических случаев уверенно укладывается в допустимые пределы колебаний, а следовательно поведение пользователей в программной модели не было случайным, а имитировало поведение реальных пользователей с определенными предпочтениями. Это подтверждает достоверность разработанной программной имитационной модели рекомендательной системы. **Выводы.** Предложен метод программного имитационного моделирования пользователей в рекомендательной системе, позволяющий генерировать наборы данных для тестирования алгоритмов формирования рекомендаций. Разработанный метод позволяет моделировать поведение как обычных пользователей, так и ботов, что дает возможность создавать наборы данных для тестирования стойкости рекомендательных систем к информационным атакам, а также для тестирования эффективности методов выявления и нейтрализации бот-сетей. Структура связей между пользователями и объектами рекомендательной системы моделировалась с помощью теории сложных сетей. Информационные атаки ботов моделировались на основе известных моделей атак инъекцией профилей на рекомендательные системы.

Ключевые слова: рекомендательные системы; программное моделирование; имитационное моделирование; сложные сети; социальные сети; социальный граф; сеть ботов; атаки инъекцией профилей; веб-сайты; базы данных.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Мелешко С. В., Якименко М. С., Босько В. В. Метод програмного імітаційного моделювання поведінки користувачів та ботів у рекомендаційній системі з використанням графової бази даних NEO4J. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.023>

Meleshko, Ye., Yakymenko, M., Bosko, V. (2021), "A method of computer simulation modeling of user and bot behavior in a recommendation system using the graph database NEO4J", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 23–31. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.023>

M. NOVOZHYLOVA, V. KRAMARENKO, O. CHUB

MODELING OF INFORMATION TECHNOLOGY OF MATERIAL RESOURCES MANAGEMENT OF A CONSTRUCTION COMPANY

The article's research **subject** is the information technology of construction company's material resources management. The work's **purpose** is to construct and implement tools for modeling construction company's material resources management information technology. The article solves the following **tasks**: determining the place of information technology of construction company's material resources management in the modern construction company's information ecosystem, defining the main components, and building a functional model of construction company's material resources management information technology, taking into account the shortcomings of existing models, creation of the multicriteria optimization model of the considered information technology. The following **methods** are used: system analysis, structural analysis, mathematical modeling of complex systems and processes, multicriteria optimization. The following results were obtained: a structural analysis of the existing information ecosystem at the regional level construction company, the composition of which is agreed on the organizational structure elements of the enterprise and the stages of the construction life cycle; considered the functions of construction company's material resources management which are realized at various stages of a construction project life cycle; constructed the set-theoretical model of material resources management information technology; determined the functional characteristics of the considered information technology, offered the criteria of information technology efficiency according to the ITIL strategy; constructed the conceptual model of information technology of material resources management. **Conclusions**: for the first time, developed tools for modeling construction company's material resources management information technology, including a theoretical-multiple model of material resources management information technology; Offered the information technology's conceptual scheme which realizes specific information technology's functional characteristics. The built modeling strategy will provide an opportunity for further development and software implementation of the information technology.

Keywords: information flows; construction enterprise; functional model; efficiency criteria.

Introduction (Statement of the problem)

In the modern world, information becomes an asset that significantly affects the efficiency of doing business in a competitive environment. This is especially true for companies and enterprises that define customer-oriented as a business philosophy and to which construction enterprises belong. Any large company has a significant amount of information that needs to be processed to understand the current state of the company and make a management decision. In the construction company, information processing is complicated by the duration of construction and the presence of a number of construction projects that are carried out simultaneously and are at different stages of their life cycle.

The transformation of construction enterprises into digital companies is actively supported by the state in the context of the course on computerization of all spheres of public life and the transition to online formats.

In 2021, the procedure for maintaining a Unified State Electronic System in the field of construction was updated [1]. The Cabinet of Ministers of Ukraine approved the Concept of Implementation of Construction Information Modeling Technologies (VIM-Technologies) in Ukraine developed by the Ministry of Community Development and Territory of Ukraine, as well as the action plan for its implementation [2]. Thus, the base for the introduction of general information reporting in electronic formats is prepared.

These and other elements of the general information ecosystem of the construction enterprise as new forms of the organization of production are factors of innovative development of the company.

An important and currently little-studied subject area in the general problem of digitalization of construction

companies is the construction and optimization of information technology for automated management of various material resources throughout the product life cycle of the construction project.

Analysis of recent research and publications

An overview of scientific publications in the field of information management is given in [3]. This study summarizes the evolution of knowledge about organizational processes, technologies and tools for creating, integrating, disseminating access organization storage and information security in automated systems. Analysis of the potential application of automation tools at different stages of the construction project was carried out in [4].

In [5] technology is defined as a set of scientific and engineering knowledge embodied in the methods and means of labor, sets of material factors of production, types of their combination to create a particular product or service.

Using the approach [6], information technology at the organizational level is defined as the resources needed to collect, process, store and disseminate information.

The general state and prospects of information technology implementation, as well as the main obstacles to their implementation are considered in [7]. In general, in the information technology market, there are many enterprise management systems that provide increased speed in the information processing process, improve the quality of information for management and help in project planning.

The structure of information technology for controlling the cost of resources, which takes into account the imperfection of information in the description of

objects and processes of the subject area, was defined in [8].

Functional-modular approach to building a conceptual model of information technology as such, proposed in [9]. The main tasks of information analysis are considered, in particular the tasks of evaluating results, clustering activities by areas and forecasting development prospects on the example of scientific activity.

The technique of object-oriented analysis for modeling information on design and construction is implemented in [10]. This approach is used to model information in terms of the fundamental ideas that underlie object-oriented technology, ie types and classes of objects, methods, queries, encapsulation and inheritance.

The general principles of building an artificial intelligence system project for a company's business processes using the so-called "business-artificial intelligence" alignment model are considered in [11]. The importance of a common understanding of the project between all members of the project team, both from business departments and from the IT department, is emphasized.

The development of the architectural field of construction is BIM-technology (Building Information Model) is a new approach to digital information management in the construction industry, which allows you to virtually reproduce the object, increase safety and reliability of buildings and structures, control the quality and speed of construction, significantly reduce probability of errors in projects, reduce construction costs and optimize costs during operation. [12] proposes an approach to using BIM as a tool of lean technology, which allows you to make the right decisions at different stages of construction. Therefore, integration with BIM is necessary for modern information technology in the field of construction.

Despite the benefits of BIM, data compatibility is a barrier to its adoption. To solve this problem, [13] presents the BIM Interoperability Adoption Model (BIAM) as a link between organizational, semantic, legal and technical factors to determine compatibility issues in the early stages of BIM implementation.

The development of management technologies in the construction industry is a matrix information technology for linking 1C software and Microsoft Project into a single information processing system for managing construction companies and projects – NadProject [14]. This technology is designed to assist the construction project manager in developing plans, allocating resources, tracking progress and analyzing workloads, and integrating this information with the enterprise information system. Despite the benefits of BIM, data compatibility is a barrier to its adoption. To solve this problem, [13] presents the BIM Interoperability Adoption Model (BIAM) as a link between organizational, semantic, legal and technical factors to determine compatibility issues in the early stages of BIM implementation.

The development of management technologies in the construction industry is a matrix information technology for linking 1C software and Microsoft Project into a single information processing system for managing construction companies and projects – NadProject [14]. This technology is designed to assist the construction project manager in developing plans, allocating resources, tracking progress and analyzing workloads, and integrating this information with the enterprise information system.

Selection of previously unsolved parts of the overall problem. The purpose of the work

Despite the constant development of models, methods and information systems for resource management, in particular in the construction industry, the existing systems lack the functionality to collect, store and process information about changes in the external environment of construction projects [15].

There is also no possibility to support decision-making in conditions of uncertainty, which in turn negatively affects the effectiveness of operational resource management and profitability of projects.

Moreover, in order to make more sound management decisions in the field of resource management in construction, the relevant processes, tools and methods of material resource management of construction projects should be allocated as a separate field of knowledge, as proposed in [16].

Another unresolved problem is to take into account the wide territorial distribution of construction sites, along with the need to obtain relevant information in different locations and in a single control center, ie the creation of principles of cloud technology as a basis for information technology management of construction resources.

This issue is especially relevant for solving the problem of automation of information flow management of a large construction company at the regional level. The main technical and economic characteristics of such an enterprise are as follows: simultaneous implementation of ± 10 projects at different stages of the life cycle, 1000-2000 employees, builds simultaneously in different areas of the city and is engaged in different types of construction. These are such companies as Zhitlobud-2 (<https://zhilstroj-2.ua>), Zhitlobud-1 (<https://gs1.com.ua/>), Avantazh: (<https://avantazh.ua/>), Stroy- City (<https://stroycity.com.ua/uk>).

The purpose of the work - the construction and implementation of tools for modeling information technology management of material resources of the construction company under the conditions of using existing approaches to company resource management and software architecture.

Materials and Methods

All divisions and zones of activity of the construction enterprise according to its organizational structure are subject to automation (fig. 1).

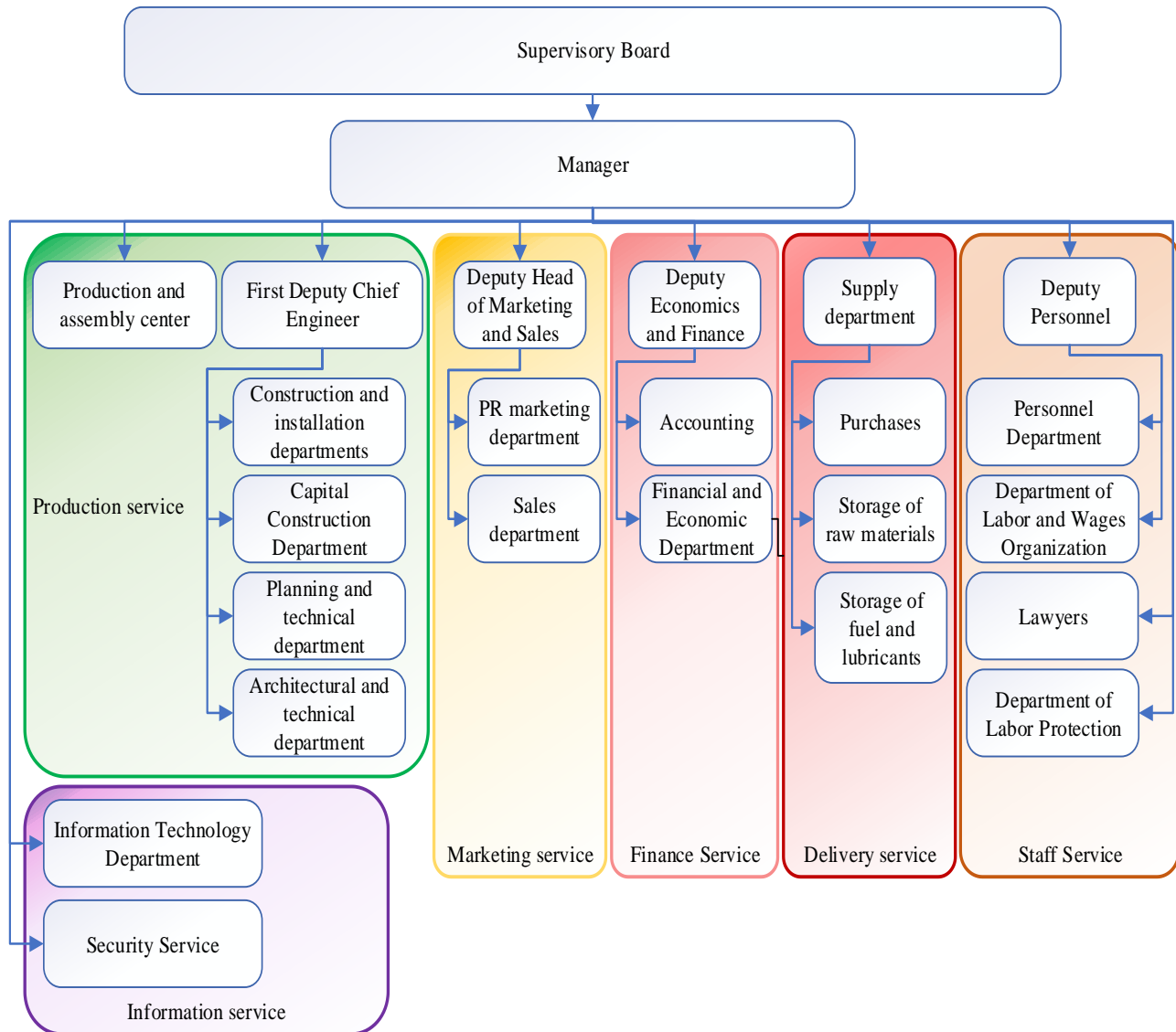


Fig. 1. Organizational structure of a typical construction enterprise

The analysis of the current state of the process of information ecosystem formation at the construction enterprise of a certain - regional - level showed that today each service of the enterprise uses many software applications of different architecture and orientation according to the subject area of operation.

In the subject area of the production service, the use of BIM-server of BIMcloud [17] allows simultaneous processing of the project by a team of designers, which allows you to see a holistic picture of the project and avoid conflicts when designing compatible components of ventilation and electricity. The team work can be attended by a construction worker as a direct contractor who receives current design data in real time.

Estimation by the finance service is carried out with the help of the product Construction Technologies: Estimate 8 (<https://smeta.ua/>). The wage module in 1C calculates the wages that must be paid based on the work performed by the employee or the number of changes worked. Thanks to the placement of the 1C system in the cloud, employees of the enterprise according to the level of access, can view or edit current accounting data, control

the balance of resources and place orders with other departments.

The M.E.DOC program (<https://medoc.ua/>) is used to submit official reports to the controlling bodies in electronic form. To control, analyze and simplify the sale of apartments, the marketing service uses the CRM system AMO-CRM (<https://www.amocrm.com.ua/>).

The personnel service and security service have an automatic face recognition system CaMaP from Kobi software [18], which stores in the database information about each person who passed to the object and the access control system (ACS). These systems generate reports on the time a person is at the facility. The video surveillance system covers the entire territory of the construction site at the same time. The function of recording on electronic media is implemented.

The supply service also uses the 1C information system. Automated scales are installed at the exit from the territory of the production and assembly center, the system records the date, time and weight of each machine when passing through them, this data is stored on the server. If it is a company car, the driver has a consignment note with a

QR code, he scans it and the system adds to the electronic consignment note in 1C indicators from the scales and saves a photo of the car from the camera at the entrance. The system of sensors on concrete units exports the actual data on the amount of materials used for the manufacture of concrete, and stores in the system 1C. The 1C system of the enterprise saves production reports for change and calculates the prime cost of the made products. Users record the movement of materials and therefore see the real balances in warehouses.

With the help of the transport control system from Moniterra (<http://moniterra.com.ua/>) the dispatcher controls the real location of the transport, in addition, the functions of automatic collection and transmission of data on the distance traveled and the amount of fuel consumed in the 1C system are implemented.

Zhytlobud-2's immediate plans include the integration of BIM360 [19] and Navisworks [20] architectural technologies for Revit, which make it possible to simulate the planned appearance of the building in accordance with the materials used. Therefore, one of the important tasks in the design, development and implementation of information technology must take into account the level of the information structure created at the enterprise.

In general, the use of information technology in a typical construction company can be submitted at the stages of the life cycle of housing construction: pre-investment, pre-project, design, construction, operation. On the other hand, these information technologies can also be arranged according to the subject areas of design, which are represented by the relevant services of the enterprise (fig. 2).

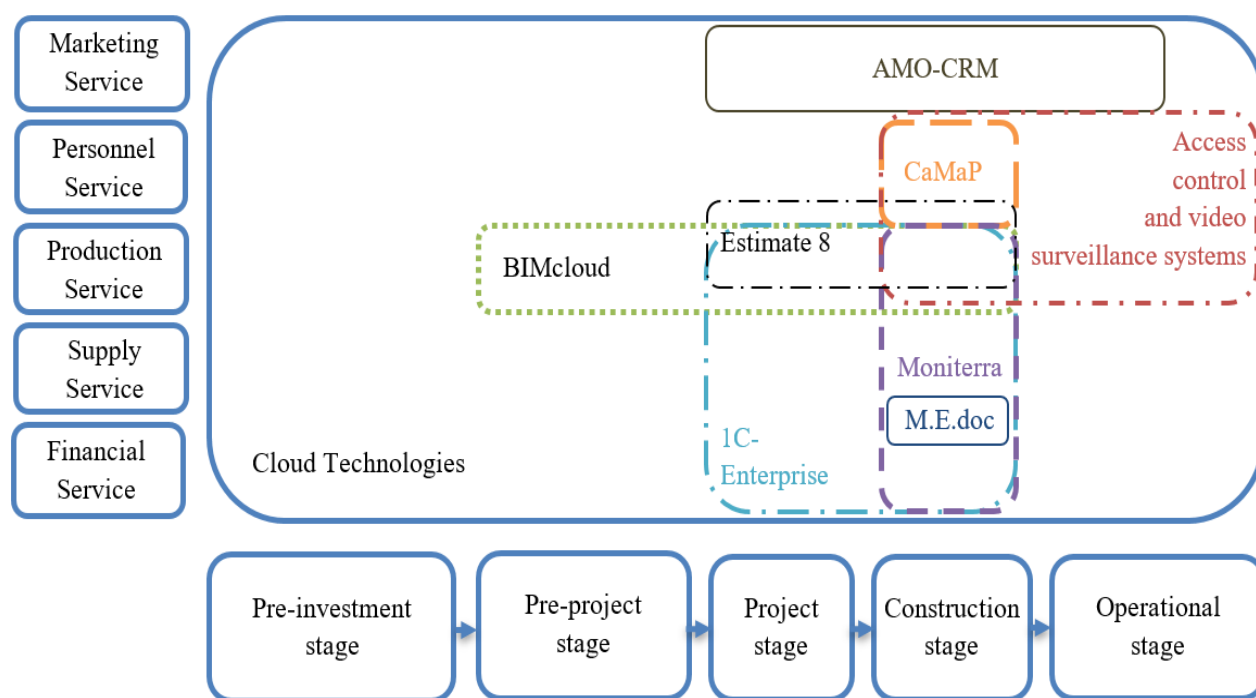


Fig. 2. The use of information technologies according to the life cycle stage of construction and the subject area of application

Obviously, information technology and systems are part of the resource potential of the enterprise. In general, the resource potential of the enterprise is a set of its tangible, labor, intangible, financial, time, information resources, including the ability of employees to effectively use these resources to perform the intended technological process and achieve strategic and current goals of the enterprise [21].

We distinguish among the set of resources material resources (inventories, current assets) that participate in the process of economic activity during one production cycle, while completely changing their form and transfer their value to the costs of the enterprise.

Pre-investment, pre-project and project stages of the life cycle of a construction project are such that they practically do not require the use of material resources. However, at these stages, all the necessary information for the construction phase is formed, namely – the project, which generates the composition, structure, quantity, time

of receipt and other characteristics of the set of material resources.

The functions of material resource management can be reduced to four main groups [21]:

1. Planning the parameters of material flows, ie planning the need for material resources in conjunction with the choice of suppliers, forms and channels of supply of resources.
2. Organization of the process of receipt of material resources.
3. Regulation of the parameters of material flows by bringing them closer to the actual needs of the enterprise.
4. Periodic control of the process of resource use based on monitoring the parameters of construction works.

The functions of material resources management are implemented at different stages of the life cycle of the construction project (fig. 3).

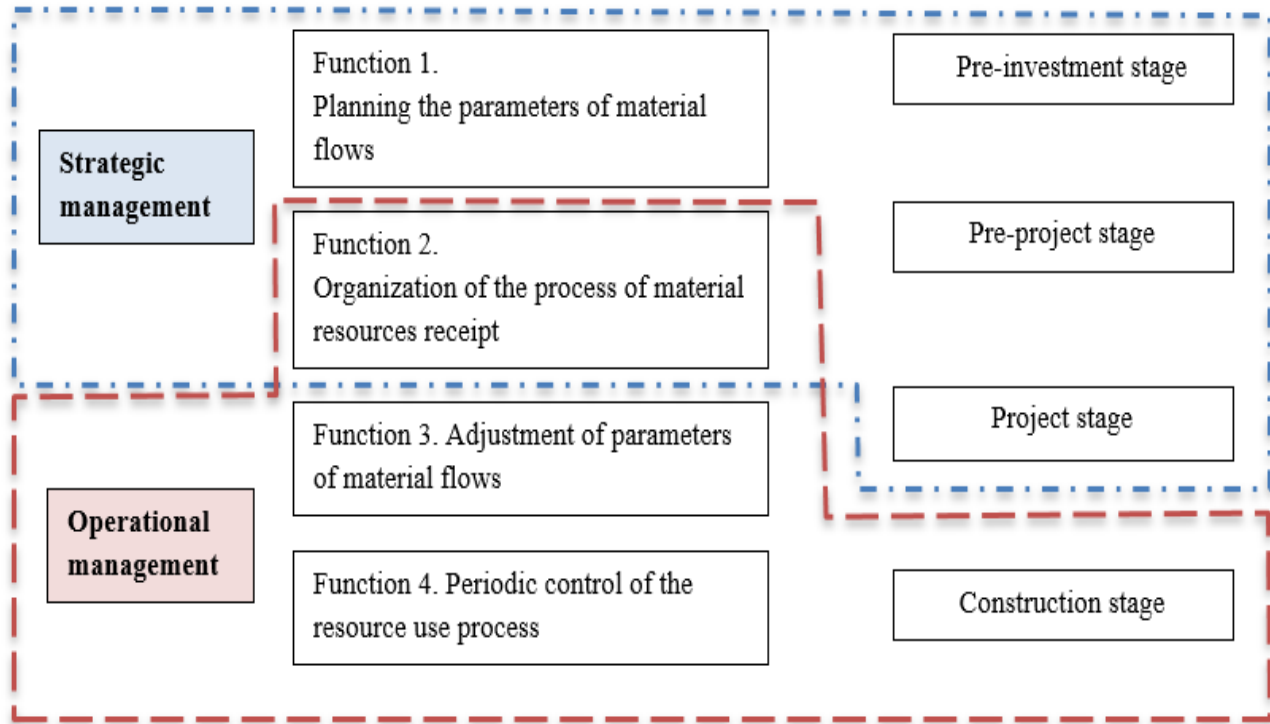


Fig. 3. The ratio of stages of the life cycle of the construction project, levels and functions of material resources management

These management functions are the main tasks of information technology of material resources management ($ITmmr$) of the construction enterprise.

By definition, information technology as a finite ordered set of methods and means of information processing (Information Processing) – elements of information technology – can be formalized as follows:

$$ITmmr = \langle \{IP_1, \dots, IP_N\} \times \{R_1, \dots, R_M\} \rangle, \quad (1)$$

where $IP_1, \dots, IP_N, R_1, \dots, R_M$ – sets of elements of information technology and means of their ordering, respectively, N and M – power of sets IP and R .

As a resource, information technology $ITmmr$ must have certain characteristics of P (functional and cost), and must meet certain information needs of information technology consumers.

The following functional characteristics P_1, \dots, P_6 of information technology of material resources management are generalized:

P_1 – use of computing paradigm of cloud technologies;

P_2 – availability of a unified base of material resources;

P_3 – compliance with the regulatory framework for informatization of the economic activity of the enterprise;

P_4 – availability of mechanisms to support strategic and operational management decisions;

P_5 – support for data exchange (import and export) with external sources;

P_6 – availability of means of integration into the existing information ecosystem of the enterprise;

P_7 – modular structure of information technology.

Each of the selected characteristics is vector (multifactor), the content of which is revealed in the subsequent stages of modeling.

Development and implementation of information technology for material resources management requires qualified personnel, financial and time costs. Therefore, when creating information technology, it is necessary to determine the metrics of its effectiveness. To date, an arsenal of approaches to determining the effectiveness of information technology, both economic and systemic. The difficulty lies in the fact that the quantitative assessment of the actual economic efficiency of investment in the creation and implementation of information technology as such does not cover all the results and consequences of development.

A set of elements IP_1, \dots, IP_N of the information technology and the main flows of information exchange R_1, \dots, R_M we present in the form of a conceptual model (fig. 4), which has a clearly defined modular structure (property).

It is assumed that the data processing modules should be placed in the cloud (property). The arrows in the diagram indicate the information flows between the technology modules.

Analysis of the available means of determining the effectiveness of information technology in terms of subject area showed that the most acceptable is the service strategy ITIL (IT Infrastructure Library) [22], which implements a systematic approach to determining the effectiveness of information technology.

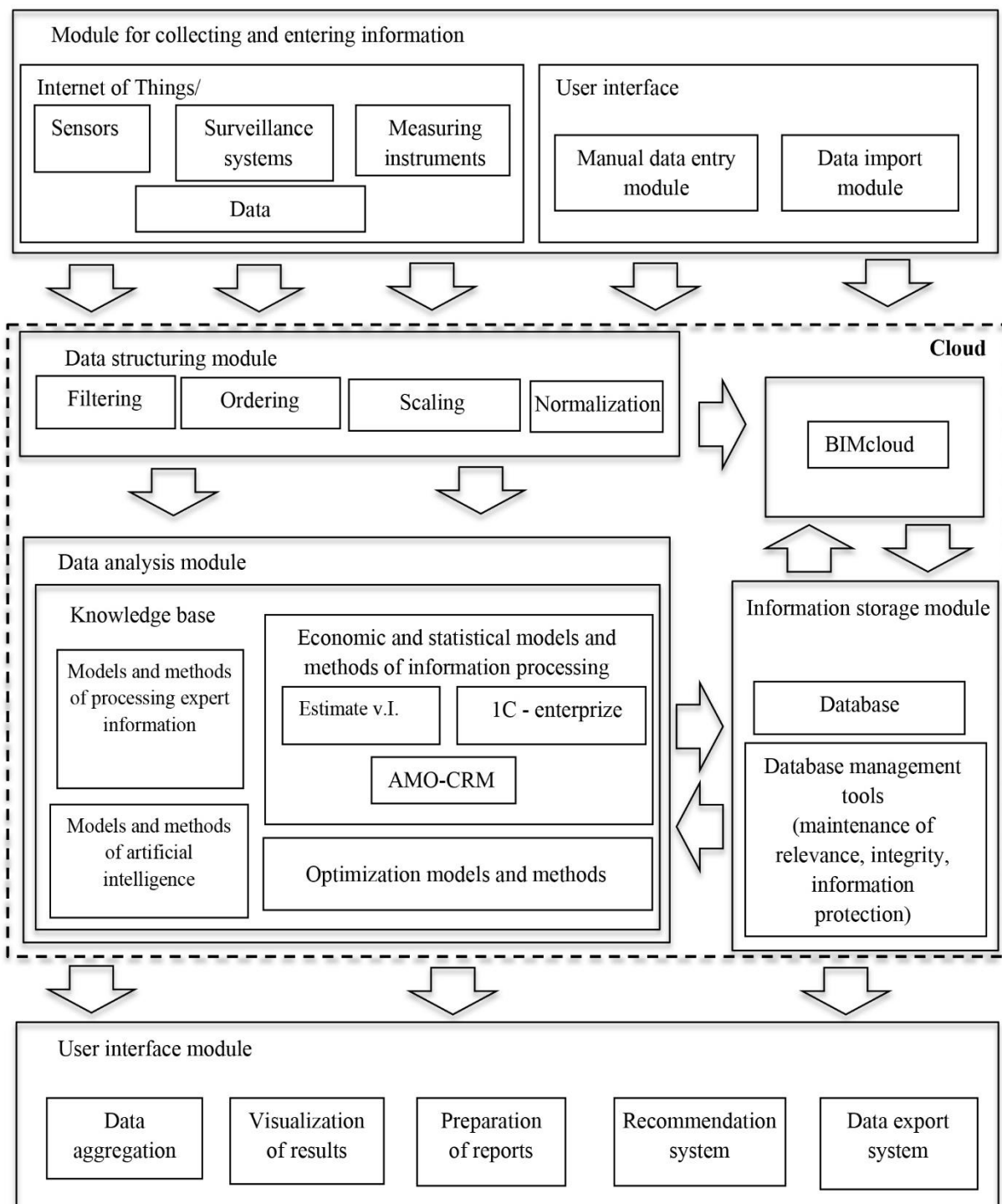


Fig. 4. Conceptual model of information technology of resource management

According to the ITIL strategy, the functional efficiency $K_F(IP)$ of information technology management of material resources of a construction company is assessed by the results of operational $\{K_{F1}(IP)\}$, financial $\{K_{F2}(IP)\}$, strategic $\{K_{F3}(IP)\}$, industrial $\{K_{F4}(IP)\}$ industries. In turn, the criterion of operational efficiency $K_{F1}(IP)$ for ITmmr includes such criteria as: reducing information processing time $K_{F11}(IP)$ and resource delivery time $K_{F12}(IP)$,

increasing the productivity of the supply service $K_{F13}(IP)$, increasing the reliability of the supply process $K_{F14}(IP)$ to reduce risks $K_{F15}(IP)$ (by type of resources), improving the use of resources with limited life of $K_{F16}(IP)$.

The criterion of efficiency $K_{F2}(IP)$ of financial activity concerning ITmmr includes such partial criteria, as reduction of direct expenses $K_{F21}(IP)$ for creation of a product of the construction project, criterion of growth of

margin $K_{F22}(IP)$, criterion of execution of the budget of the construction project $K_{F23}(IP)$.

The criterion of strategic efficiency $K_{F3}(IP)$ includes the criteria of strengthening the market position of the enterprise $K_{F31}(IP)$, determining the competitive types of housing projects $K_{F32}(IP)$, improving the quality of construction $K_{F33}(IP)$, offering new types of services in the field of housing $K_{F34}(IP)$, improving the comfort of the construction project product $K_{F34}(IP)$.

The criterion of industrial efficiency $K_{F4}(IP)$ contains such partial criteria as the criterion of growth of the company's share in the housing market $K_{F41}(IP)$, the criterion of compliance with construction standards and regulations $K_{F42}(IP)$, the criterion of recognition of the enterprise as a leader in the housing market $K_{F43}(IP)$.

Thus:

$$K_F(IP) = F[\lambda_i, K_{Fi}(IP)], i = 1, \dots, 4, \quad (2)$$

where F is a certain type of hierarchical convolution of partial efficiency criteria $K_{Fi}(IP)$, λ_i – isomorphism parameters that lead heterogeneous partial efficiency criteria to a single metric,

$$\lambda_i = \{\lambda_{ij}\}, j = 1, 2, \dots, J_i, \quad (3)$$

where $J_i, i = 1, \dots, 4$ is the number of partial criteria by types of information technology efficiency.

Research results and their discussion

A structural analysis of the existing information ecosystem at a construction company at the regional level in conjunction with the elements of the organizational structure of the enterprise and the stages of the construction life cycle. The existing elements of automated information processing are considered as reference points for the development of information technology management of material resources of the enterprise.

The functions of management of material resources of the construction enterprise which are realized at various

stages of a life cycle of the construction project are generalized. These functions become the main tasks of information technology of material resources management. Based on the constructed set-theoretic model of information technology, its functional characteristics are determined.

Mechanisms for implementing the functional characteristics of information technology are provided in the conceptual model of information technology management of material resources. More detailed: the property P_2 is the presence of a unified database of material resources and is provided by the data structuring module and the information storage module. Data analysis modules and user interface elements act as mechanisms to support strategic and operational management decisions. Implementation of the property P_5 is the support of data exchange (import and export) with external sources – provided in the module of collection and input of information and elements of the user interface. Property P_3 is a compliance with the regulatory framework for informatization of economic activity of the enterprise is provided by the inclusion of appropriate additional modules, and finally property P_6 is the availability of means of integration into the existing information ecosystem of the enterprise – is provided by defining the place of existing information. technology implementation. Criteria for the effectiveness of information technology according to the ITIL strategy, which provide for quantitative interpretation.

Conclusions and prospects for further development

The developed means of modeling of information technology of management of material resources of the building enterprise include the theoretical-multiple model of information technology of management of material resources; the functional characteristics of the considered information technology are determined. The developed modeling strategy will provide an opportunity for further development and software implementation of information technology.

References

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of June 23, 2021 № 681 "Some issues of ensuring the functioning Unified State Electronic System in the construction field" [Postanova Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 23 chervnia 2021 r. № 681 "Deiaki pytannia zabezpechennia funktsionuvannia Yedynoi derzhavnoi elektronnoi systemy u sferi budivnytstva"], available at : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/681-2021-%D0%BF#Text> (last accessed 16.08.2021).
2. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On approval of the Concept of implementation of building information modeling technologies (BIM-technologies) in Ukraine and approval of the action plan for its implementation" [Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy "Pro skhvalennia Kontseptsii vprovadzhennia tekhnolohii budivelnoho informatsiinoho modeliuвання (VIM-tekhnolohii) v Ukraini ta zatverdzhennia planu zakhodiv z yii realizatsii"], available at : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-%D1%80#Text> (last accessed 16.08.2021).
3. Sharma, A., Rana, N. P., Nunkoo, R. (2021), "Fifty years of information management research: A conceptual structure analysis using structural topic modeling", *International Journal of Information Management*, Vol. 58, 102316. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102316>
4. Chen, Q., de Soto, G. B., Adey, B. T. (2018), "Construction automation: Research areas, industry concerns and suggestions for advancement", *Automation in Construction*, Vol. 94, P. 22–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.028>

5. Tomashevsky, O. M., Tsegelyk, G. G., Viter, M. B., Duduk, V. I. (2012), *Information technologies and business process modeling [Informatsiini tekhnologii ta modeliuvannia biznes-protsesiv]*, Kyiv, 296 p.
6. "Governance of IT for the organization: ISO/IEC 38500:2015", available at : <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:38500:ed-2:v1:en> (last accessed 16.08.2021).
7. Krachuk, S. O. (2016), "The state of introduction of information technologies in management of modern enterprises" ["Stan zaprovadzhennia informatsiinykh tekhnologii v upravlinni suchasnykh pidpriemstvamy"], *Efficient economy*, No. 4.
8. Zolotukhina, O. A. (2018) "The structure of information technology control of resource costs" ["Struktura informatsiinoi tekhnologii kontroliu vytrat resursiv"], *Telecommunication and information technologies*, No. 1 (58), P. 96–104.
9. Biloshchytsky, A. A., Biloshchytska, S. V., Lisnevsky, R. V., Lyashchenko, T. O. (2011), "Improvement of methods and means of modern information technologies in teaching and control of knowledge" ["Udoskonalennia metodiv i zasobiv suchasnykh informatsiinykh tekhnologii v navchanni i kontroli znan"], *Management of complex systems development*, Vol. 5, P. 87–94.
10. Alshawi, M., Underwood, J. (1996), "Applying object-oriented analysis to the integration of design and construction", *Automation in Construction Volume*, No. 5 (2), P. 105–121. DOI: [https://doi.org/10.1016/0926-5805\(95\)00023-2](https://doi.org/10.1016/0926-5805(95)00023-2).
11. Takeuchi, H., Yamamoto, S. (2020), "Business Analysis Method for Constructing Business-AI Alignment Model", *Procedia Computer Science*, Vol. 176, P. 1312–1321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.09.140>
12. Eldeep, Ah. M., Moataz, A. M., Farag, L. M., El-hafez, A. (2021), "Using BIM as a lean management tool in construction processes – A case study", *Ain Shams Engineering Journal*, In Press, Corrected Proof. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.07.009>
13. Shehzad, M. H. F., Ibrahim, R. B., Yusof, A. F., Khaidzir, Kh. A. M., Iqbal, M., Razzaq, S. (2021), "The role of interoperability dimensions in building information modelling", *Computers in Industry*, Vol. 129, 103444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103444>
14. Tesla, Yu. M., Oberemok, N. V., Latsheva, T. V. (2015), "Matrix information technology NADPROJECT project management of construction companies" ["Matrychna informatsiina tekhnologii NADPROJECT upravlinnia proektamy budivelnykh kompanii"], *Management of complex systems development*, No. 22, P. 84–88.
15. Kramarenko, V. I., Novozhilova, M. V. (2020), "Analysis of information systems for managing material resources of a construction company" ["Analiz informatsiinykh system upravlinnia materialnykh resursamy budivelnoho pidpriemstva"], *Prospects for the development of territories: theory and practice*, P. 468–470.
16. Danshina, S. Yu. (2021), "Generalized approach to the management of material resources of the project", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.043>
17. "Graphisoft BIMcloud", available at : <https://graphisoft.com/ru/solutions/bimcloud/> (last accessed 16.08.2021).
18. "Intelligent software Samar" ["Intelektualne prohramne zabezpechennia Samar"], available at : <https://kobi.ua/product/intellektualnoe-programmnoe-obespechenie-camap/> (last accessed 16.08.2021).
19. "BIM 360", available at : <https://bim360.csd.ru/bim360build/> (last accessed 16.08.2021).
20. "Navisworks", available at : <https://www.autodesk.com/products/navisworks/overview> (last accessed 16.08.2021).
21. Chub, O. I., Novozhilova, M. V. (2017), *Multicriteria optimization of resource provision of renewable works on infrastructure objects [Bahatokryterialna optimizatsiia resursnoho zabezpechennia vidnovliuvanykh robit na infrastrukturykh ob'ektakh]* : Monograph, Kharkiv, 150 p.
22. Axelos. ITIL Foundation, ITIL 4 edition. 1. UK : TSO (The Stationery Office). 2019. 222 p.

Received 23.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Новожилова Марина Володимирівна – доктор фізико-математичних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, завідувач кафедри, Харків, Україна; email: marina.novozhilova@kname.edu.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9977-7375>.

Новожилова Марина Владимировна – доктор фізико-математических наук, професор, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, заведующая кафедрой, Харьков, Украина.

Novozhylova Maryna – Doctor of Sciences (Physical and Mathematical), Professor, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Head of the Department, Kharkiv, Ukraine.

Крамаренко Владислав Ігорович – Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, аспірант, Харків, Україна; email: Vladyslav.Kramarenko@kname.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4065-9972>.

Крамаренко Владислав Игоревич – Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, аспирант, Харьков, Украина.

Kramarenko Vladyslav – O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Postgraduate Student, Kharkiv, Ukraine.

Чуб Ольга Ігорівна – кандидат економічних наук, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, доцент кафедри теоретичної та прикладної системотехніки, Харків, Україна; email: O.I.Chub@karazin.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1216-856X>.

Чуб Ольга Игоревна – кандидат экономических наук, Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, доцент кафедры теоретической и прикладной системотехники, Харьков, Украина.

Chub Olga – PhD (Economics Sciences), V. N. Karazin Kharkiv National University, Associate Professor of the Department of Theoretical and Practical Systemotechnics, Kharkiv, Ukraine.

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ МАТЕРІАЛЬНИМИ РЕСУРСАМИ БУДІВЕЛЬНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Предметом дослідження в статті є інформаційна технологія управління матеріальними ресурсами будівельного підприємства. **Мета** роботи – побудова та реалізація інструментальних засобів моделювання інформаційної технології управління матеріальними ресурсами будівельного підприємства. В статті вирішуються наступні **завдання**: визначення місця інформаційної технології управління матеріальними ресурсами будівельного підприємства в інформаційній екосистемі сучасного будівельного підприємства, визначення основних складових та побудова функціональної моделі інформаційної технології управління матеріальними ресурсами будівельного підприємства, що враховує недоліки існуючих моделей, визначення частинних показників ефективності інформаційної технології та створення оптимізаційної багатокритеріальної моделі інформаційної технології, що розглядається. Використовуються такі **методи**: системного аналізу, структурного аналізу, математичного моделювання складних систем та процесів, багатокритеріальної оптимізації. Отримано наступні **результати**: проведено структурний аналіз наявної інформаційної екосистеми на будівельному підприємстві регіонального рівня, склад якої узгоджено за елементами організаційної структури підприємства та етапів життєвого циклу будівництва; розглянуто функції управління матеріальними ресурсами будівельного підприємства, що реалізуються на різних етапах життєвого циклу будівельного проекту; побудовано теоретико-множинну модель інформаційної технології управління матеріальними ресурсами; визначено функціональні характеристики інформаційної технології, що розглядається, запропоновано критерії ефективності інформаційної технології за стратегією ІТІЛ; побудовано концептуальну модель інформаційної технології управління матеріальними ресурсами. **Висновки**: вперше розроблено засоби моделювання інформаційної технології управління матеріальними ресурсами будівельного підприємства, що включають теоретико-множинну модель інформаційної технології управління матеріальними ресурсами; запропоновано концептуальну схему інформаційної технології, що реалізує визначені функціональні характеристики інформаційної технології. Побудована стратегія моделювання забезпечить можливість подальшого розвитку та програмної реалізації інформаційної технології.

Ключові слова: інформаційні потоки; будівельне підприємство; функціональна модель; критерії ефективності.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ УПРАВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Предметом исследования в статье является информационная технология управления материальными ресурсами строительного предприятия. **Цель** работы - построение и реализация инструментальных средств моделирования информационной технологии управления материальными ресурсами строительного предприятия. В статье решаются следующие **задачи**: определение места информационной технологии управления материальными ресурсами строительного предприятия в информационной экосистеме современного строительного предприятия, определение основных составляющих и построение функциональной модели информационной технологии управления материальными ресурсами строительного предприятия, учитывающий недостатки существующих моделей, определение частных показателей эффективности информационной технологии и создание оптимизационной многокритериальной модели информационной технологии, рассматривается. Используются следующие **методы**: системного анализа, структурного анализа, математического моделирования сложных систем и процессов, многокритериальной оптимизации. Получены следующие **результаты**: проведено структурный анализ имеющейся информационной экосистемы на строительном предприятии регионального уровня, состав которой согласован с элементами организационной структуры предприятия и этапов жизненного цикла строительства; рассмотрены функции управления материальными ресурсами строительного предприятия, реализуемых на различных этапах жизненного цикла строительного проекта; построено теоретико-множественную модель информационной технологии управления материальными ресурсами; определены функциональные характеристики информационной технологии, рассматривается, предложены критерии эффективности информационной технологии по стратегии ИТІЛ; построено концептуальную модель информационной технологии управления материальными ресурсами. **Выводы**: впервые разработаны средства моделирования информационной технологии управления материальными ресурсами строительного предприятия, включающие теоретико-множественную модель информационной технологии управления материальными ресурсами; предложена концептуальная схема информационной технологии, реализует определенные функциональные характеристики информационной технологии. Построена стратегия моделирования обеспечит возможность дальнейшего развития и программной реализации информационной технологии.

Ключевые слова: информационные потоки; строительное предприятие; функциональная модель; критерии эффективности.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Новожилова М. В., Крамаренко В. І., Чуб О. І. Моделювання інформаційної технології управління матеріальними ресурсами будівельного підприємства. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.032>

Novozhylova, M., Kramarenko, V., Chub, O. (2021), "Modeling of information technology of material resources management of a construction company", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 32–40. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.032>

С. М. Порошин, В. В. Усик

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЧЕТВЕРТОГО ЕТАПУ АКУСТИЧНОЇ ЕКСПЕРТИЗИ ДЛЯ ПРИМІЩЕНЬ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Предметом дослідження в статті є методологія проведення експертизи приміщень з метою створення оптимальних акустичних умов в залежності від призначення приміщення. **Мета** – підвищення якості проведення всіх етапів акустичної експертизи з урахуванням приміщень, для яких існують особливі вимоги до якості переданого контенту або для яких є особливості у формуванні звукового поля. Для досягнення поставленої мети, авторами в статті запропонована нова послідовність проведення етапів акустичної експертизи, а саме, використання завершального (четвертого) етапу в якості першого. Така послідовність проведення етапів вимагає вирішення декількох **завдань**: визначення умов проведення досліджень з урахуванням специфіки приміщення і контенту; вибір апаратно-програмного комплексу для проведення досліджень; визначення інформативних критеріїв оцінки акустики приміщення з урахуванням всіх його особливостей; обробка та аналіз отриманих результатів. Застосування такого підходу до етапів акустичної експертизи було розглянуто на прикладі залу засідань, для якого були присутні вимоги до високої якості мовного контенту, в залі вже використовувалася система звукопідсилення, були особливості у формуванні звукового поля. Авторами в статті описані рішення всіх поставлених завдань для досліджуваного приміщення. Отримані **результати** дозволили проаналізувати об'єктивні характеристики звукового поля та виявити причини низької якості передачі мовного контенту не тільки при акустичному розрахунку, але при використанні існуючої систем звукопідсилення (електроакустичний розрахунок). **Висновки.** Запропонована послідовність проведення етапів акустичної експертизи дає можливість виявити "проблемні" місця в формуванні звукового поля і/або визначити можливі шляхи вирішення ще до початку етапів перевірки існуючих архітектурно-будівельних рішень і розробки технічного завдання на конструкції огорожувальних поверхонь і заходів по створінні оптимальних акустичних умов.

Ключові слова: акустична експертиза; об'єктивні характеристики звукового поля; критерії оцінки акустики приміщення.

Вступ

Акустична експертиза приміщень різного призначення включає чотири етапи [13-15]:

- перший етап – перевірка існуючих архітектурно-будівельних рішень для внутрішніх поверхонь приміщення (геометрія, матеріали обробки);

- другий етап – розробка рекомендацій щодо підвищення дифузності звукового поля та забезпечення оптимальної структури ревербераційного процесу (етап створення технічного завдання на розробку конструкцій огорожувальних поверхонь);

- третій етап – моделювання акустики приміщення з рекомендованими оздоблювальними матеріалами та рекомендованими в технічному завданні огорожувальними поверхнями;

- четвертий етап – вимір об'єктивних характеристик звукового поля, яке синтезовано після виконання рекомендованих заходів щодо забезпечення оптимальних акустичних умов.

Послідовність та обсяг проведених в рамках акустичної експертизи етапів може змінюватися за рахунок певних факторів або наявності особливих первинних умов виконання експертизи. Такими факторами та умовами можуть виступати: приміщення, в яких присутні особливості формування звукового поля; приміщення зі спеціальним призначенням; приміщення з особливими вимогами до об'єктивних і/або суб'єктивних характеристиками звукового поля; приміщення з особливими вимогами до типу та якості передачі контенту. У таких випадках в якості першого етапу використовується четвертий

етап, який включає проведення вимірювань об'єктивних характеристик звукового поля [1, 2, 9].

Обробка та аналіз отриманих результатів вимірювань дозволяє провести оцінку не тільки акустики приміщення (акустичний розрахунок), а й існуючої системи звукопідсилення, якщо вона присутня (електроакустичний розрахунок), що дає можливість проводити наступні етапи з урахуванням виявлених недоліків та особливостей у формуванні звукового поля.

Мета і задачі дослідження

В роботі поставлено за мету підвищення якості оцінки акустичних умов в приміщенні за рахунок проведення вимірювального етапу акустичної експертизи (четвертого етапу) в якості першого етапу на прикладі спеціального приміщення з особливими вимогами до типу та якості передачі контенту.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити умови проведення досліджень;
- запропонувати апаратно-програмний комплекс для проведення вимірювань об'єктивних характеристик звукового поля;
- визначити інформативні критерії оцінки акустики приміщення з урахуванням особливостей приміщення або контенту, що використовується;
- провести аналіз отриманих результатів з метою виявлення особливостей формування звукового поля в приміщенні, оцінки якості передачі контенту, виявлення причин незадовільної якості показників, визначення заходів і рекомендацій для подальших етапів акустичної експертизи.

Основна частина

1. Умови проведення досліджень

Підставою для проведення акустичної експертизи приміщення була незадовільна якість передачі мовного контенту, як за умови використання ненаправленого джерела звукового сигналу, так і при використанні існуючої системи звукопідсилення. Об'єктом досліджень виступив зал засідань. Досліджуваний зал мав геометричні розміри: ширина - 24,69 м; довжина - 24,47 м, висота - 12,94 м. Повітряний обсяг становить ~ 7817,9 м³.

Вимірювання характеристик звукового поля проводився з використанням апаратно-програмного комплексу [11, 12, 16, 17]. Для проведення досліджень було визначено наступні умови:

1. Вимірювання в приміщенні залу проводилися згідно ISO 3382 [5-7].

2. Схема розміщення точок вимірювань представлена на рис. 1-2. У приміщенні було обрано 35 точок розміщення вимірювального мікрофона на першому поверсі та на балконі. Мікрофон розміщувався на висоті 1,2 м від поверхні підлоги в зоні розташування крісел. Досліджуване приміщення є симетричним уздовж поздовжньої вісі, тому всі точки розташовувалися в правій половині залу.

3. Вимірювання в приміщенні проводилися без учасників засідання.

4. Всі проведені результати вимірювань та їх аналіз містить два варіанти, які відрізняються використанням різних джерел тестового сигналу.

Перший варіант (акустичний). В якості джерела тестового сигналу використовували ненаправлене джерело, яке було встановлене на висоті 1,5 м від підлоги та розташовано по поздовжній вісі приміщення в районі центральної трибуни [3, 4].

Другий варіант (електроакустичний). Для оцінки параметрів синтезованого звукового поля, в якості джерела тестового сигналу використовувалася

існуюча система звукопідсилення залу з включеною конгрес системою [3, 4, 5].

5. Згідно з тим, що основний звуковий контент для досліджуваного приміщення був мовний матеріал, то були визначені та виміряні наступні характеристики: час реверберації T30, ранній час спаду EDT; мовна ясність C50, ясність прямого звуку C7; %ALcons – відсоток артикуляційних втрат приголосних; STI індекс передачі мови; RASTI швидкий індекс передачі мови [10].

2. Критерії оцінки акустики приміщення [10, 12, 17]

Час реверберації.

Для вимірювання раннього часу спаду (EDT) і часу реверберації (RT) використовується відгук на імпульсний вплив в приміщенні. Крутизна обернено інтегрованого логарифмічного імпульсного відгуку приміщення (так звана ділянка Шредера) дозволяє розрахувати час реверберації.

Отримані результати представлені в частоті зваженої формі (опціонально третину октави) та відповідно до ISO3382 визначає їх енергетичними діапазонами від -5 дБ до -15 дБ (EDT), і від -5 дБ до -35 дБ (T30) [5-7,10].

Так як в реальних умовах залів важко досягти необхідного динамічного діапазону в 60 дБ для отримання стандартного часу реверберації (T60), то час реверберації визначається як загасання рівня звукового тиску в діапазоні від -5 дБ до -35 дБ і називається T30.

Розміри досліджуваного залу та його призначення визначають оптимальний час реверберації T500. На рис. 3 представлені допустимі межі рекомендованих відхилень значень часу реверберації щодо оптимального часу реверберації T500.

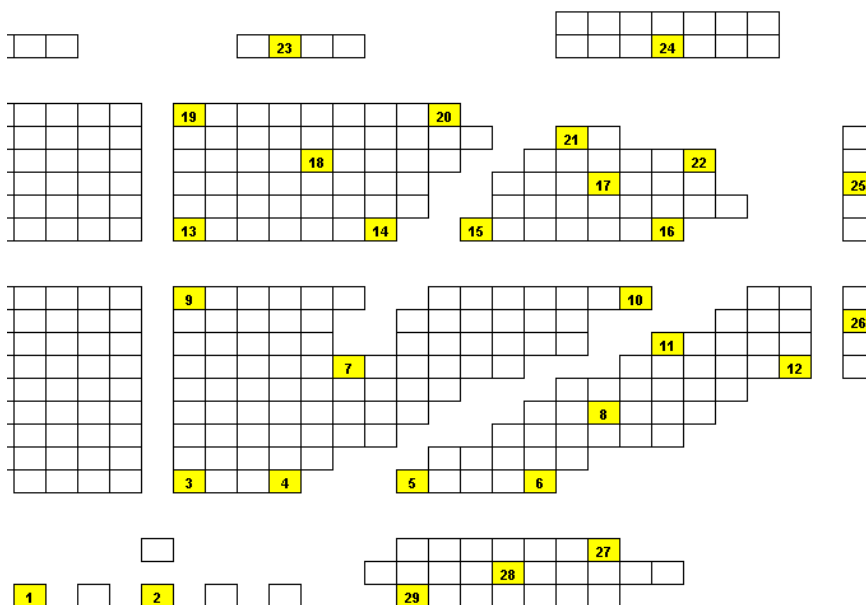


Рис. 1. Схема розташування вимірювального мікрофону при проведенні акустичної експертизи на першому поверсі залу

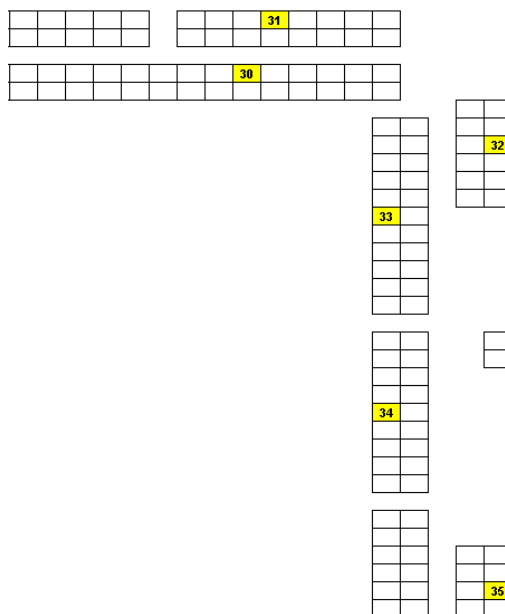


Рис. 2. Схема розташування вимірювального мікрофону при проведенні акустичної експертизи на балконі зали

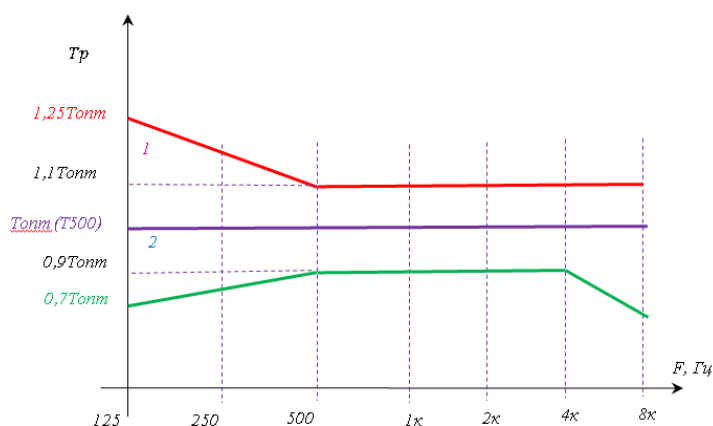


Рис. 3. Допустимий діапазон відхилень часу реверберації від оптимального значення T500, рекомендований для мовного контенту

Ясність.

Для оцінки показників ясності в приміщенні, де переважає мовний контент, оцінюються показники:

- 1) рівень прямого звуку C_7 ;
- 2) мовна ясність C_{50} ;

1. Рівень прямого звуку C_7 відображає звукові компоненти енергії прямого звуку по відношенню до звукової енергії відображень та реверберації, які прибувають після прямого звуку на місце прослуховування. Показник C_7 – критерій суб'єктивного сприйняття "близькості" або "безпосередності" джерел звуку (спікера). Значення рівня прямого звуку визначається за формулою:

$$C_7 = 10 \log_{10} \left(\frac{E_7}{E_\infty - E_7} \right). \quad (1)$$

2. Показник C_{50} має відношення до розбірливості мови та розраховується за формулою

$$C_{50} = 10 \log_{10} \left(\frac{E_{50}}{E_\infty - E_{50}} \right). \quad (2)$$

Відношення між мовною ясністю та визначенням показника C_{50} дає оцінку, згідно з якою C_{50} повинен бути ≥ -2 дБ. Це допомагає уникнути зменшення ясності складу нижче 80%. Ясність фрази (текстова ясність), завдяки контексту є вище, ніж ясність складу, та становить 95%. Значення $C_{50} = -2$ дБ вважається нижньою допустимою межею для гарної мовної або текстової ясності.

Чіткість мовного контенту.

Для оцінки розбірливості використовується такі показники, як:

- %ALcons (percentage Articulation Loss of Consonants) - відсоток артикуляційних втрат приголосних;
- STI (speech transmission index) - індекс передачі мови.

- RASTI (rapid speech transmission index) – швидкий індекс передачі мови.

Відсоток артикуляційних втрат приголосних (%ALcons).

Для оцінки розбірливості обчислюється відсоток втрати приголосних, які в основному і визначають смисловий зміст промови. Чим більше цей відсоток, тим гірше розбірливість мови в приміщенні. Максимально допустиме значення - 10% (за умови, що приміщення відносно вільно від шуму, що маскує). Значення ALcons об'єднані рейтинговою шкалою для оцінки словесної мовної ясності (табл. 1).

Таблиця 1. Шкала оцінки мовної ясності

| Значення ALcons | Оцінка мовної ясності |
|-----------------|-------------------------------|
| ≤ 3% | ідеальна |
| = 3% | дуже добра |
| = 8% | добра |
| ≥ 11% до 20 % | погана |
| >20% | марна (граничне значення 15%) |

В приміщеннях де важливим фактором є якісна передача мовного контенту, показник артикуляційних втрат приголосних %ALcons не має перевищувати значення 5%.

Індекс передачі мови (STI).

Метод розрахунку індексу передачі мови (STI) полягає в тому, що мовний сигнал являє собою згортку імпульсної характеристики звукового сигналу джерела (для голосних звуків це імпульсний сигнал з майже гармонійним спектром, для приголосних це шумовий сигнал різної форми) з імпульсною характеристикою голосового тракту.

Мовний сигнал можна наближено розглядати як певний широкосмуговий сигнал (з смугою 125 ... 8000 Гц), модульований іншим сигналом з низькою частотою. Частота модуляції визначається швидкістю, з якою людина вимовляє форманти (швидкістю артикуляції). Експерименти показали, що частоти

модуляції в звичайній мові знаходяться в діапазоні від 0,63 до 16 Гц, причому найбільш ймовірні частоти модуляції знаходяться в області 5 ... 7 Гц.

Визначення значень STI засноване на вимірі подавлення модуляції сигналу між місцем розташування джерела звуку, наприклад, на сцені, та прийомним вимірювальним місцеположенням з середніми октавними частотами від 125 Гц до 8000 Гц.

Однак, не тільки реверберація та шум зменшують ясність мови, але також всі зовнішні сигнали або їх зміни, які відбуваються на шляху від джерела до слухача. Для підтвердження цього впливу використовується модуляційна передавальна функція (MTF). Наявний корисний сигнал S (сигнал) співвідноситься з переважаючим сигналом що заважає, N (шумом). Визначальним фактором модуляційного подавлення $m(F)$ є фактор, який характеризує перешкоди з мовної ясністю:

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi F \cdot \frac{RT}{13,8})^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-\frac{S/N}{10dB}}}, \quad (3)$$

де F – частота модуляції, Гц; RT – час реверберації, с; S/N – відношення сигнал/шум, дБ.

Для обчислення використовуються частоти модуляції від 0,63 Гц до 12,5 Гц в третину-октавних смугах. Крім того, модуляційна передавальна функція піддається надбавку частоти (WMTF – навантажена модуляційна передавальна функція) для досягнення повної кореляції з мовної ясністю. При цьому модуляційна передавальна функція поділяється на 7 діапазонів частот, кожен з яких модулювати частотою модуляції. Це призводить до матриці $7 \times 14 = 98$ коефіцієнтів придушення модуляції m_i .

Для того, щоб була можливість порівняти результати оцінок розбірливості, отриманих різними методами, була розроблена загальна шкала розбірливості CIS (стандарт ІЕС-60849), що дозволяє перераховувати значення розбірливості, отриманої різними методами (як суб'єктивними, так і об'єктивними) одна в іншу (рис. 4).

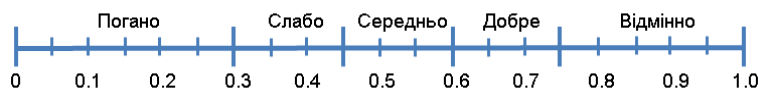


Рис. 4. Шкала оцінки індексу передачі мови

Межі зміни STI для забезпечення гарної розбірливості, особливо для приміщень, де важливим є мовний контент, складають 0,6 ... 1,0.

Швидкий індекс передачі речі (RASTI).

Оскільки розрахунок розбірливості містить трудомістку процедуру, фірмою Brüel & Kjær був розроблений альтернативний спрощений метод RASTI, який передбачає вимірювання тільки в двох октавних смугах 500 Гц при частотах модуляції 1,02/2,03/4,07/8,14 Гц, а також 2 кГц при частотах модуляції 0,73/1,45/2,90/5,81/11,63 Гц. Далі процедура вимірювань відбувається як і в попередньому випадку,

будується матриця, розраховується середнє значення модуляційної передавальної функції в смугах частот і по ньому визначається нормалізований індекс RASTI.

Щоб отримати значення RASTI для чинного відносини сигнал-шум X , його можна обчислити з коефіцієнтів придушення модуляції m_i :

$$X = \frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 X_j, \quad (4)$$

$$X_j = 10 \lg \left(\frac{m_i}{1 - m_i} \right). \quad (5)$$

Згідно з визначенням значення RASTI тоді:

$$RASTI = \frac{X = 15\delta B}{30\delta B}. \quad (6)$$

Засновані на порівнянні результатів суб'єктивних експериментів з максимальною можливою ясністю складів 96%, значення RASTI класифіковані в суб'єктивних оцінках для складової ясності згідно табл. 2.

Таблиця 2. Відповідність складової ясності значенням RASTI

| Складовая ясність | Значення RASTI |
|-------------------|----------------|
| бідна | 0 - 0.3 |
| задовільна | 0.3 - 0.45 |
| добра | 0.45 - 0.6 |
| дуже добра | 0.6 - 0.75 |
| відмінна | 0.75 - 1 |

Рекомендована складова ясність в приміщеннях, для яких важливим є якісна передача мовного контенту, повинна належати діапазону від "Дуже добре" до "Відмінно".

3. Аналіз результатів вимірювань

Оптимальний час реверберації для залу, в якому основним є мовний контент, становить

$$T_{500} = 0,31g(V) - 0,05 = 1,12c. \quad (7)$$

На рис. 5–8 наведені графіки частотної залежності часу реверберації та раннього часу спаду (EDT) для деяких точок вимірювання. Кожен рисунок містить частотні залежності часу реверберації T30, отримані для двох варіантів джерела тестового сигналу: 1 варіант - ненаправлене джерело; 2 варіант - існуюча система звукопідсилення. На кожному графіку наведена крива оптимального часу реверберації T500 і рекомендовані межі відхилення часу реверберації для мовного контенту.

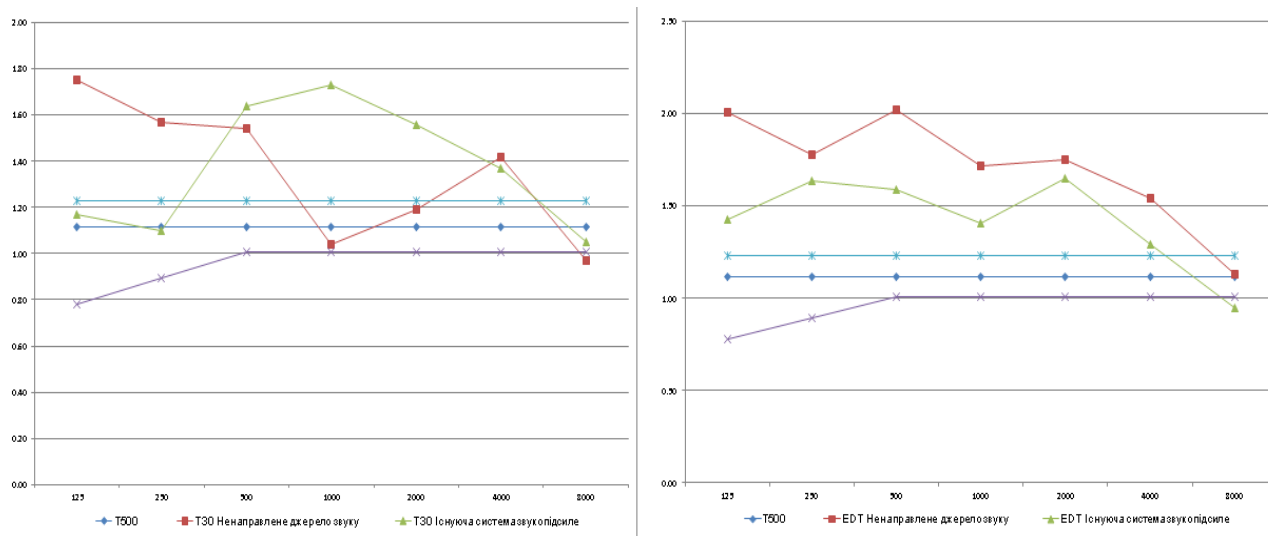


Рис. 5. Графіки частотної залежності часу реверберації T30 та раннього часу спаду (EDT), що отримані для точки вимірювання №7

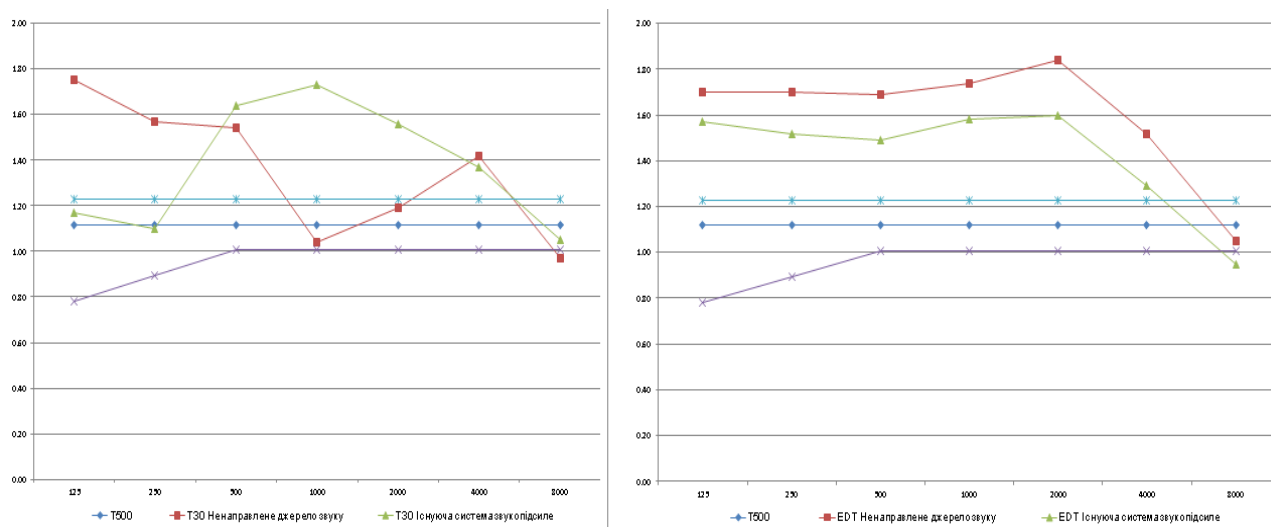


Рис. 6. Графіки частотної залежності часу реверберації T30 та раннього часу спаду (EDT), що отримані для точки вимірювання №10

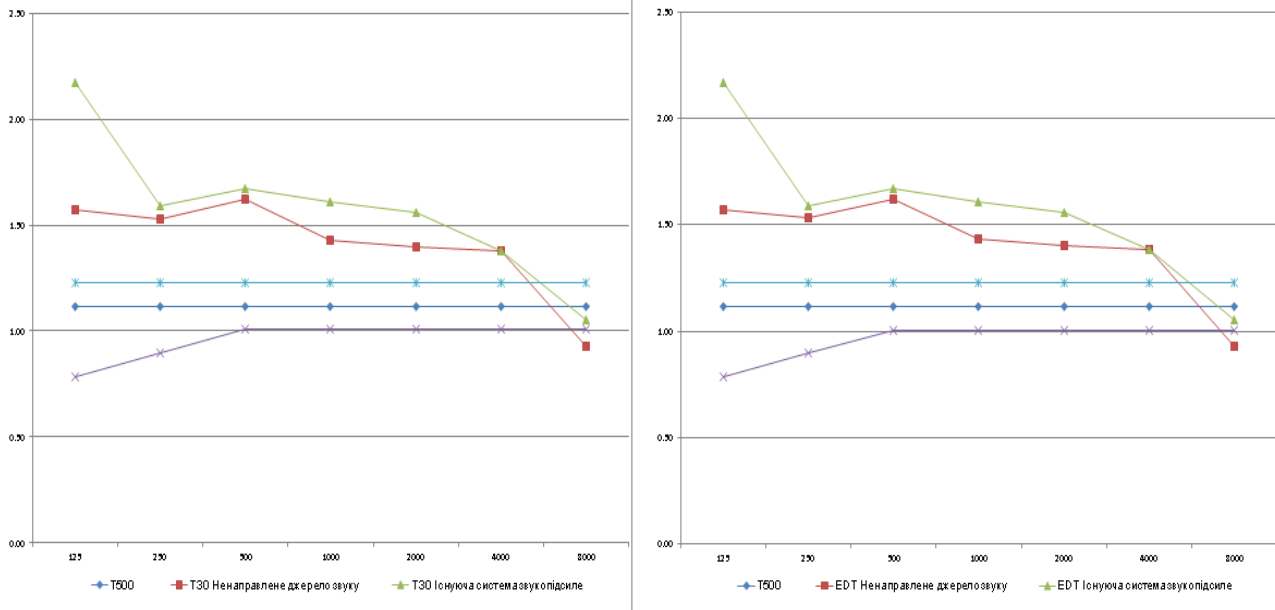


Рис. 7. Графіки частотної залежності часу реверберації T30 та раннього часу спаду (EDT), що отримані для точки вимірювання №28

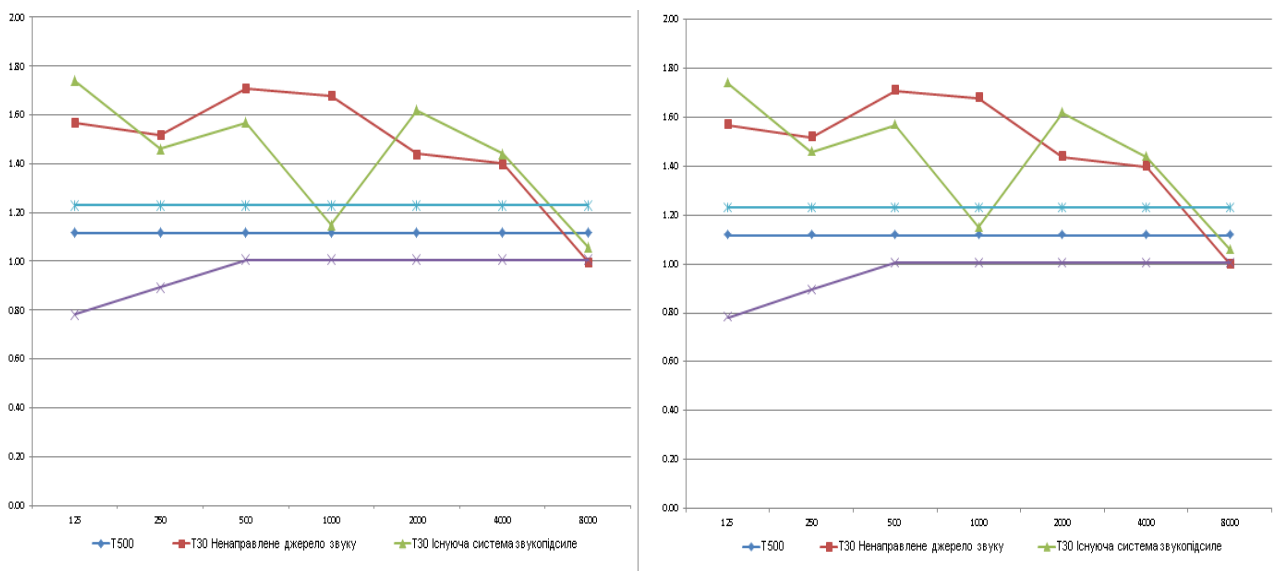


Рис. 8. Графіки частотної залежності часу реверберації T30 та раннього часу спаду (EDT), що отримані для точки вимірювання №33

У табл. 3-4 представлені значення, що виміряні, частотної залежності часу реверберації та раннього часу спаду (EDT) для всіх 35 точок вимірювання для двох варіантів джерел звуку.

Аналіз отриманих графіків та значень T30 і раннього часу спаду EDT дозволив зробити наступні висновки:

- час реверберації в приміщенні досить сильно відрізняється від оптимального часу реверберації в усьому діапазоні частот від 125 Гц до 8000 Гц, що не може не позначатися на якості відтворення мовного контенту;

- тенденція графіків частотної залежності часу реверберації також має явний підйом в області низьких частот, що має благотворний вплив на музичний контент, але призводить до зниження розбірливості мовного контенту;

- аналіз значень раннього часу спаду показує стійку тенденцію до зростання значень в середньочастотній області, що зумовлено малим поглинанням огорожувальних поверхонь та, як наслідок, зниження розрізнення та ясності звукового контенту;

- для корекції акустичних властивостей залу необхідно проведення заходів не тільки по заміні акустичної обробки поверхонь, що огорожують залу (з можливою корекцією геометрії огорожувальних поверхонь), але і заміні існуючої системи звукопідсилення (тип, точки підвісу, кут нахилу, система еквалізації та обробки).

На рис. 9-12 для двох варіантів розрахунку представлені значення мовної ясності C50 для всіх 35 точок вимірювання.

Таблиця 3. Значення T30 та EDT, що виміряні (джерело звуку - ненаправлене)

| Точка вимір. | T30 | | | | | | | EDT | | | | | | |
|--------------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | F, Hz | | | | | | | F, Hz | | | | | | |
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| 1 | 1.53 | 1.44 | 1.72 | 1.65 | 1.57 | 1.36 | 1.01 | 1.37 | 1.08 | 1.74 | 1.58 | 1.58 | 1.58 | 1.36 |
| 2 | 1.4 | 1.3 | 1.59 | 1.6 | 1.49 | 1.33 | 1 | 0.25 | 0.1 | 0.17 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.16 |
| 3 | 1.86 | 1.47 | 1.38 | 0.84 | 1.25 | 1.43 | 0.96 | 1.66 | 1.65 | 1.7 | 1.5 | 1.97 | 1.53 | 0.86 |
| 4 | 1.71 | 1.53 | 1.34 | 0.96 | 1.44 | 1.43 | 1 | 1.5 | 1.46 | 1.92 | 1.68 | 2.18 | 2.03 | 2.55 |
| 5 | 1.66 | 1.55 | 1.47 | 0.95 | 1.46 | 1.45 | 1 | 1.93 | 1.37 | 1.93 | 1.81 | 2.06 | 1.88 | 1.69 |
| 6 | 1.53 | 1.4 | 1.75 | 1.15 | 1.41 | 1.4 | 0.9 | 2 | 1.88 | 1.95 | 1.86 | 1.79 | 1.74 | 1.47 |
| 7 | 1.75 | 1.57 | 1.54 | 1.04 | 1.19 | 1.42 | 0.97 | 2.01 | 1.78 | 2.02 | 1.72 | 1.75 | 1.54 | 1.13 |
| 8 | 1.76 | 1.68 | 1.54 | 1.15 | 1.23 | 1.41 | 0.92 | 2.02 | 1.86 | 1.89 | 1.82 | 1.79 | 1.63 | 1.26 |
| 9 | 1.78 | 1.58 | 1.51 | 1.16 | 1.16 | 1.33 | 0.93 | 1.72 | 1.26 | 1.8 | 1.66 | 1.57 | 1.4 | 0.86 |
| 10 | 1.86 | 1.6 | 1.63 | 1.08 | 1.3 | 1.38 | 0.95 | 1.7 | 1.7 | 1.69 | 1.74 | 1.84 | 1.52 | 1.05 |
| 11 | 1.47 | 1.53 | 1.56 | 1.24 | 1.18 | 1.38 | 0.96 | 1.45 | 1.66 | 1.78 | 1.87 | 1.76 | 1.62 | 1.13 |
| 12 | 1.9 | 1.67 | 1.61 | 1.25 | 1.24 | 1.4 | 0.94 | 1.98 | 1.56 | 1.88 | 1.93 | 1.76 | 1.54 | 1.21 |
| 13 | 1.64 | 1.42 | 1.62 | 1.26 | 1.25 | 1.33 | 0.94 | 1.9 | 1.3 | 1.63 | 1.52 | 1.4 | 1.21 | 0.58 |
| 14 | 1.79 | 1.62 | 1.62 | 1.55 | 1.31 | 1.35 | 0.94 | 1.65 | 1.49 | 1.57 | 1.61 | 1.38 | 1.3 | 0.69 |
| 15 | 1.74 | 1.74 | 1.68 | 1.32 | 1.26 | 1.36 | 0.95 | 1.79 | 1.67 | 1.69 | 1.64 | 1.63 | 1.43 | 0.83 |
| 16 | 1.59 | 1.64 | 1.65 | 1.31 | 1.29 | 1.37 | 0.94 | 1.52 | 1.58 | 1.8 | 1.86 | 1.66 | 1.41 | 0.88 |
| 17 | 1.65 | 1.51 | 1.7 | 1.58 | 1.34 | 1.37 | 0.97 | 1.4 | 1.27 | 1.53 | 1.77 | 1.79 | 1.44 | 0.99 |
| 18 | 1.72 | 1.56 | 1.63 | 1.6 | 1.32 | 1.31 | 0.92 | 1.85 | 1.59 | 1.37 | 1.47 | 1.39 | 1.27 | 0.69 |
| 19 | 1.56 | 1.6 | 1.67 | 1.62 | 1.31 | 1.31 | 0.96 | 1.05 | 0.91 | 1.1 | 1.53 | 1.43 | 1.12 | 0.42 |
| 20 | 1.63 | 1.47 | 1.58 | 1.61 | 1.34 | 1.34 | 0.95 | 1.6 | 1.13 | 1.59 | 1.81 | 1.57 | 1.31 | 0.77 |
| 21 | 1.61 | 1.56 | 1.66 | 1.74 | 1.35 | 1.34 | 0.96 | 1.84 | 1.47 | 1.65 | 1.52 | 1.53 | 1.42 | 0.73 |
| 22 | 1.67 | 1.59 | 1.74 | 1.64 | 1.35 | 1.3 | 0.95 | 1.57 | 1.28 | 1.41 | 1.81 | 1.75 | 1.4 | 0.85 |
| 23 | 1.49 | 1.6 | 1.68 | 1.64 | 1.32 | 1.3 | 0.93 | 1.25 | 0.81 | 1.14 | 1.68 | 1.48 | 1.23 | 0.83 |
| 24 | 1.72 | 1.59 | 1.68 | 1.64 | 1.38 | 1.3 | 0.95 | 1.5 | 1.38 | 1.69 | 1.75 | 1.49 | 1.39 | 0.61 |
| 25 | 1.73 | 1.68 | 1.62 | 1.57 | 1.27 | 1.35 | 0.93 | 1.25 | 1.58 | 1.81 | 1.92 | 1.7 | 1.48 | 0.94 |
| 26 | 1.83 | 1.54 | 1.69 | 1.58 | 1.49 | 1.39 | 0.91 | 2.51 | 1.84 | 1.8 | 1.68 | 1.62 | 1.42 | 1.11 |
| 27 | 1.69 | 1.58 | 1.61 | 1.27 | 1.43 | 1.37 | 0.92 | 1.84 | 1.76 | 2.15 | 1.76 | 1.7 | 1.6 | 1.28 |
| 28 | 1.57 | 1.53 | 1.62 | 1.43 | 1.4 | 1.38 | 0.93 | 1.87 | 1.8 | 1.9 | 1.91 | 1.76 | 1.55 | 1.3 |
| 29 | 1.45 | 1.42 | 1.71 | 1.72 | 1.55 | 1.35 | 0.85 | 1.98 | 1.94 | 1.76 | 1.68 | 1.52 | 1.22 | 0.91 |
| 30 | 1.67 | 1.57 | 1.63 | 1.62 | 1.42 | 1.34 | 0.95 | 1.01 | 1.18 | 1.51 | 1.55 | 1.53 | 1.07 | 0.61 |
| 31 | 1.65 | 1.45 | 1.66 | 1.66 | 1.59 | 1.39 | 0.97 | 0.87 | 1.35 | 1.73 | 1.87 | 1.66 | 1.21 | 0.89 |
| 32 | 1.52 | 1.56 | 1.67 | 1.64 | 1.35 | 1.38 | 1 | 1.49 | 1.3 | 1.6 | 1.83 | 1.73 | 1.34 | 0.84 |
| 33 | 1.57 | 1.52 | 1.71 | 1.68 | 1.44 | 1.4 | 1 | 1.03 | 1.08 | 1.68 | 1.73 | 1.79 | 1.41 | 0.88 |
| 34 | 1.68 | 1.37 | 1.58 | 1.48 | 1.43 | 1.43 | 0.98 | 1.99 | 1.51 | 1.91 | 2.01 | 1.96 | 1.57 | 1.11 |
| 35 | 1.31 | 1.53 | 1.64 | 1.62 | 1.52 | 1.46 | 0.98 | 1.67 | 1.77 | 2.02 | 1.86 | 1.84 | 1.58 | 1.15 |

Таблиця 4. Значення T30 та EDT, що виміряні (джерело звуку - існуюча система звукопідсилення)

| Точка вимір. | T30 | | | | | | | EDT | | | | | | |
|--------------|-------|------|-------|------|------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | F, Hz | | | | | | | F, Hz | | | | | | |
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| 1 | 2.16 | 1.2 | 1.127 | 1.29 | 1.25 | 1.24 | 1.01 | 1.35 | 1.65 | 0.71 | 1.73 | 1.74 | 1.68 | 1.25 |
| 2 | 1.85 | 1.57 | 1.63 | 1.65 | 1.52 | 1.4 | 1.01 | 1.42 | 1.3 | 1.73 | 1.73 | 1.78 | 1.51 | 0.5 |
| 3 | 2 | 1.51 | 1.65 | 1.6 | 1.58 | 1.37 | 1.05 | 2.6 | 1.83 | 1.67 | 1.77 | 1.62 | 1.37 | 0.98 |
| 4 | 2.2 | 1.59 | 1.62 | 1.61 | 1.51 | 1.37 | 1.04 | 1.95 | 1.6 | 1.8 | 1.56 | 1.56 | 1.38 | 1.02 |
| 5 | 1.94 | 1.46 | 1.69 | 1.64 | 1.55 | 1.36 | 1.05 | 1.99 | 1.74 | 1.5 | 1.54 | 1.59 | 1.38 | 0.97 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 6 | 1.82 | 1.45 | 1.69 | 1.62 | 1.59 | 1.36 | 1.02 | 1.44 | 1.99 | 1.69 | 1.69 | 1.62 | 1.38 | 1.01 |
| 7 | 1.17 | 1.1 | 1.64 | 1.73 | 1.56 | 1.37 | 1.05 | 1.43 | 1.64 | 1.59 | 1.41 | 1.65 | 1.29 | 0.95 |
| 8 | 1.89 | 1.47 | 1.62 | 1.6 | 1.57 | 1.37 | 1.05 | 1.99 | 1.57 | 1.74 | 1.64 | 1.6 | 1.37 | 0.98 |
| 9 | 1.86 | 1.41 | 1.57 | 1.58 | 1.57 | 1.36 | 1.06 | 2.26 | 1.82 | 1.57 | 1.37 | 1.58 | 1.45 | 1.04 |
| 10 | 1.81 | 1.58 | 1.7 | 1.63 | 1.58 | 1.36 | 1.04 | 1.57 | 1.52 | 1.49 | 1.58 | 1.6 | 1.29 | 0.95 |
| 11 | 1.94 | 1.52 | 1.64 | 1.61 | 1.55 | 1.35 | 1.04 | 1.42 | 1.7 | 1.62 | 1.71 | 1.48 | 1.4 | 0.94 |
| 12 | 1.9 | 1.49 | 1.69 | 1.65 | 1.52 | 1.35 | 1.04 | 1.92 | 1.57 | 1.59 | 1.72 | 1.66 | 1.33 | 0.97 |
| 13 | 1.61 | 1.51 | 1.63 | 1.66 | 1.55 | 1.35 | 1.06 | 1.89 | 1.85 | 1.85 | 1.6 | 1.54 | 1.37 | 0.95 |
| 14 | 1.96 | 1.54 | 1.6 | 1.68 | 1.58 | 1.36 | 1.06 | 2.11 | 1.64 | 1.78 | 1.66 | 1.63 | 1.38 | 0.96 |
| 15 | 1.92 | 1.62 | 1.57 | 1.61 | 1.53 | 1.39 | 1.06 | 1.37 | 1.33 | 1.63 | 1.62 | 1.67 | 1.38 | 0.96 |
| 16 | 1.83 | 1.47 | 1.59 | 1.61 | 1.55 | 1.36 | 1.04 | 1.69 | 1.6 | 1.64 | 1.66 | 1.62 | 1.37 | 0.9 |
| 17 | 1.94 | 1.51 | 1.58 | 1.59 | 1.54 | 1.36 | 1.06 | 1.04 | 1.65 | 1.68 | 1.7 | 1.57 | 1.31 | 0.88 |
| 18 | 1.85 | 1.51 | 1.68 | 1.64 | 1.53 | 1.36 | 1.05 | 1.74 | 1.17 | 1.6 | 1.72 | 1.53 | 1.29 | 0.93 |
| 19 | 1.94 | 1.5 | 1.75 | 1.62 | 1.56 | 1.35 | 1.06 | 1.82 | 1.87 | 1.68 | 1.73 | 1.5 | 1.33 | 0.93 |
| 20 | 1.74 | 1.51 | 1.65 | 1.67 | 1.56 | 1.38 | 1.06 | 1.39 | 1.34 | 1.67 | 1.67 | 1.65 | 1.32 | 1.02 |
| 21 | 1.79 | 1.46 | 1.73 | 1.62 | 1.59 | 1.37 | 1.05 | 1.84 | 1.65 | 1.64 | 1.71 | 1.6 | 1.35 | 0.98 |
| 22 | 1.51 | 1.46 | 1.54 | 1.6 | 1.52 | 1.38 | 1.05 | 1.48 | 1.45 | 1.79 | 1.67 | 1.59 | 1.3 | 0.96 |
| 23 | 1.85 | 1.59 | 1.6 | 1.63 | 1.55 | 1.37 | 1.05 | 1.75 | 1.13 | 1.82 | 1.7 | 1.59 | 1.2 | 0.94 |
| 24 | 1.78 | 1.51 | 1.62 | 1.65 | 1.56 | 1.37 | 1.05 | 2.01 | 1.5 | 1.7 | 1.66 | 1.54 | 1.31 | 1.01 |
| 25 | 1.79 | 1.6 | 1.64 | 1.64 | 1.62 | 1.38 | 1.06 | 1.64 | 1.31 | 1.72 | 1.69 | 1.57 | 1.3 | 1.05 |
| 26 | 1.91 | 1.45 | 1.6 | 1.62 | 1.55 | 1.36 | 1.06 | 1.67 | 1.57 | 1.67 | 1.71 | 1.68 | 1.21 | 0.93 |
| 27 | 1.79 | 1.54 | 1.7 | 1.57 | 1.52 | 1.36 | 1.04 | 1.72 | 1.45 | 1.62 | 1.68 | 1.63 | 1.31 | 1.05 |
| 28 | 2.17 | 1.59 | 1.67 | 1.61 | 1.56 | 1.38 | 1.05 | 1.89 | 1.22 | 1.58 | 1.79 | 1.65 | 1.25 | 0.98 |
| 29 | 1.78 | 1.54 | 1.57 | 1.59 | 1.54 | 1.37 | 1.07 | 1.78 | 1.54 | 1.75 | 1.6 | 1.62 | 1.3 | 0.98 |
| 30 | 2.43 | 1.43 | 1.72 | 1.58 | 1.6 | 1.05 | 1.06 | 1.71 | 1.85 | 1.65 | 1.68 | 1.62 | 1.36 | 0.88 |
| 31 | 1.71 | 1.6 | 1.63 | 1.24 | 0.91 | 0.5 | 0.47 | 1.64 | 1.77 | 1.75 | 1.61 | 1.38 | 1 | 0.72 |
| 32 | 1.14 | 1.46 | 1.59 | 1.21 | 1.06 | 0.7 | 0.5 | 1.6 | 1.65 | 1.8 | 1.47 | 1.37 | 1.14 | 0.62 |
| 33 | 1.74 | 1.46 | 1.57 | 1.15 | 1.62 | 1.44 | 1.06 | 1.06 | 1.58 | 1.54 | 1.65 | 1.61 | 1.36 | 0.89 |
| 34 | 2.18 | 1.55 | 1.77 | 1.67 | 1.58 | 1.44 | 1.05 | 1.22 | 1.55 | 1.59 | 1.49 | 1.62 | 1.35 | 0.81 |
| 35 | 3.41 | 2.2 | 1.5 | 1.39 | 0.98 | 0.65 | 0.54 | 1.52 | 2 | 1.61 | 1.59 | 1.43 | 1.08 | 0.79 |

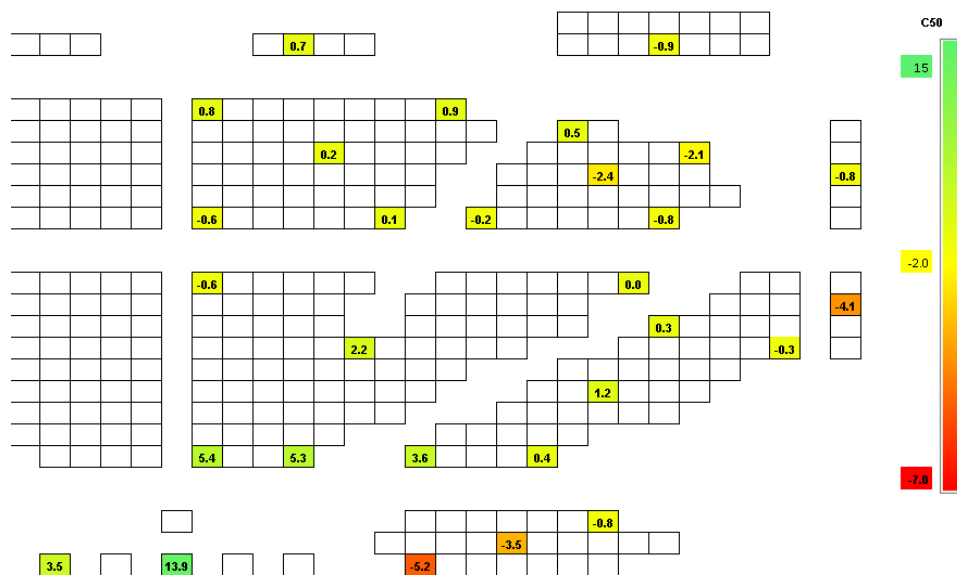


Рис. 9. Показник мовної ясності C_{50} на першому поверсі залу (джерело звуку - тестова акустична система)

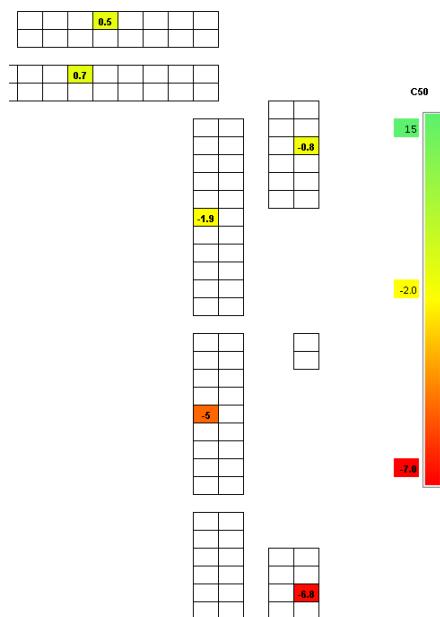


Рис. 10. Показник мовної ясності C_{50} на балконі (джерело звуку - тестова акустична система)

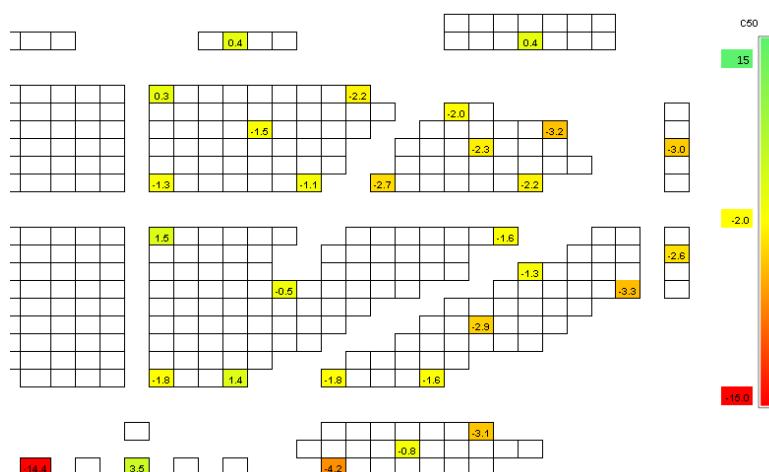


Рис. 11. Показник мовної ясності C_{50} на першому поверсі залу (джерело звуку - існуюча система озвучування)

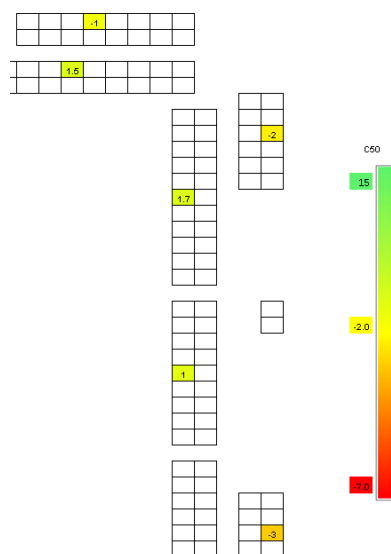


Рис. 12. Показник мовної ясності C_{50} на балконі (джерело звуку - існуюча система озвучування)

У табл. 5–6 для двох варіантів розрахунку мовної яскості C_{50} та показника яскості прямого представлени виміряні значення частотної залежності звуку C_7 для всіх 35 точок вимірювання.

Таблиця 5. Показник мовної яскості C_{50} та яскості прямого звуку C_7 (джерело звуку - ненаправлене)

| Точка вимір. | C_{50} | | | | | | | C_7 | | | | | | |
|-----------------|----------------|------|------|------|------|------|------|----------------|------|------|------|------|------|------|
| | F, Hz | | | | | | | F, Hz | | | | | | |
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| 1 | 2.8 | 5.9 | 3.8 | 3.5 | 0.9 | 1.7 | 1 | -12 | -3.9 | -0.6 | -2.4 | -2.8 | -2.5 | -2.9 |
| 2 | 10.4 | 13.4 | 13.4 | 13.9 | 13.8 | 12.7 | 14.8 | -14 | -0.5 | 2.3 | 6 | 5.8 | 6 | 8.6 |
| 3 | 0.9 | 3.2 | 2.2 | 5.4 | 5.7 | 7.9 | 9.3 | -20 | -3.4 | -0.9 | 3 | 3.9 | 4.5 | 4.6 |
| 4 | -1.3 | 4.7 | 1.7 | 5.3 | 4.2 | 5.7 | 8.4 | -18 | -2.6 | -1.3 | 3.9 | 2.8 | 4.1 | 7.1 |
| 5 | -0.8 | 4.2 | 1.4 | 3.6 | 3.6 | 4.8 | 7.7 | -16 | -5.2 | -2.3 | 1 | 1.9 | 2.1 | 4.3 |
| 6 | 0.1 | 2.5 | 0.1 | 0.4 | -0.9 | 1.2 | 2.3 | -14 | -8.1 | -4 | -2.1 | -3.3 | -0.5 | 0.1 |
| 7 | -2.6 | -1.7 | -1.5 | 2.2 | 1.5 | 1.8 | 4.7 | -25 | -5.8 | -3.4 | 1 | 0.5 | 0.2 | 3.4 |
| 8 | -1.1 | -0.6 | -0.6 | 1.2 | -0.4 | -0.4 | 2.1 | -16 | -11 | -2.9 | -0.6 | -1.7 | -2.2 | 0.3 |
| 9 | -10 | -4.9 | -3.2 | -0.6 | 0.7 | 0.9 | 2.9 | -26 | -8.5 | -5.4 | -2.3 | -0.9 | -2 | 1.1 |
| 10 | -5.8 | -4 | -2 | 0 | 0.1 | -0.8 | 2.6 | -22 | -8.9 | -5.4 | -2.1 | -2.1 | -3.5 | 0.7 |
| 11 | -3.2 | -3.6 | -2 | 0.3 | 0.8 | -0.8 | 2.8 | -21 | -9.4 | -5.6 | -2.2 | -1.5 | -3.5 | 0.5 |
| 12 | -2 | -1.6 | -2.8 | -0.3 | 0.4 | -1.4 | 1.4 | -18 | -14 | -5.4 | -2.6 | -1.9 | -4 | -0.9 |
| 13 | -5.3 | -4.6 | -3.3 | -0.6 | 2.5 | 1.3 | 4.1 | -23 | -12 | -7.5 | -3.1 | -1.2 | -4.5 | -1.4 |
| 14 | -7.1 | -2.3 | -1.1 | 0.1 | 2.4 | 1 | 4.9 | -22 | -10 | -9.5 | -5.2 | -2.2 | -4.9 | -0.9 |
| 15 | -3.7 | -3 | -2.3 | -0.2 | 1.7 | 0.4 | 3.8 | -26 | -9 | -7.5 | -3.7 | -1.3 | -4.2 | 0 |
| 16 | -5.9 | -2.9 | -2.3 | -0.8 | 0.2 | -1.2 | 3.5 | -23 | -11 | -6.7 | -4.2 | -3.3 | -6.4 | -1.4 |
| 17 | -5.5 | -3.8 | -3.6 | -2.4 | 1.3 | -1.1 | 4.2 | -23 | -14 | -9.6 | -5.3 | -2.3 | -6.3 | -1.3 |
| 18 | -1.9 | -1.2 | -2.7 | 0.2 | 2.8 | 2.4 | 5.5 | -24 | -12 | -11 | -5.9 | -3.3 | -4.9 | -2.6 |
| 19 | -5 | -2.3 | 1.1 | 0.8 | 3.5 | 4.1 | 7.7 | -21 | -14 | -12 | -7.5 | -4.1 | -4.9 | -4.7 |
| 20 | -5.6 | -2.8 | -0.7 | 0.9 | 2.7 | 2 | 5.6 | -22 | -14 | -12 | -7.2 | -3.6 | -7.2 | -4.2 |
| 21 | -3.7 | -2.7 | -1.3 | 0.5 | 1.9 | 1.8 | 5.6 | -22 | -13 | -9.2 | -7.2 | -3.6 | -5.6 | -2.1 |
| 22 | -3.3 | -4.4 | -4.2 | -2.1 | 1.1 | 0.5 | 4.3 | -21 | -15 | -12 | -6.7 | -3.5 | -6.5 | -2 |
| 23 | -7.5 | -1 | 0.4 | 0.7 | 2.2 | 3 | 5.7 | -27 | -18 | -14 | -7.2 | -3.1 | -4.5 | -2.8 |
| 24 | -3.8 | 0.2 | -1.1 | -0.9 | 2.7 | 1.6 | 6.7 | -22 | -13 | -13 | -6.6 | -3.6 | -6.7 | -3.3 |
| 25 | -5.4 | -3.5 | -1.7 | -0.8 | 0.1 | -0.6 | 3.1 | -18 | -13 | -8.7 | -4.9 | -3.9 | -7 | -4.1 |
| 26 | 0.3 | -1.4 | -0.8 | -4.1 | -5 | -3.9 | -0.5 | -12 | -11 | -7.9 | -11 | -9.9 | -8.3 | -4.3 |
| 27 | -5.6 | -1.5 | -2.5 | -0.8 | -3.8 | -2.5 | -1.2 | -16 | -5.7 | -7.6 | -4.6 | -7.8 | -6.1 | -4 |
| 28 | -2.9 | -0.8 | -3.5 | -3.5 | -5.8 | -4.9 | -1.9 | -18 | -8.4 | -9.1 | -11 | -10 | -9.1 | -7.3 |
| 29 | 0.2 | -3.1 | -3.9 | -5.2 | -5.2 | -5.2 | -3.4 | -13 | -14 | -17 | -23 | -23 | -23 | -5.6 |
| 30 | 1.2 | -2 | -0.8 | 0.7 | 2.3 | 2.8 | 4.5 | -20 | -8.3 | -11 | -6.9 | -6.1 | -5.4 | -3.3 |
| 31 | 0.2 | -0.3 | -1.4 | 0.5 | 1.2 | 2.4 | 4.9 | -20 | -8 | -9.5 | -5.5 | -4.1 | -3.5 | -1.5 |
| 32 | -3.8 | -3.4 | -0.8 | -0.8 | 1.2 | 1.2 | 4.2 | -19 | -11 | -8.9 | -6.1 | -2.5 | -3.3 | -1.2 |
| 33 | -2.3 | -2 | -0.4 | -1.9 | 0.1 | 1.2 | 4 | -24 | -9.7 | -8.9 | -7.8 | -4.4 | -4.9 | -1.2 |
| 34 | -2.9 | -4.7 | -3.5 | -5 | -4.4 | -1.7 | -0.9 | -17 | -13 | -8.3 | -9.8 | -8.6 | -4.7 | -2.9 |
| 35 | -11 | -4.8 | -5.8 | -6.8 | -5.7 | -1.8 | -2.4 | -22 | -13 | -12 | -12 | -8.9 | -3.8 | -5.6 |

Таблиця 6. Показник мовної яскості C_{50} та яскості прямого звуку C_7 (джерело звуку - існуюча система озвучування)

| Точка вимір. | C_{50} | | | | | | | C_7 | | | | | | |
|-----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| | F, Hz | | | | | | | F, Hz | | | | | | |
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
| 1 | -14.6 | -15.3 | -13.5 | -14.4 | -14.3 | -14.3 | -14.1 | -24.6 | -25.1 | -27.6 | -26.6 | -25 | -23.6 | -23 |
| 2 | -6.1 | -2.6 | -1 | 3.5 | 0.1 | 5.5 | 8.3 | -14 | -8.1 | -3.6 | 1.5 | -3.3 | 2.1 | 4.6 |

Кінець Таблиці 6.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| 3 | -10.1 | -1.7 | -1 | -1.8 | 0.1 | -2.9 | -1.1 | -21.9 | -13.9 | -10 | -6.3 | -2.5 | -9.7 | -8.3 |
| 4 | -9.7 | -2.2 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | -1.2 | -0.2 | -19.5 | -13.4 | -7.3 | -1.8 | -1 | -5 | -5.4 |
| 5 | -7.7 | -2.1 | -0.2 | -1.8 | 0 | -2 | 0.1 | -22.8 | -13.5 | -8.7 | -6.2 | -2.9 | -6.8 | -8 |
| 6 | -11.2 | -2.7 | 0 | -1.6 | -0.1 | -0.6 | 0.8 | -23.1 | -13.4 | -11.6 | -4.5 | -3.7 | -4 | -6.2 |
| 7 | -7.8 | 1.7 | 0 | -0.5 | -1 | -2 | -1.6 | -30.2 | -23.8 | -17.7 | -16.3 | -17 | -13.9 | -22 |
| 8 | -4.6 | 1.9 | 0.9 | -2.9 | -1.9 | -1.6 | 0.3 | -14.3 | -14.1 | -3.4 | -11.1 | -8 | -7.8 | -8.8 |
| 9 | -10.5 | -1.3 | 0.8 | 1.5 | 0.3 | -0.9 | -1.3 | -19.2 | -12.3 | -7.3 | -6.5 | -5.6 | -8.2 | -9.7 |
| 10 | -6.3 | 0.4 | 0.7 | -1.6 | 0.6 | -1.9 | -1.2 | -15.6 | -14.7 | -9.1 | -7.7 | -4.1 | -10 | -13 |
| 11 | -8.3 | -2.4 | -0.4 | -1.3 | -1.6 | -1.7 | -0.9 | -22.3 | -20.6 | -17.4 | -15.9 | -14 | -14.2 | -14 |
| 12 | -8.6 | -2 | -2 | -3.3 | -2 | -1.5 | -0.7 | -17.2 | -15.7 | -14.1 | -17.5 | -11 | -14.4 | -16 |
| 13 | -2.6 | -0.1 | -2.4 | -1.3 | -1.3 | -0.6 | -0.3 | -23.1 | -15.7 | -22.4 | -19.6 | -21 | -21 | -29 |
| 14 | -3 | 2.6 | -1.8 | -1.1 | -0.4 | -0.2 | 0.7 | -13.9 | -10.5 | -10.1 | -7.9 | -5 | -8.2 | -9.8 |
| 15 | -2.9 | 2.5 | 0.7 | -2.7 | -0.9 | -0.5 | 0.8 | -21.4 | -14.9 | -16.4 | -20.4 | -18 | -17.7 | -27 |
| 16 | -4.2 | -1.9 | -0.9 | -2.2 | -0.1 | -1.4 | 0.8 | -26.9 | -13.1 | -17.6 | -17.5 | -22 | -24 | -26 |
| 17 | -0.3 | -2.3 | 1.6 | -2.3 | -1.9 | -0.9 | 1.1 | -20.5 | -19.7 | -12.2 | -15.5 | -18 | -12.3 | -16 |
| 18 | -2.2 | 1.9 | 0.5 | -1.5 | 0.5 | 0.2 | 1.8 | -22.6 | -16.1 | -17.4 | -8.5 | -7.7 | -13 | -12 |
| 19 | -1.6 | 1.4 | 1.6 | 0.3 | 0.1 | 0 | 1.7 | -17.2 | -11.1 | -4.3 | -6.5 | -5.4 | -8.8 | -10 |
| 20 | -2.4 | -3.6 | 1.3 | -2.2 | -2.8 | -0.1 | 1.4 | -13.4 | -17.2 | -20.3 | -15.5 | -15 | -14.9 | -19 |
| 21 | -0.4 | -1 | 1.6 | -2 | 0 | 0.1 | 0.7 | -17.4 | -16.2 | -21.4 | -18.3 | -14 | -16.3 | -19 |
| 22 | 0.1 | -1.9 | -1.5 | -3.2 | -2 | 0.1 | 0.7 | -14.2 | -15.3 | -7.2 | -16.5 | -13 | -10.2 | -14 |
| 23 | -2.8 | 6 | 1.2 | 0.4 | 0.8 | 3 | 3.9 | -15.1 | -11.2 | -9.2 | -9.2 | -9 | -15.3 | -13 |
| 24 | -0.3 | 2.3 | 0.5 | 0.4 | 1.1 | 2 | 2.2 | -17.5 | -20.2 | -21.6 | -22.7 | -24 | -24.5 | -28 |
| 25 | -4.6 | -1.5 | 1.3 | -3 | -1.5 | 1.2 | 1 | -19.3 | -18.8 | -8.4 | -18.4 | -19 | -18 | -26 |
| 26 | -5.5 | -4.6 | -1.7 | -2.6 | -1 | 2.6 | 2 | -24.2 | -22.4 | -11.3 | -11 | -6.5 | -3.3 | -33 |
| 27 | -4.9 | -3.7 | -3.7 | -3.1 | -2.3 | -1.3 | 2.9 | -21.8 | -30.7 | -20.6 | -16.9 | -9.5 | -24.1 | -25 |
| 28 | -3.7 | -1.3 | -6.2 | -0.8 | -1 | 3.5 | 3.1 | -13.8 | -22.3 | -23.5 | -6.7 | -25 | -26.6 | -27 |
| 29 | -4.3 | -2.2 | -6.5 | -4.2 | -2.3 | -0.1 | 1.7 | -14.1 | -23.7 | -23.6 | -26.5 | -27 | -27.2 | -30 |
| 30 | 1.5 | -2.9 | 0.1 | 1.5 | -3 | 1 | 5.1 | -17.9 | -20.7 | -5.8 | -4.6 | -10 | -3 | -2.2 |
| 31 | 0.2 | -4.7 | -1.5 | -0.7 | -2.4 | -0.5 | 3.4 | -19.3 | -21.8 | -7.3 | -10.1 | -8.4 | -5.3 | -2.6 |
| 32 | -2.4 | -6.6 | 0.9 | -2.3 | -2.4 | 0.5 | 3.8 | -19 | -19.1 | -5.2 | -10.6 | -9.5 | -3.8 | -3.2 |
| 33 | 2.7 | -6.6 | -0.6 | 1.7 | -2 | 1.1 | 2.4 | -17.9 | -19.4 | -8 | -3.2 | -7.3 | -2.9 | -37 |
| 34 | -0.5 | -4.6 | -1.5 | 1 | -2 | 0.4 | 4.8 | -17.3 | -18 | -7.7 | -3.9 | -8.8 | -31.7 | -1 |
| 35 | -4.6 | -8.9 | -3.1 | -3 | -1.6 | 0 | 3.8 | -24 | -23.4 | -14.4 | -11 | -5.6 | -3.7 | -2.2 |

Показник мовної ясності відображає співвідношення енергії, що приходить на місце прослуховування (місце знаходження учасника засідання) до 50 мс до енергії, що приходить після 50 мс. Таким чином, чим вище енергія ранніх віддзеркалень та прямого звука, тим вище розбірливість мовного контенту.

На рис. 9–12 наочно простежується тенденція зміни показника ясності, що дає можливість оцінити співвідношення енергій, що приходять на місця знаходження учасників засідання та зробити висновки:

1) при акустичному варіанті практично на всіх точках вимірювання спостерігається значення C_{50} , яке

перевищує граничне значення -2 дБ, що цілком може забезпечити ясність складу вище 95%.

На рис. 9–10 представлені значення C_{50} на частоті 1000 Гц, а аналіз результатів табл. 5 показує, що і частотах від 1000 Гц до 8000 Гц отримані значення задовольняють вимогу перевищення рівня -2 дБ, а саме в цій області лежать спектри приголосних, що несуть смислове навантаження в мовному контенті. Спостерігається зниження показника в області низьких частот, що при підвищеному часі реверберації може призвести до зниження загальної ясності та чіткості.

При аналізі значень табл. 5 – показників прямого звуку C_7 – можна зробити висновок про те, що використання ненаправленого джерела, розташованого в районі трибун, забезпечує достатню

кількість прямого звуку, що позитивно впливає на мовну якість C_{50} . Наявність зон (точки 27, 28, 29), з переважанням звуку, що ревербує, та низькими показниками C_{50} і C_7 в цих точках, обумовлено фокусуванням звукових променів в цій області за рахунок особливостей геометрії залу та відсутністю заходів щодо додаткового звукопоглинання огорожувальними поверхнями залу.

Досить низькі значення якості отримані в бічних секторах балконів, що пояснюється розташуванням ненаправленого джерела та може бути скориговано оптимальним розміщенням джерела звукового сигналу.

При використанні в якості джерела звуку існуючу систему звукопідсилення показники мовної

якості стають гіршими (рис. 11–12), що пояснюється неоптимальним розташуванням джерел звуку та зниженням енергії прямого звуку, що підтверджується табл. 6.

Недостатня кількість енергії раннях віддзеркалень, які прийшли в передній півплощині, призводить до істотного зниження показників розбірливості. Недостатня кількість енергії прямого звуку різко знизить всі показники якості та чіткості мовного контенту і при підвищенні фонового шуму, що властиво для досліджуваного залу, під час експлуатації.

На рис. 13–16 для двох варіантів джерела звуку представлені значення відсотка артикуляційних втрат для всіх 35 точок вимірювання.

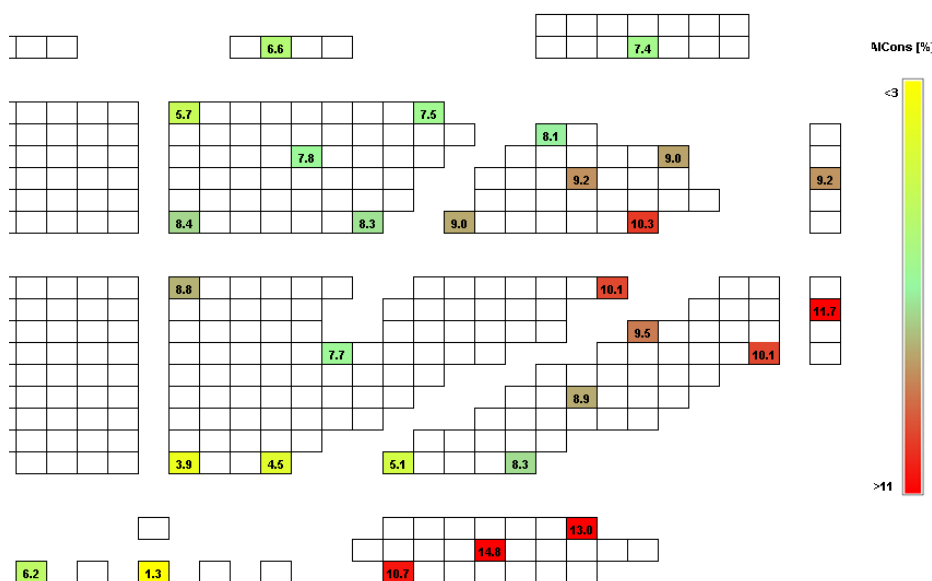


Рис. 13. Відсоток артикуляційних втрат приголосних %ALcons на першому поверсі залу (джерело звуку - тестова акустична система)

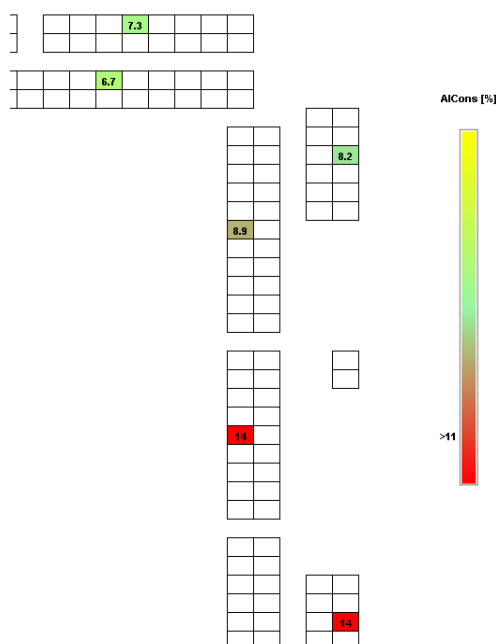


Рис. 14. Відсоток артикуляційних втрат приголосних %ALcons на балконі (джерело звуку - тестова акустична система)

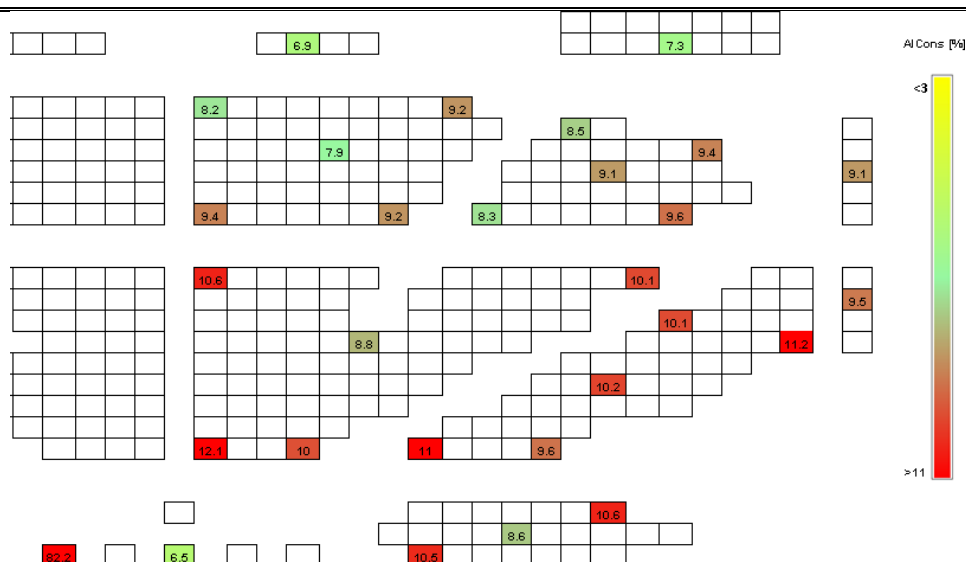


Рис. 15. Відсоток артикуляційних втрат приголосних %ALcons на першому поверсі залу (джерело звуку - існуюча система озвучування)

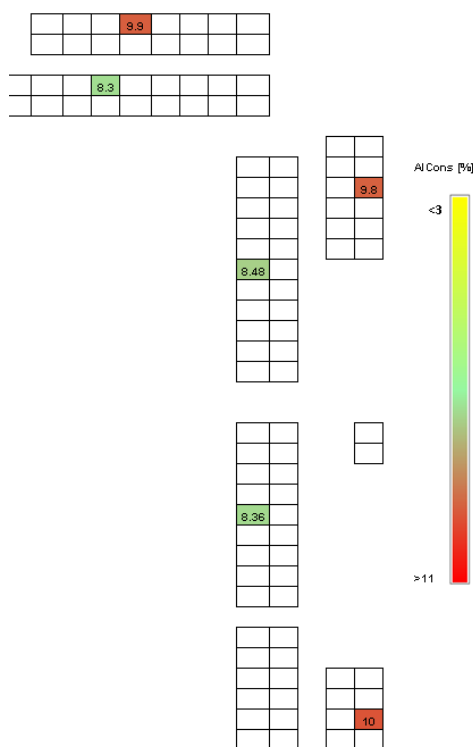


Рис. 16. Відсоток артикуляційних втрат приголосних %ALcons на балконі (джерело звуку - існуюча система озвучування)

Аналіз отриманих результатів дозволив зробити наступні висновки:

- на всіх 35 точках вимірювань, при використанні одного ненаправленого джерелі тестового сигналу, відсоток артикуляційних втрат належить діапазону за шкалою мовної ясності від "Погано" до "Добре";

- для варіанту електроакустичного розрахунку (джерело звуку-існуюча система звукопідсилення) показник %ALcons на всіх місцях знаходження учасників засідання стає ще вище, що межує з показниками за шкалою ясності "Погано".

Отримані значення %ALcons, характерні для залів з низьким рівнем прямого звуку, що

потрапляють на місця прослуховування (місця знаходження учасників засідання), невірною сформованою структурою ревербераційного процесу на місцях, низьким звукопоглинанням огорожувальних поверхонь, відсутністю заходів з організації структури приходу раних віддзеркалень.

На рис. 17-20 для двох варіантів розрахунку представлені значення індексу передачі мови для всіх 35 точок вимірювання. На рис. 21-24 для двох варіантів розрахунку представлені значення швидкого індексу передачі мови (RASTI) для всіх 35 точок вимірювання.

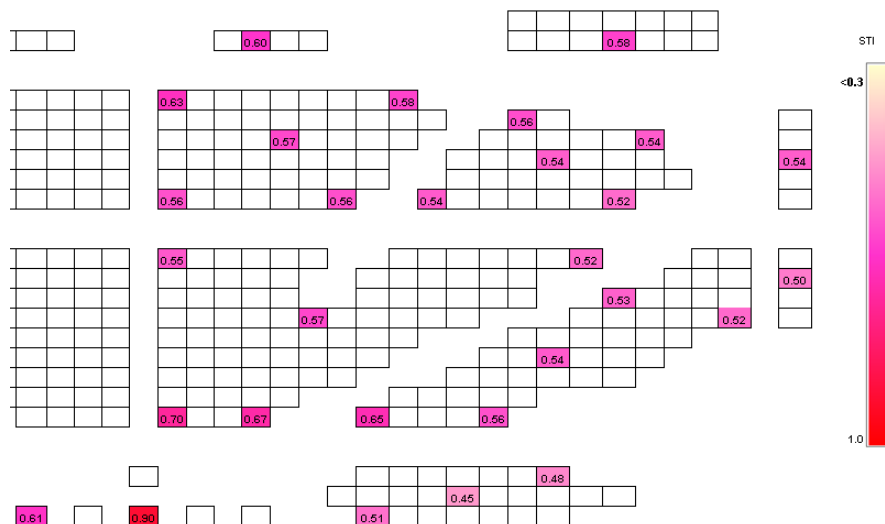


Рис. 17. Індекс передачі мови STI на першому поверсі залу (джерело звуку - тестова акустична система)

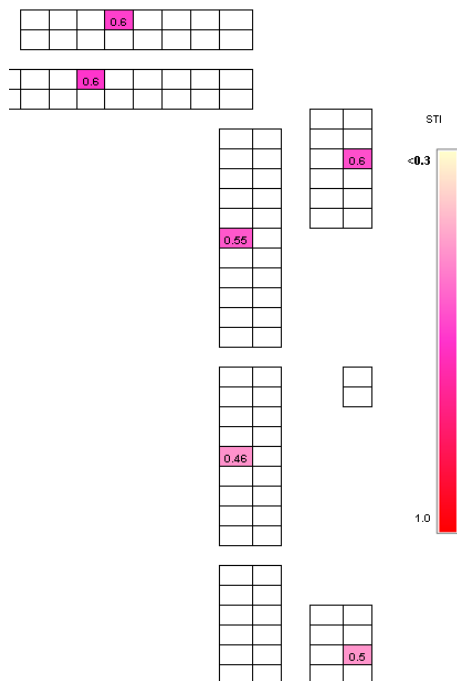


Рис. 18. Індекс передачі мови STI на балконі (джерело звуку - тестова акустична система)

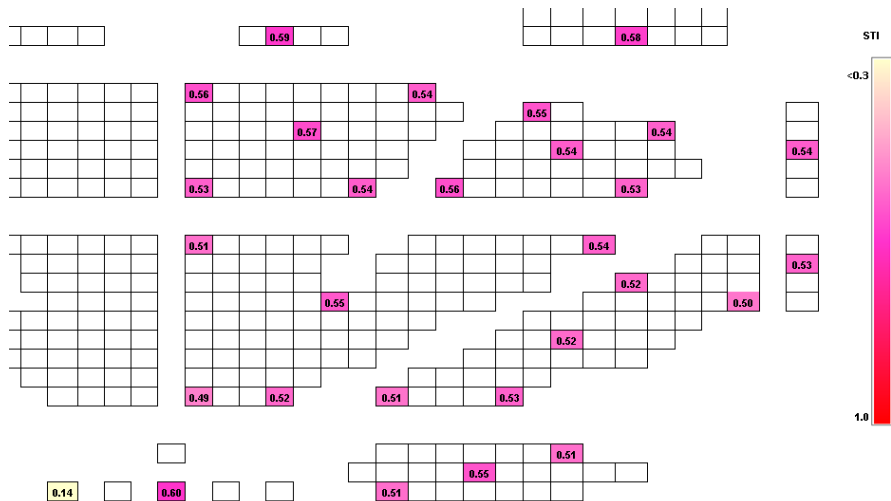


Рис. 19. Індекс передачі мови STI на першому поверсі залу (джерело звуку - існуюча система озвучування)

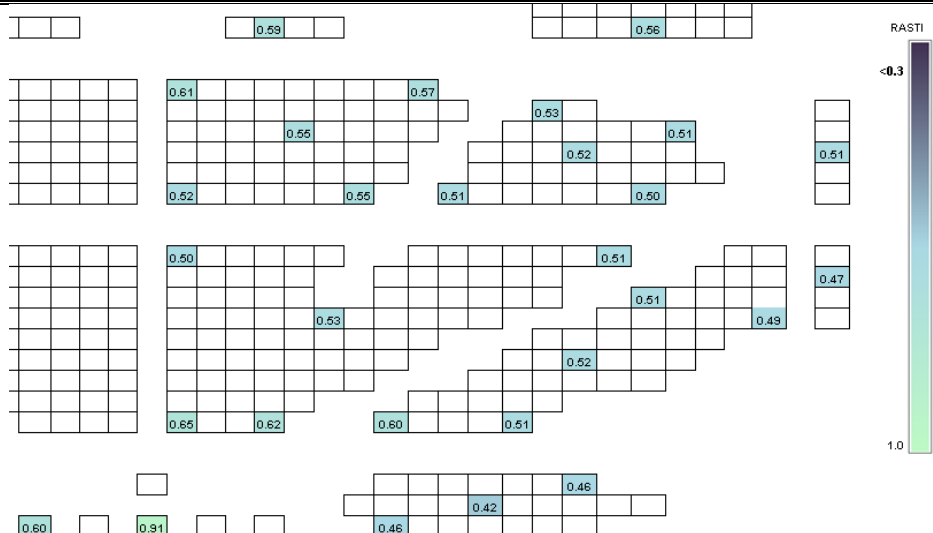


Рис. 23. Індекс передачі мови RASTI на першому поверсі залу (джерело звуку - існуюча система озвучування)

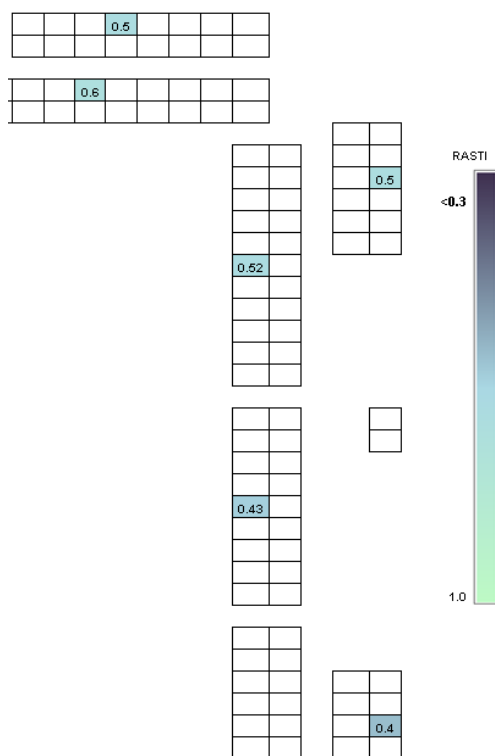


Рис. 24. Індекс передачі мови RASTI на балконі (джерело звуку - існуюча система озвучування)

Аналіз, отриманих в результаті вимірювань та представлених на рис.17-24, значень індексу передачі мови (STI) і швидкого індексу передачі мови (RASTI) показав:

- показники складової ясності мають значення, які належать до області "Задовільно" і "Добре", що не є прийнятним для мовних залів та приміщень, де розбірливість та ясність мовного контенту має належати області значень, які відносяться до "Дуже добре" та "Відмінно" (максимальна складова ясність 96%);

- значення індексу передачі мови містить значення, які стосуються області "Слабо" та "Середньо" при включенні існуючої системи звукопідсилення та значення від "Середньо" до

"Відмінно" при використанні ненаправленого джерела. Така відмінність у показниках зумовлено тим, що на значення показників індексу передачі мови та швидкого індексу передачі мови впливає співвідношення енергії прямого звуку та енергії відбитих звуків, а також співвідношення рівнів сигнал/шум.

При використанні ненаправленого джерела на місцях знаходження учасників засідання присутня достатня кількість енергії прямого звуку, що приходить в передній півплощині, а при використанні системи звукопідсилення прямий звук від системи приходить з тилу, де роздільна здатність людського слуху низька, тому в передній півплощині звукова енергія формується завершальним відрізком

ревербераційного процесу за рахунок багаторазових перевідбиттів.

4. Загальні висновки виконання етапу акустичної експертизи

В рамках проведення четвертого етапу акустичної залу експертизи в якості першого етапу були проведені вимірювання імпульсних відгуків у 35 точках приміщення з подальшим усередненням результатів в кожній точці вимірювання (в кожній точці отримано по три імпульсних відгуки).

Оцінка параметрів звукового поля проводилася в умовах, коли в якості джерела тестових сигналів використовувалось ненаправлене джерело та коли в якості джерела виступала існуюча система звукопідсилення.

Аналіз частотних залежностей часу реверберації та раннього часу спаду дозволяє припустити, що в досліджуваному залі проведена недостатня кількість заходів щодо створення оптимальних акустичних умов якісної передачі мовного контенту:

- час реверберації в приміщенні значно перевищує оптимальний час реверберації в усьому діапазоні частот від 125 Гц до 8000 Гц, що суттєво позначається на зниженні якості відтворення мовного контенту;

- тенденція графіків частотної залежності часу реверберації також має явний підйом в області низьких частот, що має позитивний вплив на музичний контент, але призводить до зниження розбірливості мовного контенту;

- аналіз значень раннього часу спаду показує стійку тенденцію до зростання значень в середньо частотній області, що зумовлено малим поглинанням огорожувальних поверхонь та, як наслідок, зниження розрізнення та ясності звукового контенту;

- для корекції акустичних властивостей залу необхідно:

- 1) проведення заходів по заміні акустичної обробки огорожувальних поверхонь приміщення зали з можливою корекцією геометрії;

- 2) обґрунтований вибір та використання системи озвучення та конгрес системи (на заміну існуючих систем) з урахуванням особливостей геометрії залу, акустичних умов, експлуатаційних особливостей, звукового контенту.

Аналіз показників ясності та розбірливості на всіх 35 контрольних точках дозволив виявити різницю між показниками, що отримані при використанні ненаправленого джерела (акустичний варіант), та існуючої системи звукопідсилення (електроакустичний варіант), а саме:

- 1) при акустичному варіанті досліджень практично на всіх точках вимірювання спостерігається значення C_{50} , яке перевищує граничне значення -2 дБ, що цілком може забезпечити ясність складу вище 95%. Спостерігається зниження показника в області низьких частот, що при підвищеному часі реверберації призводить до зниження загальної ясності та чіткості.

- 2) аналіз показників прямого звуку C_7 (акустичний варіант) довів, що використання ненаправленого джерела, розташованого в районі трибун, забезпечує достатню кількість прямого звуку, що позитивно впливає на мовну ясність C_{50} .

Наявність зон (точки 27, 28, 29), з переважанням звуку, що реверберує, та низькими показниками C_{50} та C_7 в цих точках, обумовлено фокусуванням звукових променів в цій області за рахунок особливостей геометрії залу та відсутністю заходів щодо додаткового звукопоглинання огорожувальними поверхнями залу. Деякі особливості показників, що отримані в бічних секторах балконів, пояснюються розташуванням ненаправленого джерела та може бути скориговано оптимальним розміщенням джерела звукового сигналу.

- 3) аналіз показників розбірливості мови (акустичний варіант) підтвердив припущення про незадовільні значення чіткості мовного контенту, а саме:

- відсоток артикуляційних втрат (%ALcons) належить діапазону за шкалою мовної ясності від "Погано" до "Добре";

- показники складової ясності (індекс передачі мови STI і швидкий індекс передачі мови RASTI) мають значення, які належать до області "Задовільно" і "Добре", що не є прийнятним для мовних залів та приміщень, де розбірливість та ясність мовного контенту має належати області значень, які відносяться до "Дуже добре" та "Відмінно" (максимальна складова ясність 96%).

- 4) для підвищення показників ясності та розбірливості мовного контенту потрібно не тільки приділити увагу підвищенню звукопоглинання поверхонь, але и вжити заходів по організації структури ревербераційного процесу на місцях учасників засідання.

- 5) при електроакустичному варіанті досліджень показники мовної ясності стають набагато гіршими, що пояснюється неоптимальним розташуванням джерел звуку і, як наслідок, прямий звук від джерел приходить з тилу, де розділова здатність людського слуху низька, тому в передній півплощині звукова енергія формується завершальним відрізком ревербераційного процесу за рахунок багаторазових перевідбиттів.

Показники розбірливості мовного контенту різко погіршуються: показник %ALcons на всіх місцях учасників засідань межує з показниками за шкалою ясності "Погано"; значення індексу передачі мови (STI) містить значення, які стосуються області "Слабо" та "Середньо"; складова ясність знаходиться в межах "Добра".

Недостатня кількість енергії прямого звуку (низькі значення C_7) різко знижує всі показники ясності та чіткості мовного контенту, а при підвищенні фонового шуму, що властиво для досліджуваного залу, досягнуть критично несприятливих значень.

б) аналіз імпульсних відгуків при електроакустичному варіанті досліджень виявив ряд особливостей:

- на деяких точках вимірювання імпульсний відгук має характерні ділянки до самого імпульсу та набагато пізніше ніж сам імпульс (рис. 25-27). Наявність таких сплесків до тестового сигналу говорить наявності фону, створюваного безпосередньо

системою звукопідсилення (таких сплесків немає, коли використовується один ненаправлений джерело рис. 28). Пізні сплески енергії підтверджують висновок про наявність огорожувальних поверхонь з малим звукопоглинання (багато звуковідбивальних поверхонь досить великих розмірів). Виявлені особливості імпульсних відгуків різко знижують всі одержувані в рамках експертизи характеристики.

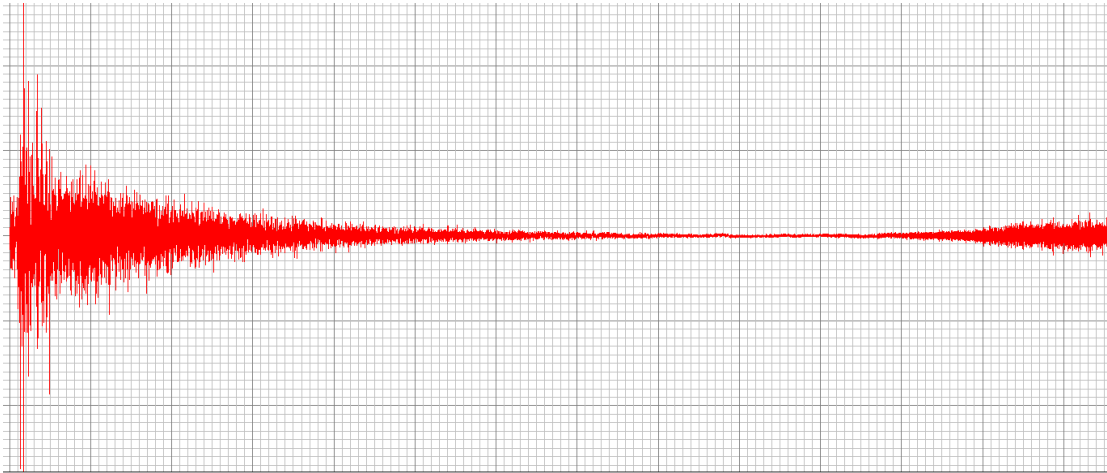


Рис. 25. Імпульсний відгук в точці вимірювання №4 (джерело звуку - існуюча система звукопідсилення)

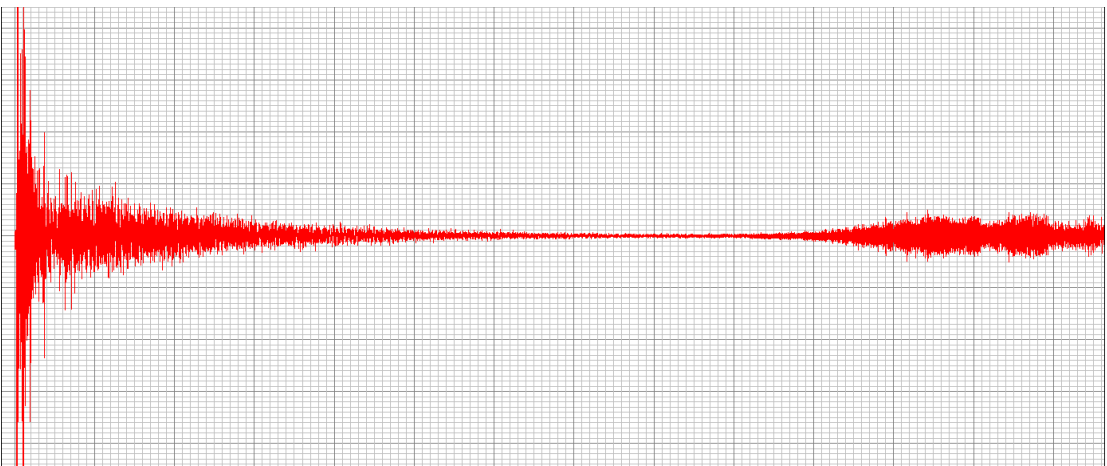


Рис. 26. Імпульсний відгук в точці вимірювання №15 (джерело звуку - існуюча система звукопідсилення)

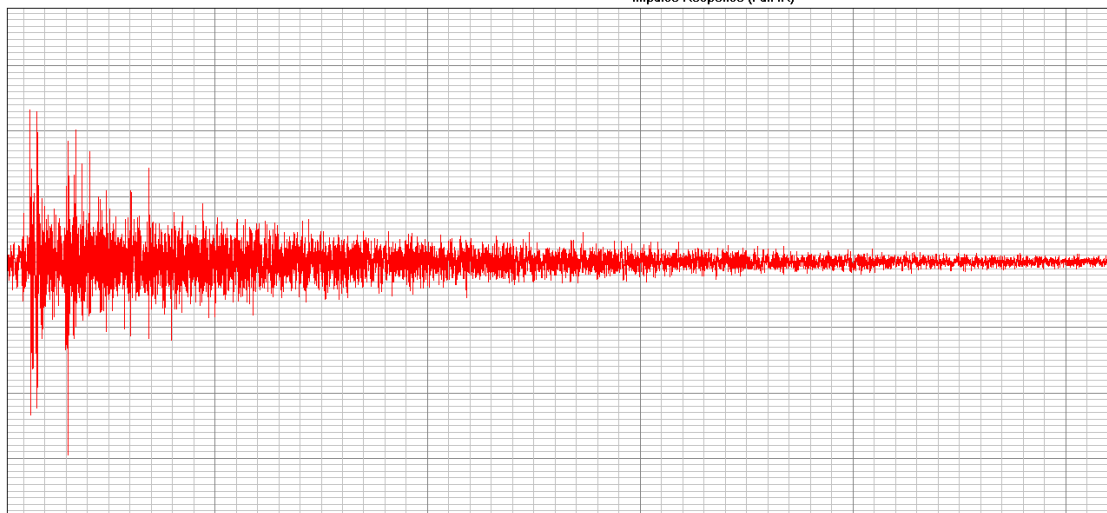


Рис. 27. Імпульсний відгук в точці вимірювання №17 (джерело звуку - існуюча система звукопідсилення)

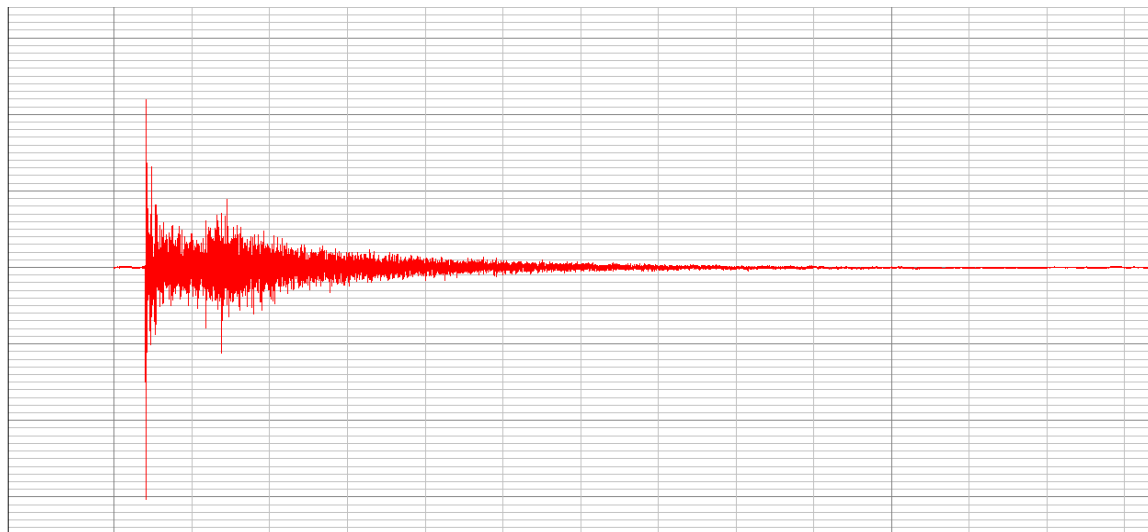


Рис. 28. Імпульсний відгук в точці вимірювання №4 (джерело звуку - ненаправленої)

7) для створення оптимальних акустичних умов якісної передачі мовного контенту від спікерів до учасників засідання недостатньо тільки заходів з підвищення звукопоглинання огорожувальних поверхонь та формуванню оптимальної структури ревербераційного процесу, за рахунок зміни геометрії деяких огорожувальних поверхонь, але потрібно також приділити особливу увагу вибору та розрахунку системи озвучення залу та конгрес системи.

оцінки акустики приміщення залу засідань, дозволив виявити суттєві недоліки у формуванні звукового поля та об'єктивні причини їх виникнення. Використання вимірювального етапу до початку етапу перевірки існуючих архітектурно-будівельних рішень дозволив сформулювати причини зниження об'єктивних показників звукового поля, критеріїв оцінки ясності та чіткості мовного контенту, провести оцінку існуючої системи озвучування.

Запропонована послідовність, що застосовується для приміщень з особливими умовами, дає можливість підвищити якість проведення наступних етапів акустичної експертизи за рахунок отриманого уявлення про особливості формування звукового поля та виявлення причин незадовільної акустики приміщення.

Висновки

У матеріалах статті авторами розглянуто приклад використання останнього завершального етапу акустичної експертизи в якості першого. Аналіз отриманих результатів, проведений на прикладі

Список літератури

1. Russo D., Ruggiero A. Choice of the optimal acoustic design of a school classroom and experimental verification. *Applied Acoustics*. 2019. Vol. 146. P. 280-287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.019>.
2. Barteld N. J. Postma S. J., Brian F. G. Katz. Pre-Sabine room acoustic design guidelines based on human voice directivity. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2018. №143. P.2428-2437.
3. Щиржецкий X. А., Борисов Л. А. Акустика зальных помещений. *Сцена*. 2002. №2. С. 21.
4. Анерт В., Стефен Ф. Техника звукоусиления. Теория и практика / пер. с англ. М: ООО "ПКФ Леруша". 2003. 416 с.
5. ISO 3382:2009. Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. 2009.
6. ISO 3382-3:2012. Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 3: Open plan offices Performance spaces. 2009.
7. ISO 3382-1:2009 Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces. 2009.
8. ДБН В.2.2-16-2005. Будинки і споруди. Культурно-видовищні та дозвілєві заклади. Держбуд України. Київ. 2005.
9. Ahnert W., Schmidt W. Fundamentals to perform acoustical measurements. 2005. P. 1-49.
10. Ahnert W., Schmidt W. EASERA Users Manual. 2005. 212 p.
11. Усик В. В., Зубченко Д. С. Разработка аппаратно-программного комплекса для измерения объективных параметров акустики помещения. *Научно-технический журнал. Технология приборостроения. Спец.выпуск*. 2014. С. 36-40.
12. Усик В. В., Мякий И. Г. Использование первых двух этапов акустической экспертизы помещений зрительных залов на примере драматического театра на 500 мест. *Научно-технический журнал "Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті"*. Харьков, 2017, № 5. С. 26-34.
13. Порошин С. М., Усик В. В. Методика проведения акустической экспертизы и архитектурно-строительных решений для зрительных залов на примере драматического театра на 500 мест. *Сбірник наукових праць VI Міжнародний радіоелектронний форум. Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку (МРФ – 2017)*. Харьков, 2017. С. 125-130.

14. Порошин С. М., Усик В. В. Методология оценки акустических свойств помещений зрительских залов. World Science. 2018. Vol. 1. № 1 (29), С. 8–15.
15. Usik V. V. The hardware-software complex for measuring sound field characteristics in a room at the final stage of the acoustic examination. Metrology and metrology assurance 2018. Proceedings of the 28 International scientific symposium. Sozopol, 2018. P. 233–236.
16. Poroshin S., Usik V., Butova O. Features of the application of the methodology for assessing the acoustic properties of the sound field for spectator rooms. XXIX International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance 2019 (MMA 2019) Sozopol, 2019. P. 145–149. DOI: <https://doi.org/10.1109/MMA.2019.8936027>.

References

1. Russo, D., Ruggiero, A. (2019), "Choice of the optimal acoustic design of a school classroom and experimental verification", Applied Acoustics, Vol. 146, P. 280–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.11.019>
2. Barteld, N. J., Postma, S. J., Brian, F. G. K. (2018), "Pre-Sabine room acoustic design guidelines based on human voice directivity", The Journal of the Acoustical Society of America, No. 143, P. 2428–2437.
3. Shirzhetsky, H. A., Borisov, L. A. (2002), "Acoustics of halls" ["Akustika zal'nykh pomeshcheniy"], The magazine Scene, No. 2, P. 21.
4. Anert, V., Stephen, F. (2003), Sound amplification technique. Theory and practice [Tekhnika zvukousileniya. Teoriya i praktika], Ed. OOO PKF Lerusha, 416 p.
5. ISO 3382:2009 (2009), Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces.
6. ISO 3382-3:2012 (2009), Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 3: Open plan offices Performance spaces.
7. ISO 3382-1:2009 (2009), Acoustics - Measurement of room acoustic parameters. Part 1: Performance spaces.
8. DBN B.2.2-16-2005 (2005), Buildings and structures. Cultural, entertainment and leisure facilities. State Construction Committee of Ukraine, Kiev.
9. Ahnert, W., Schmidt, W. (2005), "Fundamentals to perform acoustical measurements", P. 1–49.
10. Ahnert, W., Schmidt, W. (2005), EASERA, Users Manual, 212 p.
11. Usik, V. V., Zubchenko, D. S. (2014), "Development of a hardware-software complex for measurement of objective parameters of room acoustics" ["Razrabotka apparatno-programmnogo kompleksa dlya izmereniya ob'ektivnykh parametrov akustiki pomeshcheniya"], Scientific and technical journal "Technology of instrument making", Special issue, P. 36–40.
12. Usik, V. V., Myagkiy, I. G. (2017), "The use of the first two stages of acoustic examination of auditoriums on the example of a drama theater for 500 seats", Scientific and technical journal "Information and control systems for railway transport", No. 5, P. 26–34.
13. Poroshin, S. M., Usik, V.V. (2017), "Methods of conducting acoustic examination and architectural and construction solutions for auditoriums on the example of a drama theater for 500 seats" ["Metodika provedeniya akusticheskoy ekspertizy i arkhitekturno-stroitel'nykh resheniy dlya zritel'nykh zalov na primere dramaticheskogo teatra na 500 mest"], Collection of scientific works VI International Radio-Electronic Forum "Applied Radio Electronics. Status and Prospects of Development", P. 125–130.
14. Poroshin, S. M., Usik, V.V. (2018), "Methodology for assessing the acoustic properties of auditorium rooms" ["Metodologiya otsenki akusticheskikh svoystv pomeshcheniy zritel'skikh zalov"], World Science, No. 1 (29), Vol. 1, P. 8–15.
15. Usik, V. V. (2018), "The hardware-software complex for measuring sound field characteristics in a room at the final stage of the acoustic examination", Metrology and metrology assurance 2018. Proceedings of the 28 International scientific symposium. Sozopol, P. 233–236.
16. Poroshin, S., Usik, V., Butova, O. (2019), "Features of the application of the methodology for assessing the acoustic properties of the sound field for spectator rooms", XXIX International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance 2019 (MMA 2019) Sozopol, P. 145–149. DOI: <https://doi.org/10.1109/MMA.2019.8936027>

Надійшла (Received) 19.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Порошин Сергій Михайлович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Харків, Україна; email: poroshin0020@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2583-9916>.

Порошин Сергей Михайлович – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", заведующий кафедрой мультимедийных информационных технологий и систем, Харьков, Украина.

Poroshin Sergei – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of Multimedia Information Technologies and Systems, Kharkiv, Ukraine.

Усик Вікторія Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Харків, Україна; email: usik.viktorya@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3515-4849>.

Усик Вікторія Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Харків, Україна.

Usik Victoriya – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor Department of Multimedia Information Technologies and Systems, Kharkiv, Ukraine.

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧЕТВЕРТОГО ЭТАПА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ДЛЯ ПОМЕЩЕНИЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Предметом исследования в статье является методология проведения экспертизы помещений с целью создания оптимальных акустических условий в зависимости от назначения помещения. **Цель** - повышение качества проведения всех этапов акустической экспертизы с учетом помещений, для которых существуют особые требования к качеству передаваемого контента или для которых есть особенности в формировании звукового поля. Для достижения поставленной цели, авторами в статье предложена новая последовательность проведения этапов акустической экспертизы, а именно, использование завершающего (четвертого) этапа в качестве первого. Такая последовательность проведения этапов требует решения нескольких **задач**: определение условий проведения исследований с учетом специфики помещения и контента; выбор аппаратно-программного комплекса для проведения исследований; определение информативных критериев оценки акустики помещения с учетом всех его особенностей; обработка и анализ полученных результатов. Применение такого подхода к этапам акустической экспертизы было рассмотрено на примере зала заседаний, для которого присутствовали требования к высокому качеству речевого контента, в зале уже использовалась система звукоусиления, были особенности в формировании звукового поля. Авторами в статье описаны решения всех поставленных задач для исследуемого помещения. Полученные **результаты** позволили проанализировать объективные характеристики звукового поля и выявить причины низкого качества передачи речевого контента не только при акустическом расчете, но при использовании существующей систем звукоусиления (электроакустический расчет). **Выводы.** Предложенная последовательность проведения этапов акустической экспертизы дает возможность выявить "проблемные" места в формировании звукового поля и/или определить возможные пути решения еще до начала этапов проверки существующих архитектурно-строительных решений и разработки технического задания на конструкции ограждающих поверхностей и мероприятий по созданию оптимальных акустических условий.

Ключевые слова: акустическая экспертиза; объективные характеристики звукового поля; критерии оценки акустики помещения.

SPECIFIC FEATURES OF USING THE FOURTH STAGE OF ACOUSTIC EXPERTISE FOR SPECIAL PURPOSE PREMISES

The **subject** of the report is the methodology of carrying out an examination of the application for the purpose of establishing the optimal acoustic minds in the prevalence of attribution. The **goal** is to improve the quality of all stages of acoustic examination, taking into account the premises for which there are special requirements for the quality of the transmitted content or for which there are features in the formation of the sound field. Such a sequence of stages requires the solution of several **tasks**: determining the conditions for conducting research, taking into account the specifics of the premises and content; selection of hardware and software complex for research; determination of informative criteria for assessing the acoustics of a room, taking into account all its features; processing and analysis of the results obtained. The application of this approach to the stages of acoustic examination was considered on the example of a conference room, for which there were requirements for high quality speech content, a sound reinforcement system was already used in the hall, and there were features in the formation of a sound field. The authors in the article describe the solutions to all the tasks for the investigated room. The **results** obtained made it possible to analyze the objective characteristics of the sound field and identify the reasons for the low quality of speech content transmission not only in the acoustic calculation, but when using the existing sound reinforcement systems (electroacoustic calculation). **Conclusions.** The proposed sequence of the stages of acoustic examination makes it possible to identify "problem" places in the formation of the sound field and / or to determine possible solutions even before the stages of checking existing architectural and construction solutions and the development of technical specifications for the construction of enclosing surfaces and measures to create optimal acoustic conditions.

Keywords: acoustic examination; objective characteristics of the sound field; criteria for evaluating room acoustics.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Порошин С. М., Усик В. В. Особливості використання четвертого етапу акустичної експертизи для приміщень спеціального призначення. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 41–61. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.041>

Poroshin, S., Usik, V. (2021), "Specific features of using the fourth stage of acoustic expertise for special purpose premises", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 41–61. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.041>

L. RASKIN, O. SIRA, L. SUKHOMLYN, R. KORSUN

DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE DYNAMICS OF PROBABILITIES OF STATES OF SEMI-MARKOV SYSTEMS

The **subject** is the study of the dynamics of probability distribution of the states of the semi-Markov system during the transition process before establishing a stationary distribution. The **goal** is to develop a technology for finding analytical relationships that describe the dynamics of the probabilities of states of a semi-Markov system. The **task** is to develop a mathematical model that adequately describes the dynamics of the probabilities of the states of the system. The initial data for solving the problem is a matrix of conditional distribution laws of the random duration of the system's stay in each of its possible states before the transition to some other state. **Method.** The traditional method for analyzing semi-Markov systems is limited to obtaining a stationary distribution of the probabilities of its states, which does not solve the problem. A well-known approach to solving this problem is based on the formation and solution of a system of integral equations. However, in the general case, for arbitrary laws of distribution of the durations of the stay of the system in its possible states, this approach is not realizable. The desired result can only be obtained numerically, which does not satisfy the needs of practice. To obtain the required analytical relationships, the Erlang approximation of the original distribution laws is used. This technique significantly increases the adequacy of the resulting mathematical models of the functioning of the system, since it allows one to move away from overly obligatory exponential descriptions of the original distribution laws. The formal basis of the proposed method for constructing a model of the dynamics of state probabilities is the Kolmogorov system of differential equations for the desired probabilities. The solution of the system of equations is achieved using the Laplace transform, which is easily performed for Erlang distributions of arbitrary order. **Results.** Analytical relations are obtained that specify the desired distribution of the probabilities of the states of the system at any moment of time. The method is based on the approximation of the distribution laws for the durations of the stay of the system in each of its possible states by Erlang distributions of the proper order. A fundamental motivating factor for choosing distributions of this type for approximation is the ease of their use to obtain adequate models of the functioning of probabilistic systems. **Conclusions.** A solution is given to the problem of analyzing a semi-Markov system for a specific particular case, when the initial distribution laws for the duration of its sojourn in possible states are approximated by second-order Erlang distributions. Analytical relations are obtained for calculating the probability distribution at any time.

Keywords: Semi-Markov system; model of dynamics of probabilities of states; approximating Erlang distributions; analytical calculation of probabilities of states.

Introduction

Traditional technologies for constructing models of the functioning of complex systems are based on the use of Markov theory. The corresponding models constructively use the Markov property of the behavior of such systems [1]. The simplicity and efficiency of such models are a natural consequence of the fact that in Markov systems the distribution density of the duration of the stay of the system in any particular state is determined only by this state, but does not depend on when and how the analyzed system got into this state. This circumstance makes it possible, using simple Kolmogorov differential equations [2, 3], to solve the problem of finding the distribution of the probabilities of the stay of the system on the set of possible states with an analytical description of the dynamics of this distribution. Failure to fulfill the Markov property leads to a significant complication of the problem of analyzing the behavior of systems. Difficulties in solving the corresponding problems make the problem of developing special methods for constructing behavior models of semi-Markov systems relevant.

Literature analysis

The semi-Markov process, as it is known [4, 5], differs from the Markov process in that the distribution law of the random duration of stay in each of the possible states is not exponential. There are several alternative ways to define a semi-Markov process [6]. The least

demanding of them in terms of the amount of information used is as follows. Sets of possible states E and transitions between them, as well as the matrix $(Q_{ij}(t))$ of independent distribution functions of the time spent by the process in state I before the transition to state j , $i \in E, j \in E$, are given. Moreover, if t_{ij} is the random duration of stay in i before the transition to j , so $Q_{ij}(t) = P(t_{ij} < t)$. Then the probability of transition $P_{ij}(t)$ from I to j is the probability that no transition to any other state occurs during this time. This probability is equal to

$$P_{ij}(t) = \int_0^t \prod_{k \neq j} (1 - Q_{ik}(\tau)) dQ_{ij}(\tau) = P(\zeta(t) = j, t_{ij} < t / \zeta(0) = i, i \neq j). \quad (1)$$

The set of functions $P_{ij}(t)$ together with the initial state also uniquely define a semi-Markov process. The probability $P_{ij}(\infty)$ of transition from i to j in an unlimited time is

$$P_{ij} = P_{ij}(\infty) = \int_0^{\infty} \prod_{k \neq j} (1 - Q_{ik}(\tau)) dQ_{ij}(\tau) \quad (2)$$

and determines the probability of transition of the Markov chain embedded in the process. Wherein $\sum_{j \neq i} P_{ij} = 1$.

Next, a conditional distribution function of the duration of stay in I before the transition to j is introduced, which is equal to

$$F_{ij}(t) = P(t_{ij} < t / \zeta(0) = i, \zeta(t) = j). \quad (3)$$

Then

$$P_{ij}(t) = F_{ij}(t)P_{ij}. \quad (4)$$

The matrix of transition probabilities of the embedded Markov chain $P=(P_{ij})$ together with the matrix of conditional distribution functions $F(t)=(F_{ij}(t))$ and the initial state determine the third way of specifying the Markov process [6].

The fourth way of setting this process is implemented as follows [7]. The unconditional distribution function of the duration of stay in i before leaving to some other state is determined

$$F_{ij}(t) = P(t_i < t) = \sum_{j \neq i} P_{ij} F_{ij}(t) = \sum_{j \neq i} P_{ij}(t). \quad (5)$$

The same function can be defined through the original matrix $(Q_{ij}(t))$:

$$F_{ij}(t) = 1 - \prod_{j \neq i} (1 - Q_{ij}(t)). \quad (6)$$

The expression corresponding to (5) for the distribution density of the duration of stay in i before leaving has the form

$$f_i(t) = \sum_{j \neq i} p_{ij} \frac{dF_{ij}(t)}{dt} = \sum_{j \neq i} p_{ij} f_{ij}(t). \quad (7)$$

Next, the matrix of conditional transition probabilities is introduced

$$q_{ij}(t) = P(\zeta(t) = j / t_{ij} = t, \zeta(0) = i).$$

Herewith

$$p_{ij}(t) = P(\zeta(t) = j / t_{ij} = t, \zeta(0) = i) = \int_0^t q_{ij}(\tau) f_i(\tau) d\tau.$$

All of the above methods for specifying a semi-Markov process are equivalent.

In the works on the analysis of semi-Markov systems, the results of solving the following two important problems are used. The first task is to calculate the average durations of the stay of the system in each of their states, which is solved using the standard ratio

$$\bar{\tau}_i = \int_0^{\infty} t f_i(t) dt = \sum_{j \neq i} P_{ij} \int_0^{\infty} t f_{ij}(t) dt = \sum_{j \neq i} P_{ij} \bar{\tau}_{ij}. \quad (7)$$

The second task is to obtain the final distribution of the probabilities of the system states, which is solved as follows. First, using the transition probability matrix $P=(P_{ij})$, the stationary distribution of state probabilities for the Markov chain embedded in the semi-Markov process is found. The vector $\pi=(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$ of these probabilities is found by solving the system of equations

$$\pi = \pi P,$$

$$\sum_{i=1}^n \pi_i = 1. \quad (8)$$

Now, as shown in [6, 7], the desired final distribution of state probabilities is determined by the relations

$$P_i = \frac{\pi_i \bar{\tau}_i}{\sum_{i=1}^n \pi_i \bar{\tau}_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

The obtained results (7) and (9) are very useful in solving practical problems. However, in many cases, for example, when solving control problems for semi-Markov systems, it is necessary to have an analytical description of the dynamics of state probabilities. In addition, it is important to know the dependences of the values of the components of the probability distribution of the system states on the numerical values of the system parameters.

In this regard, the purpose of the study is to develop a technology for finding the dynamics of the probability distribution of the states of a semi-Markov system.

Main result. Calculation of the probability distribution of the states of a semi-Markov system. Consider a system with its possible states and build a model of the functioning of such systems.

Let us introduce, using (3), $F_{ij}(t) = P(\tau_{ij} < t)$ – the probability that the random duration τ_{ij} of the stay of the system at i before the transition to state j will be less than t . Then the probability of no transition to state j on the interval $[t, t + \tau]$ is defined as follows:

$$Q_{ij}(t + \tau) = Q_{ij}(t)Q_{ij}(t, t + \tau);$$

$$Q_{ij}(t, t + \tau) = \frac{Q_{ij}(t + \tau)}{Q_{ij}(t)}. \quad (10)$$

In this case, the probability of transition from i to j on this interval will be equal to

$$\begin{aligned} W_{ij}(t, t + \tau) &= 1 - Q_{ij}(t, t + \tau) = 1 - \frac{Q_{ij}(t + \tau)}{Q_{ij}(t)} = \\ &= \frac{Q_{ij}(t) - Q_{ij}(t + \tau)}{Q_{ij}(t)} = \frac{(1 - Q_{ij}(t + \tau)) - (1 - Q_{ij}(t))}{Q_{ij}(t)} = (11) \\ &= \frac{F_{ij}(t + \tau) - F_{ij}(t)}{1 - F_{ij}(t)}. \end{aligned}$$

Let the distribution law of the duration of stay at i before going to j be the Erlang distribution law of order m . Wherein [8]

$$F_i(t) = 1 - \sum_{m=0}^{m-1} \frac{(\lambda_{ij} t)^m}{m!} e^{-\lambda_{ij} t}.$$

If $m=2$, so

$$F_{ij}(t) = 1 - (1 + \lambda_{ij} t) e^{-\lambda_{ij} t}. \quad (12)$$

Now, substituting (12) into (11), we obtain the probability of transition from i to j on the interval $[t, t + \tau]$.

$$W_{ij}(t, t+\tau) = \frac{[1 - (1 + \lambda_{ij} t + \tau)e^{-\lambda_{ij} t + \tau}] - [1 - (1 + \lambda_{ij} t)e^{-\lambda_{ij} t}]}{1 - (1 + \lambda_{ij} t)e^{-\lambda_{ij} t}} = \quad (13)$$

$$= \frac{(1 + \lambda_{ij} t) - (1 + \lambda_{ij} t + \tau)e^{-\lambda_{ij} \tau}}{1 + \lambda_{ij} t} = 1 - \frac{1 + \lambda_{ij} (t + \tau)}{1 + \lambda_{ij} t} e^{-\lambda_{ij} \tau}.$$

Then the distribution density of the duration of stay at i before the transition to j on the interval $[t, t + \tau]$ has the form:

$$f(t, \tau) = \frac{\lambda_{ij}^2 (t + \tau)}{1 + \lambda_{ij} t} e^{-\lambda_{ij} \tau}. \quad (14)$$

It is clear that at $t = 0$ relation (13) is reduced to formula (12), which determines the Erlang distribution law of order 2 for an interval of length t , and relation (14) takes the form

$$f(t) = \lambda_{ij}^2 \tau e^{-\lambda_{ij} \tau}, \quad (15)$$

usual for the second-order Erlang distribution density. It follows from relation (14) that the distribution density of the random duration of stay in state i before transition to j on the interval $[t, t + \tau]$ depends on the value of the parameter τ . This value can be random. Consider, for example, a two-channel queuing system with an incoming flow of claims, in which the distribution density of the interval between claims is described, for example, by the second-order Erlang law (15). A request received at the moment when both channels are free takes one of them and begins to be served. Let the next request arrive at a random time interval. If the servicing of the previous customer by the first channel has not been completed by this moment τ , then the next customer occupies the free second channel. Let the distribution laws of the random value of the interval between incoming customers and the duration of service of each of the channels have the form, respectively [9]

$$F(\tau) = 1 - (1 + \lambda \tau) e^{-\lambda \tau}, \quad (16)$$

$$G(\tau) = 1 - (1 + \mu \tau) e^{-\mu \tau}.$$

Then the probability of completion of servicing by the first channel on the interval $[T, T + \tau]$ in accordance with (13) is

$$F_1(T, T + \tau) = 1 - \frac{1 + \mu(T + \tau)}{1 + \mu T} e^{-\mu \tau}. \quad (17)$$

The corresponding distribution density is described by the formula

$$f_1(T, T + \tau) = \frac{\mu^2 (T + \tau)}{1 + \mu T} e^{-\mu \tau}. \quad (18)$$

In addition, in accordance with (16), the distribution law for the duration of servicing a customer by the second channel is determined by the relation

$$G_2(\tau) = 1 - (1 + \mu \tau) e^{-\mu \tau}, \quad (19)$$

and the distribution density of this duration is

$$f_2(\tau) = \mu^2 \tau e^{-\mu \tau}. \quad (20)$$

The random moment of the end of servicing by any of the two busy channels is specified by the minimum of the durations of servicing claims by these channels. The corresponding distribution density is determined by the densities $f_1(T, T + \tau)$ and $f_2(\tau)$ as follows. Let $x_1 = T + \tau$ and $x_2 = \tau$ determine the service duration values for the first and second channels. We introduce $u = \min\{x_1, x_2\}$. The distribution function of this random variable u has the form

$$G(u) = 1 - (1 - G_1(u))(1 - G_2(u)), \quad (21)$$

The corresponding distribution density, found by differentiating (21) with respect to u , is equal to

$$g(u) = f_1(u)(1 - G_2(u)) + f_2(u)(1 - G_1(u)). \quad (22)$$

Let us substitute functions (17) - (20) into (22), bearing in mind that at the time of service by any of the channels $\tau_1 = \tau_2 = \tau$. In this case, the random variable u takes on the value $T + \tau$ if the first channel completed servicing earlier than the second, and corresponds to the value of τ if the second channel finished servicing earlier than the first. That's why

$$g(T, \tau) = \frac{\mu^2 (T + \tau)}{1 + \mu T} e^{-\mu \tau} (1 + \mu \tau) e^{-\mu \tau} + \mu^2 \tau e^{-\mu \tau} \frac{1 + \mu (T + \tau)}{1 + \mu T} e^{-\mu \tau} =$$

$$= \frac{\mu^2}{1 + \mu T} [(T + \tau)(1 + \mu \tau) e^{-2\mu \tau} + \tau(1 + \mu(T + \tau)) e^{-2\mu \tau}] =$$

$$= \frac{\mu^2}{1 + \mu T} [(T + \tau)(1 + \mu \tau) + \tau(1 + \mu(T + \tau))] e^{-2\mu \tau} =$$

$$= \frac{\mu^2}{1 + \mu T} (T + T\mu\tau + \tau + \mu\tau^2 + \tau + \mu\tau^2 + \mu T\tau) e^{-2\mu \tau} = \quad (23)$$

$$= \frac{\mu^2}{1 + \mu T} (\tau + (T + \tau) + 2\mu T\tau + 2\mu\tau^2) e^{-2\mu \tau} =$$

$$= \frac{\mu^2}{1 + \mu T} (\tau + (T + \tau) + 2\mu\tau(T + \tau)) e^{-2\mu \tau} =$$

$$= \frac{\mu^2}{1 + \mu T} (\tau + (T + \tau)(1 + 2\mu\tau)) e^{-2\mu \tau}.$$

It follows from this relation that the analytical description of the distribution density of the duration of the stay of the system in the state when both channels are occupied until the moment one of them is released contains a random parameter T . The fundamental complexity of the situation arising in this case is as follows. Relation (23) describes not a single density, as it happens when all the parameters of the distribution density are known constants. The random nature of the parameter T gives rise to a family of densities, each of which corresponds to a specific value of this parameter. It is clear that in this situation a direct solution to the problem of analyzing such a system is impracticable. An approximate solution can be obtained if the parameter T is set by its mean value \bar{T} . In this case, relation (23) takes the form

$$g(\bar{T}, \tau) = \frac{\mu^2}{1 + \mu \bar{T}} (\tau + (\bar{T} + \tau)(1 + 2\mu\tau)) e^{-2\mu \tau}. \quad (24)$$

This relationship makes it possible, using numerical integration, to calculate the average value of the duration of the system's stay in the busy state of both channels, and from this to obtain an estimate of the intensity $\hat{\mu}$ of the system's exit from this state.

The above distributions and calculations (23) - (24) allow us to analyze the process of functioning of the considered two-channel queuing system. Let us introduce a set $\{Ei\}$, $i = 0,1,2$, of system states corresponding to the number of occupied channels. We find the distribution of the probabilities of the states of the system $P_k(t)$, $k=0,1,2$, by solving the Kolmogorov system of differential equations [10]

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = \sum_{j \in Z_k^+} \lambda_{jk} P_j(t) - P_k(t) \sum_{j \in Z_k^-} \lambda_{kj}, \quad k=0,1,2. \quad (25)$$

where, λ_{jk} – intensity of system transition from state j to state k ; Z_k^+ – the set of system states, from which a direct transition to the k -th state is possible; Z_k^- – the set of states of the system into which a direct transition from the k -th state is possible.

We solve the resulting system of equations using the Laplace transform. As is known, the Laplace transform of the function $u(t)$ is the function

$$L(u(t)) = F(s) = \int_0^{\infty} u(t) e^{-st} dt. \quad (26)$$

The Laplace transform of the derivative $u'(t)$ of the function $u(t)$ is defined by the relation

$$L(u'(t)) = \int_0^{\infty} u'(t) e^{-st} dt. \quad (27)$$

Integrating (27) by parts, we obtain

$$\begin{aligned} L(u'(t)) &= \int_0^{\infty} e^{-st} u'(t) dt = \\ &= u(t) e^{-st} \Big|_0^{\infty} + s \int_0^{\infty} u(t) e^{-st} dt = sL(u(t)) - u(0). \end{aligned}$$

Transforming (25) according to Laplace, we obtain

$$s\pi_k(s) - P_k(0) = \sum_{j \in Z_k^+} \lambda_{jk} \pi_j(s) - P_k(s) \sum_{j \in Z_k^-} \lambda_{kj}, \quad (28)$$

where $\pi_k(s) = L(P_k(t))$.

In the considered task we have $Z_0^+ = 1$; $Z_0^- = 1$; $Z_1^+ = \{0,2\}$; $Z_1^- = \{0,2\}$; $Z_2^+ = 1$; $Z_2^- = 1$; $P_0(0) = 1$; $P_1(0) = P_2(0) = 0$. Therefore, the system of equations (28) is simplified to the form

$$\begin{aligned} s\pi_0(s) &= \lambda_{10}\pi_1(s) - \lambda_{01}\pi_0(s) + 1 = 0, \\ s\pi_1(s) &= \lambda_{01}\pi_0(s) + \lambda_{21}\pi_2(s) - (\lambda_{10} + \lambda_{12})\pi_1(s), \\ s\pi_2(s) &= \lambda_{12}\pi_1(s) - \lambda_{21}\pi_2(s). \end{aligned}$$

After reducing similar terms, we get:

$$\begin{aligned} (s + \lambda_{01})\pi_0(s) - \lambda_{10}\pi_1(s) &= 1, \\ \lambda_{01}\pi_0(s) - (s + \lambda_{10} + \lambda_{12})\pi_1(s) + \lambda_{21}\pi_2(s) &= 0, \\ s\lambda_{12}\pi_1(s) - (s + \lambda_{21})\pi_2(s) &= 0. \end{aligned} \quad (29)$$

The system of linear algebraic equations (29) is solved in a standard way. By Cramer's rule, we have:

$$\pi_i(s) = \frac{D_i(s)}{D(s)}, \quad i = 0,1,2, \quad (30)$$

where

$$D = \det \begin{pmatrix} (s + \lambda_{01}) & -\lambda_{10} & 0 \\ \lambda_{01} & -(s + \lambda_{10} + \lambda_{12}) & \lambda_{21} \\ 0 & \lambda_{12} & (s + \lambda_{21}) \end{pmatrix},$$

$$D_0 = \det \begin{pmatrix} 1 & -\lambda_{10} & 0 \\ 0 & -(s + \lambda_{10} + \lambda_{12}) & \lambda_{21} \\ 0 & \lambda_{12} & (s + \lambda_{21}) \end{pmatrix},$$

$$D_1 = \det \begin{pmatrix} (s + \lambda_{01}) & 1 & 0 \\ \lambda_{01} & 0 & \lambda_{21} \\ 0 & 0 & (s + \lambda_{21}) \end{pmatrix},$$

$$D_2 = \det \begin{pmatrix} (s + \lambda_{01}) & -\lambda_{10} & 1 \\ \lambda_{01} & -(s + \lambda_{10} + \lambda_{12}) & 0 \\ 0 & \lambda_{12} & 0 \end{pmatrix},$$

Note that when solving the resulting system of equations, it is necessary to take into account the normalization condition $P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1$, which after the Laplace transform has the form

$$\sum_{k=0}^2 \pi_k(s) = \frac{1}{s} \quad \text{or} \quad s \sum_{k=0}^2 \pi_k(s) = 1.$$

As a result of performing the necessary operations in accordance with (30), we obtain

$$\pi_0(s) = \frac{A_{00} + A_{01}s + A_{02}s^2}{B_0 + B_1s + B_2s^2 + B_3s^3}, \quad (31)$$

$$\pi_1(s) = \frac{A_{10} + A_{11}s}{B_0 + B_1s + B_2s + B_3s}, \quad (32)$$

$$\pi_2(s) = \frac{A_{20} + A_{21}s}{B_0 + B_1s + B_2s + B_3s}. \quad (33)$$

We carry out the inverse Laplace transform by expanding the fractional rational functions (31) - (33) into elementary fractions. To do this, it is necessary to find the roots of the polynomial in the denominator of the functions being expanded by solving the equation

$$B_0 + B_1s + B_2s^2 + B_3s^3 = 0.$$

Let these roots be equal S_1, S_2, S_3 .

The technology of further operations depends on the nature of these roots. In this case, in the general case, the following options are possible.

a) All roots are real, different. Then

$$\frac{A_{00} + A_{01}s + A_{02}s^2}{B_0 + B_1s + B_2s^2 + B_3s^3} = \frac{a_{00} + a_{01}s + a_{02}s^2}{(s-s_1)(s-s_2)(s-s_3)} = \frac{\alpha_1}{s-s_1} + \frac{\alpha_2}{s-s_2} + \frac{\alpha_3}{s-s_3}, a_{0i} = \frac{A_{0i}}{B_3}, i = 0,1,2,3. \quad (34)$$

The unknown coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ are found after reducing (34) to a common denominator and equating the coefficients at the same powers of s to the left and right of the equal sign.

b) Roots are real, multiples. Then

$$\frac{a_{00} + a_{01}s + a_{02}s^2}{(s-s_1)^{k_1}(s-s_2)^{k_2}(s-s_3)^{k_3}} = \frac{\alpha_{11}}{s-s_1} + \frac{\alpha_{12}}{(s-s_1)^2} + \frac{\alpha_{13}}{(s-s_1)^3} + \frac{\alpha_{21}}{s-s_2} + \frac{\alpha_{22}}{(s-s_2)^2} + \frac{\alpha_{23}}{(s-s_2)^3} + \frac{\alpha_{31}}{s-s_3} + \frac{\alpha_{32}}{(s-s_3)^2} + \frac{\alpha_{33}}{(s-s_3)^3}. \quad (35)$$

In this case, the total number of terms in relation (35) cannot exceed three. The method for finding the unknown coefficients in (35) is the same as above.

c) Among the roots there are complex. Then

$$\frac{a_{00} + a_{01}s + a_{02}s^2}{(s-s_1)(s^2 - ps + q)} = \frac{\alpha_1}{s-s_1} + \frac{\beta s + \gamma}{s^2 - ps + q}.$$

Unknown coefficients are found in the same way as before. Further, according to the correspondence table of the originals and their Laplace transforms, unknown functions $P_0(t), P_1(t), P_2(t)$, are found, which specify the desired distribution of the probabilities of the system states.

The task becomes much more complicated if the number of channels in the system is more than two. In this

case, a complicating circumstance manifests itself even if the number of channels is only three. The point is as follows. In a two-channel system, the transition from the E_1 to E_2 state occurs only if the service of the previous request by the first channel is not completed. In a three-channel system, the situation is different. The fact is that before the transition to E_3 , the system could wander for an unpredictable long time on the set of states E_0, E_1, E_2 . Therefore, at the time of the transition of the system to E_3 , it is impossible to estimate the duration of continuous operation of the two channels occupied by this moment, which excludes the possibility of implementing the technology under consideration. Apparently, the only real way to solve the problem of analyzing an n -channel semi-Markov queuing system is to construct and solve a system of interval-transition equations [11] with respect to the dynamics of the probability distribution of the states of the system.

A possible direction for further research consists in the development of methods for solving the problem in the case when the initial data are given indistinctly [12] or inaccurately [13]. To solve these problems, the methods proposed in [14] and [15] can be useful.

Conclusions

A technology for constructing a model of the dynamics of probabilities of states of a semi-Markov system is proposed. When solving the problem, the Erlang approximation of the conditional distribution laws of the random duration of the stay of the system in each of the possible states of the system before the transition to another state is used. The problem is reduced to a system of differential equations for the sought state probabilities. The solution of the system of equations is achieved using the Laplace transform.

References

1. Dynkin, E. B. (1963), *Markov processes [Markovskiy protsessy]*, Moscow : Fizmatgiz, 583 p.
2. Barucha-Reed, A. T. (1969), *Elements of the theory of Markov processes and their applications [Elementy teorii markovskikh protsessov i ikh prilozheniya]*, Moscow : Nauka, 248 p.
3. Kemeny, J., Snell, J. (1970), *Markov's ultimate goals [Konechnyye tseli Markova]*, Moscow : Nauka, 208 p.
4. Silvestrov, D. S. (1971), *Semi-Markov processes with a discrete set of states [Polumarkovskiy protsessy s diskretnym mnozhestvom sostoyaniy]*, Kyiv : KNU, 186 p.
5. Barlow, R. E. (1962), "Applications of semi-Markov processes to counter problems", *Stud. appl. prob. Stanford, Calif. Univ. Press*, P. 34–62.
6. Korolyuk, V. S. (1967), "Semi-Markov processes and their applications" ["Polumarkovskiy protsessy i ikh prilozheniya"], *Cybernetics*, No. 5, P. 58–65.
7. Korolyuk, V. S., Brody, S. M., Turbin, A. F. (1974), "Semi-Markov processes and their application" ["Polumarkovskiy protsessy i ikh primeneniye"], *Results of science and technology. Ser. Theor. ver. Mat. Stat.*, Vol. II, P. 47–97.
8. Ventzel, E. S., Ovcharov, L. A. (1983), *Applied Problems of Probability Theory [Prikladnyye zadachi teorii veroyatnostey]*, Moscow : Radio and Communication.
9. Pugachev, V. S. (1962), *The theory of random functions [Teoriya sluchaynykh funktsiy]*, Moscow : Fizmatgiz, 659 p.
10. Kofman, A., Kruon, R. (1965), *Mass service, theory and applications [Massovoye obsluzhivaniye, teoriya i prilozheniya]*, Moscow : MIR, 302 p.
11. Raskin, L. G. (1988), *Mathematical methods for researching operations and analyzing complex systems [Matematicheskiye metody issledovaniya operatsiy i analiza slozhnykh sistem]*, Kharkiv : VIRTA, 178 p.
12. Zadeh, L. (1965), "Fuzzy Sets", *Information and Control*, Vol. 8, P. 338–353.

13. Pawlak, Z. (1997), "Rough Sets approach to knowledge-based decision support", *European Journal of Operation Research*, Vol. 99, No. 1, P. 48–57.
14. Raskin, L., Sira, O. (2016), "Fuzzy models of rough mathematics", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 6, Issue 4, P. 53–60. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.86739
15. Raskin, L., Sira, O. (2016), "Method of solving fuzzy problems of mathematical programming", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 5, Issue 4, P. 23–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.81292

Received 23.07.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Раскін Лев Григорович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: topology@ukr.net; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9015-4016>.

Раскин Лев Григорьевич – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Raskin Lev – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

Сіра Оксана Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: topology@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4869-2371>.

Серая Оксана Владимировна – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Sira Oksana – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Distributed Information Systems and Cloud Technologies, Kharkiv, Ukraine.

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

Сухомлин Лариса Вадимовна – кандидат технических наук, доцент, Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского, доцент кафедры менеджмента, Кременчуг, Украина.

Sukhomlyn Larysa – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kremenchuk Mikhail Ostrogradskiy National University, Associate Professor of the Department of Management, Kremenchuk, Ukraine.

Корсун Роман Олегович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", аспірант кафедри розподілених інформаційних систем і хмарних технологій, Харків, Україна; email: roman.korsun7@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1950-4263>.

Корсун Роман Олегович – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", аспирант кафедры распределенных информационных систем и облачных технологий, Харьков, Украина.

Korsun Roman – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Postgraduate Student of the Department of Information Systems and Technologies, Kharkiv, Ukraine.

РОЗРОБКА МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ЙМОВІРНОСТЕЙ СТАНІВ НАПІВМАРКОВСЬКИХ СИСТЕМ

Предмет – дослідження динаміки розподілу ймовірностей станів напівмарковських системи протягом перехідного процесу до встановлення стаціонарного розподілу. **Мета** – розробка технології відшукування аналітичних співвідношень, що описують динаміку ймовірностей станів напівмарковських системи. **Завдання** розробка математичної моделі, адекватно описує динаміку ймовірностей станів системи. Вихідні дані для вирішення завдання - матриця умовних законів розподілу випадкової тривалості перебування системи в кожному з можливих її станів до переходу в будь-яке інше стан. **Метод**. Традиційний метод аналізу напівмарковських систем обмежується отриманням стаціонарного розподілу ймовірностей її станів, що не вирішує поставлену задачу. Відомий підхід до вирішення цього завдання заснований на формуванні та вирішенні системи інтегральних рівнянь. Однак в загальному випадку для довільних законів розподілу тривалостей перебування системи в можливих своїх станах цей підхід не реалізуємо. Шуканий результат може бути отриманий тільки чисельно, що не задовольняє потреби практики. Для отримання необхідних аналітичних співвідношень використовується ерланговський апроксимація вихідних законів розподілу. Цей прийом істотно підвищує адекватність одержуваних при цьому математичних моделей функціонування системи, так як дозволяє відійти від надмірно зобов'язують експоненційних описів вихідних законів розподілу. Формальна основа запропонованого методу побудови моделі динаміки ймовірностей станів - система диференціальних рівнянь Колмогорова щодо шуканих ймовірностей. Рішення системи рівнянь досягається з використанням перетворення Лапласа, яке легко здійснимо для ерланговський розподілів довільного порядку. **Результати**. Отримано аналітичні

співвідношення, які визначають шуканий розподіл ймовірностей станів системи на будь-який момент часу. Метод заснований на апроксимації законів розподілу тривалостей перебування системи в кожному з можливих своїх станів розподілами Ерланга належного порядку. Принциповим мотивуючим обставиною для вибору з метою апроксимації розподілів саме цього типу є простота їх використання для отримання адекватних моделей функціонування ймовірнісних систем. **Висновки.** Наведено рішення задачі аналізу напівмарковських системи для конкретного окремого випадку, коли вихідні закони розподілу тривалості її перебування в можливих станах апроксимуються розподілами Ерланга другого порядку. Отримано аналітичні співвідношення для розрахунку розподілу ймовірностей на будь-який момент часу.

Ключові слова: напівмарковська система; модель динаміки ймовірностей станів; апроксимуючий розподіл Ерланга; аналітичний розрахунок ймовірностей станів.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ВЕРОЯТНОСТЕЙ СОСТОЯНИЙ ПОЛУМАРКОВСКИХ СИСТЕМ

Предмет – исследование динамики распределения вероятностей состояний полумарковской системы в течение переходного процесса до установления стационарного распределения. **Цель** – разработка технологии отыскания аналитических соотношений, описывающих динамику вероятностей состояний полумарковской системы. **Задача** – разработка математической модели, адекватно описывающей динамику вероятностей состояний системы. Исходные данные для решения задачи – матрица условных законов распределения случайной продолжительности пребывания системы в каждом из возможных ее состояний до перехода в какое-либо другое состояние. **Метод.** Традиционный метод анализа полумарковских систем ограничивается получением стационарного распределения вероятностей ее состояний, что не решает поставленную задачу. Известный подход к решению этой задачи основан на формировании и решении системы интегральных уравнений. Однако в общем случае для произвольных законов распределения продолжительностей пребывания системы в возможных своих состояниях этот подход не реализуем. Искомый результат может быть получен только численно, что не удовлетворяет потребности практики. Для получения требуемых аналитических соотношений используется эрланговская аппроксимация исходных законов распределения. Этот прием существенно повышает адекватность получаемых при этом математических моделей функционирования системы, так как позволяет отойти от чрезмерно обязывающих экспоненциальных описаний исходных законов распределения. Формальная основа предложенного метода построения модели динамики вероятностей состояний – система дифференциальных уравнений Колмогорова относительно искомых вероятностей. Решение системы уравнений достигается с использованием преобразования Лапласа, которое легко выполнимо для эрланговских распределений произвольного порядка. **Результаты.** Получены аналитические соотношения, задающие искомое распределение вероятностей состояний системы на любой момент времени. Метод основан на аппроксимации законов распределения продолжительностей пребывания системы в каждом из возможных своих состояний распределениями Эрланга надлежащего порядка. Принципиальным мотивирующим обстоятельством для выбора в целях аппроксимации распределений именно этого типа является простота их использования для получения адекватных моделей функционирования вероятностных систем. **Выводы.** Приведено решение задачи анализа полумарковской системы для конкретного частного случая, когда исходные законы распределения продолжительности ее пребывания в возможных состояниях аппроксимируются распределениями Эрланга второго порядка. Получены аналитические соотношения для расчета распределения вероятностей на любой момент времени.

Ключевые слова: полумарковская система; модель динамики вероятностей состояний; аппроксимирующие распределения Эрланга; аналитический расчет вероятностей состояний.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Раскін Л. Г., Сіра О. В., Сухомлин Л. В., Корсун Р. О. Розробка моделі динаміки ймовірностей станів напівмарковських систем. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.062>

Raskin, L., Sira, O., Sukhomlyn, L., Korsun, R. (2021), "Development of a model for the dynamics of probabilities of states of Semi-Markov systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 62–68. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.062>

V. RUDNYTSKYI, HADI AMINEH

METHODOLOGICAL TOOLS FOR THE IMPLEMENTATION OF INFORMATION TECHNOLOGY FOR EXPERT ASSESSMENT OF THE QUALITY OF HEAVY AUTOMOBILE EQUIPMENT IN THE PROCESS OF ITS EXPLOITATION

Subject matter. Justification of the choice of a model range of heavy vehicles when organizing purchases in the framework of large-scale infrastructure projects. **Goal.** Increasing the efficiency of the process of determining the model range of heavy automobile equipment, in terms of its operation, at the stage of initiating large-scale infrastructure projects, by creating a special methodological approach, and on its basis - an appropriate information technology for decision support. **Tasks.** To develop a complex fuzzy model for assessing the quality of heavy automobile equipment during its operation. To propose a method for collective expert assessment of the quality of heavy automobile equipment during its operation. To develop an applied information technology to support decision-making on the formation of a model range of purchased heavy vehicles. **Methods.** System analysis – in the development of a comprehensive model of the quality of heavy automotive equipment; fuzzy mathematics – to ensure the process of fuzzy assessment by experts of the quality of heavy automobile equipment during its operation; expertology – when creating a method for forming a generalized quality assessment by means of collective expert assessment; software engineering – when creating applied information technology for collective expert assessment of the quality of heavy automobile equipment. **Results.** An approach to the creation of a number of applied information technologies for complex expert assessment of the quality of operation of a wide class of vehicles using the example of heavy automobile equipment. **Conclusions.** A comprehensive model has been developed for assessing the quality of heavy automobile equipment, at the stage of its operation, using the principles and approaches that are generally accepted in system analysis. The method of presentation and further implementation of a complex quality assessment model by means of fuzzy mathematics, which makes it possible to increase the efficiency of expert assessment, is described. A method for forming a team of experts is proposed, which implements the selection of an expert from several applicants, while taking into account the communication capabilities of individual members of the team of experts. The applied information technology for complex assessment of the quality of heavy automobile equipment in the aspect of its operation is described, in order to justify the choice of a model range for the acquisition of this equipment in the implementation of large-scale infrastructure projects.

Keywords: heavy automotive equipment; integrated quality model; fuzzy mathematics; collective expert assessment; decision support; applied information technology.

Introduction

In recent years, large-scale infrastructure projects have become widespread in many countries around the world, including Ukraine. A typical example of such a project is the state program "Large Construction", which is currently being implemented and which is initiated by the President of Ukraine. A significant part of the funds that make up the budget of such projects is intended for the purchase of technical means. The specificity of large-scale infrastructure projects (LIP) in many cases is associated with the need to purchase large volumes of various transport mechanisms, including heavy trucks and special equipment based on them. Due to the scale of LIP, heavy automotive equipment (HAE) purchases can reach many hundreds of units, making it an important task to pre-estimate future HAE maintenance costs, including routine maintenance, emergency repairs, and more. Thus, among the many tasks inherent in the life cycle of LIP is quite relevant to justify the choice of the HAE model range, based on the above factors. This task is directly related to quality assessment, in terms of operating costs for the maintenance of HAE. Irrational decisions about the choice of HAE can further lead to unjustifiably large losses of funds, which will reduce the overall effectiveness of LIP.

Many researchers have paid attention to the issue of assessing the quality of heavy engineering products, but the tools they have developed in the course of research have not taken into account the specifics of LIP in terms of assessing the quality of vehicle operation.

These circumstances necessitate the development of special methodological tools, and on this basis - the means of information support for decision-making processes to determine the model range of HAE for the implementation of the planned LIP.

Formulation of a scientific problem and its significance

The problem that determines the relevance of this study is the most fundamental of all the problems of human existence. This is a problem of lack of resources. It, in this case, identifies an applied problem, which is an unacceptably high level of uncertainty about the performance of HAE, and their impact on the quality of LIP in general.

This problem cannot be solved by any top manager alone, because finding a rational option is associated with the need to analyze a large number of factors that are, by their nature, heterogeneous and quite difficult to relate to each other.

Thus, there is a single way to solve this problem, which is to create special models of integrated quality assessment, methods of assessing the values of quality indicators of HAE operation by a team of experts, and making a single, aggregate assessment of a particular HAE model range for implementation of LIP.

These methodological tools should be presented formally with the use of adequate mathematical structures, and then programmatically implemented in the framework of special applied information technology, in the form of a decision support system for those who choose the HAE

model range.

Analysis of publications on the stated problem

The modern quality management paradigm is based on the concept of Total Quality Management (TQM) and is regulated by a series of relevant ISO 9000 standards [1-5].

In the general sense, quality management is the management of those factors and conditions that most significantly affect the level of product quality. The quality management system covers the entire organization (responsibility, methods, and processes) of enterprise management and is aimed at reliable implementation of quality requirements, which implements all measures of effective and efficient implementation of the company's goals defined in the quality policy [6].

To date, in the theory and practice of quality management there is a fairly well-developed methodological apparatus, which is often associated with ISO standards, various theories of the founders of quality and the concept of TQM [7-10].

The quality of HAE, in particular in terms of operating costs, is the most important factor in its competitiveness, so for any manufacturer of HAE is a very important task in the production of TQM systems [11-13]. However, the level of quality of HAE operation from different manufacturers differs significantly from each other in different indicators [14-16]. This circumstance determines the difficulty of the process of choosing the HAE model line by one person. An effective tool for implementing such tasks is the technology of collective expert assessment [17], and the efficiency of the process can be significantly increased by using the mathematical apparatus of fuzzy mathematics [18], as experts are able to operate during the assessment of their usual linguistic concepts.

The purpose of the article is to solve the problem of increasing the efficiency of the selection process for the purchase of HAE model line during the planning and implementation of LIP, by creating specialized methodological tools for integrated HAE quality assessment through fuzzy collective expert evaluation and development of applied information technology for software implementation and tools in the form of a dialog environment.

Materials and methods of research

We will determine the quality of HAE in terms of operating costs by the formula:

$$Q_c = f(Q_p; Q_{stg}; Q_s), \quad (1)$$

where: Q_c – assessment of HAE performance by the consumer; Q_p – HAE quality according to TQM; Q_{stg} – quality of related services; Q_s – quality of service.

The indicator Q_p is regularly calculated by world-famous concerns, such as Toyota Motors, Volkswagen,

General Motors, Daimler, Ford Motors, Honda Motors, Nissan Motors, Hyundai Motors, BMW, and Peugeot. At the same time, they use differential, complex, mixed and integrated methods common in practice on the basis of expert, sociological, measurement and calculation, experimental and combined approaches. The implementation of these methods involves the use of technical means of control such as, various measuring instruments, installations, tools, scales, auxiliary materials – questionnaires, tables, etc. Specific means of expert activity include professional knowledge of experts, their experience, and intuition.

The problem considered in this study is most consistent with the differential method of assessing the level of product quality, which involves comparing its individual indicators with the corresponding indicators of standard products, taken as a unit, or basic indicators of standards (specifications) and is to calculate values of relative quality indicators – their parametric indices according to formulas:

$$q_i = P_i / P_{io} \quad (i = 1 \dots n),$$

$$q_{1,i} = P_{io} / P_i, \quad (2)$$

where q_i – parametric quality index of the i -th parameter being evaluated; P_i – the value of the i -th product quality indicator; P_{io} – the basic value of the i -th indicator of its quality; n – number of indicators.

The implementation of the method assumes that from formulas (2) is selected the one in which the increase in the relative value of the indicator corresponds to the improvement of product quality, for example: other values of service life are calculated by the first formula, and material consumption - by the second.

The advantage of this method is that it allows you to determine a comprehensive indicator of product quality, which is calculated as a consolidated parametric index by the formula:

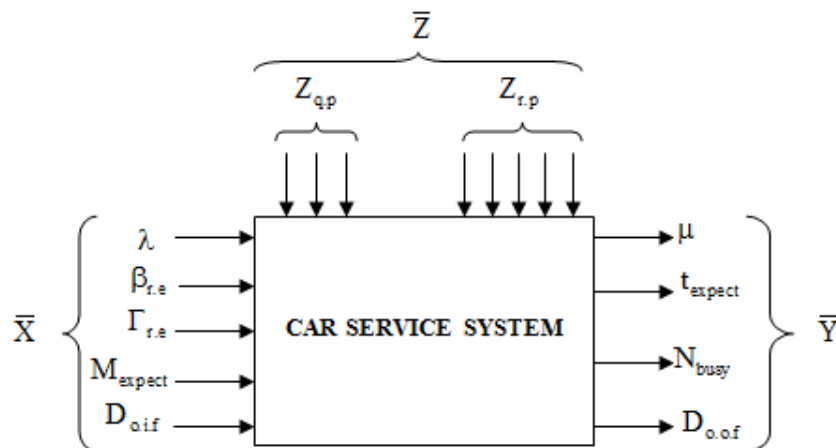
$$Q_i = \sum a_i \times q_i, \quad (3)$$

where a_i – weight of the i -th parameter.

When assessing the level of operational quality of HAE, it is advisable to use well-known in qualimetry comparison methods based on expert assessments based on known scaling, which is just as useful in solving the problem.

Modern information technologies allow the use of appropriate software products to facilitate the modeling of production processes. The activities of automotive companies can be represented as a system of service (SSS) of cars, consisting of interconnected elements: equipment; documentation for maintenance and repair; performers needed to maintain and restore the level of quality and reliability of products, in particular cars.

The car service system is one of the elements of a comprehensive assessment of the quality of automotive products. As an example of improving product quality, consider the model (fig. 1).



\bar{X} – vector function of input control factors; λ – the intensity of the flow of requests for repairs; $\beta_{r,e}$ – type of repair effects; $\Gamma_{r,e}$ – grouping of repair influences on complexity and periodicity of carrying out; M_{expect} – the average length of the queue of machines in SSS; $D_{o,i,f}$ – other input factors; \bar{Z} – vector function of uncontrolled factors; $Z_{q,p}, Z_{r,p}$ – vector function of quality and reliability (initial parameters); μ – parameter of the query service time indicator in the system; t_{expect} – average request waiting time; N_{busy} – the average number of employees engaged in the maintenance of channels; $D_{o,o,f}$ – other initial factors.

Fig. 1. Cyber-model of car service system

Statistical research and observation aims to determine: the density of the incoming request flow (λ), the intensity of the outgoing flow of requests (μ) and service parameters (SP) in SSS with unlimited incoming request flow, diagnostics, technical service (TS) and repair for different brands and car models.

The main way to determine SP requests is the number of service requests over a period of time. The data obtained in these studies are the result of information

collected over 3 years. The information reflects the number and type of incoming requests for SP cars, as presented in the information card and accounting documents. The most important are the parameters of testing plans, have accuracy δ and precision β in estimating the average values of the characteristics of the intensity of requests, coefficients of variation. Table 1 shows the sequence of determining the number of objects (n) in the study of their reliability.

Table 1. The sequence of determining the number of objects (n) in the study of their reliability

| Sequence of computational operations | The law of distribution of the studied random variable | |
|---|---|---|
| | normal | Weibull $0,3 < v < 1,0$ |
| Determine the relative error δ on the mean interval t with probability β | $\delta = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25;$ $\beta = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25;$ | |
| Set the predicted coefficient of variation, v | $0 < v < 0,3$ | |
| Determine the number N of test objects | $N = \left(\frac{v}{\delta}\right)^2 \cdot t_{\beta}; N-1$ | $N = \frac{(\delta+1)^{\beta}}{2} \cdot \chi_{1-\beta}^2; 2N$ |

It is advisable to apply the known values of the coefficient of variation in relation to the resource HAE and the laws of distribution [5]. To find them in the normal distribution law, as the studied indicators in mechanical engineering are taken mileage of the machine or its units before the stage of overhaul. The most common value in the normal law of distribution of the coefficient of variation is considered $v = 0,20$.

For a fairly complete description of random processes that occur continuously over time in a discrete system, it is necessary to analyze the reasons that cause the transition of the system from one state to another. For

a real-time (RF) system, the main factor that determines the processes that take place in it is the flow of orders. This flow consists of its individual components with low intensity, because it is stationary ordinary.

In [6] it was shown that when collecting individual flows into an integral one, we obtain a flow quite close to the flow, which is characterized by a "Poisson" distribution of the probability of events, provided that the number of these flows goes to infinity. For practical needs, it is enough to use 4-5 threads to get a single distribution stream. Since the intensity of the flow of requests is a function of the intensity of the mileage HAE,

for those car owners whose loads on the machines are uniform, enter $\lambda = \text{const}$. In this case, the demonstration of the flow and research on it are significantly simplified [9].

The mathematical expectation of the number of orders X on SP during the day can be determined by the formula.

$$M[x] = \sum_{i=1}^k x_i \frac{n_i}{n}, \quad (4)$$

where n – squares of deviations.

The hypothesis is tested using the Pearson test (χ^2). Checking the consistency between the theoretical and experimental distribution is that the size of the difference between them is determined as the sum of the squares of the deviations $\left(\frac{n_i}{n} - P_{xi}\right)^2$, that is:

$$\chi^2 = U = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - nP_{xi})^2}{nP_{xi}}. \quad (5)$$

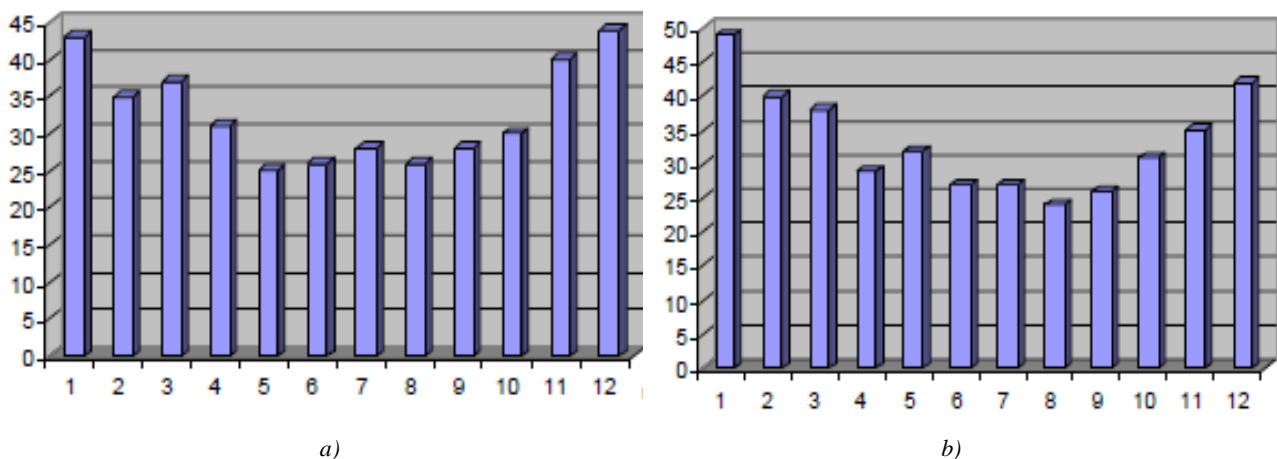


Fig. 2. The average values of the parameters of the flow of requests λ for RP depending on the study period (months 2020) of the following brands of cars: a) Skoda; b) Citroen

The study of the average values of the parameters of the flow λ of requests in the RP performed on four SSS operating in Ukraine, allowed to obtain the main numerical characteristics of the law of distribution of request flows for repair and maintenance effects on some basic elements of cars.

The study determined both the time costs for different types of services and the values of the average intensities of the output streams of RP requests in the tested service centers. Considered: engine, clutch, transmission, rear and front axles, chassis (brake system).

Based on the results of the research, the approach to making the right informed decisions was determined and a conceptual model of management information support was developed. This model includes a set of blocks that are connected in series.

Rational decision-making is carried out in the blocks of the first group, and provides a detailed analysis and expert evaluation of the formed decisions.

where nP_{xi} – theoretical absolute frequency after joining;
 n_i – absolute frequency after joining based on experience;
 k – number of classes after joining.

Analysis of information on the number of requests per month for the period of research in specialized branded centers, allows us to determine that the parameter flow λ of RP requests, which is a function of the failure rate of cars is directly dependent on their workload. Where the load of the machine is uniform, we can assume that the flow of failure rate is a constant value, and, consequently, the flow of requests for RS is constant.

The analysis of information on appeals to service centers showed that the time period for cars of four brands (studied) can be divided into two periods: in the studied periods of time the parameters of the flow of requests λ are different, and therefore the organization of requests should be different.

According to the results of the study, using formulas 4, 5, empirical and theoretical distribution curves were constructed, the average number of requests in the RP of the studied brands of Skoda, Citroen for 2020, which is presented in fig. 2.

Since the technology of strategic management involves, in some cases, the restructuring of the SSS, the second group of units implements a regulated sequence of actions for the restructuring of the SSS, in particular, the relevant tangible and intangible assets.

The third group of blocks is designed to evaluate and justify decisions to determine the HAE model line for procurement under LIP.

The model described above, in principle, is suitable for solving a wide range of practical problems related to the justification of the choice of model range not only cars but also other technical means, such as various technical equipment (machines, units, etc.). At the same time, the specifics of LIP create risks of very large financial and time losses due to making irrational decisions. This fact necessitates the addition of a comprehensive model for assessing the operational quality of HAE with a set of special functional units designed to improve the efficiency of the quality assessment process. Thus, in the first group

of blocks it is advisable to apply the representation of a set of factors that determine the operational quality of HAE in the form of linguistic variables with appropriate scales. This expansion of the integrated model will increase the comfort of experts, which will directly affect the efficiency of the whole process.

Let's present a comprehensive model for assessing the operational quality of HAE in the form of a "black box", the input of which provides information about the factors that determine the quality of operation P . Multiple factors from the set P are characterized by the degree of importance V and intensity of the flow of applications for TS I (in time). The main parameters for each factor are the threshold values – lower K_l and upper K_{up} . At the output of the model, a set of relevant estimates of the level of operational quality of HAE C is formed.

Consider the parameters of the complex HAE model described above as linguistic variables.

It is known that a variable is called linguistic if its meanings are words, phrases of natural language. The linguistic variable can be described by a set (X, T, U, G, M) , where X – variable name; T – term set of a variable X , that is, the set of all names of linguistic values of a variable X , and each of these values is a fuzzy variable X with values from the universal set and with the base variable U ; G – syntactic rule that generates names X of the value of the variable X ; M – a semantic rule that matches each fuzzy variable X to its meaning $M(X)$. The concrete name X , generated by a syntactic rule G , is called a term.

In turn, a fuzzy subset M is defined as some set X with the function of belonging $\mu_M(X)$, which takes values from the interval $[0, 1]$:

$$M = \int_{x \in X} \mu_M(X) / X,$$

where $\mu_M : X \rightarrow [0, 1]$ – function of belonging.

Table 2. Fuzzy values of parameters of the complex model of evaluation of operational quality of HAE

| The name of the linguistic variable | Terms | Fuzzy set medium |
|--|----------------|------------------|
| Lower quality threshold K_l | Low | 9-22 |
| | Average | 19-25 |
| | High | 24-30 |
| Upper quality threshold K_{up} | Low | 20-25 |
| | Average | 24-33 |
| | High | 31-40 |
| The intensity of the flow of applications for TS I | Below the norm | 1-5 |
| | Norm | 3-6 |
| | Above the norm | 6-7 |
| HAE performance level C | Small | 9-15 |
| | Average | 14-24 |
| | High | 23-30 |

Let's assume that the most important factors for assessing the performance of HAE are the values of variables K_l , K_{up} and P . Let the area change K_l determined by the interval $[9...30]$, K_{up} – $[20...40]$, P – $[1...7]$. An absolute scale was used to determine the intervals.

On the basis of the data which can be received as a result of interrogation of experts, for the considered linguistic variables such term sets are defined.:

T (lower quality threshold K_l) = lower than acceptable + acceptable + higher than acceptable;

T (upper quality threshold K_{up}) = lower than acceptable + acceptable + higher than acceptable;

T (the intensity of the flow of applications for TS I) = below normal + normal + above normal.

We also define the linguistic variables that describe the initial parameter of the model, namely the set of relevant estimates of the level of operational quality of HAE C , with areas of change in this value are respectively in the range $[9...30]$.

Based on the above, term sets can be written as:

T (the lower limit of the level of operational quality of HAE C_l) = small + average + high;

T (the upper limit of the level of operational quality of HAE C_{up}) = small + average + high.

For each term, a corresponding fuzzy set is constructed from the term sets defined for linguistic variable M with its carrier, which is determined on the basis of the study of expert assessments. In this case, the carrier of the fuzzy set means the set X' , such as:

$$X' = \{x | \mu_M(X) > 0, x \in X'\}.$$

The results of fuzzification of a comprehensive model for assessing the operational quality of HAE are presented in table 2.

The next stage of phasing of the complex model [19] of HAE performance assessment involves the construction of a set of rules describing the level of HAE performance. The rules are generalized

$$\text{IF } A = N, \text{ THEN } B = M,$$

where A, B – linguistic variables; N, M – terms of the corresponding linguistic variables.

For example:

$$\begin{aligned} &\text{IF the lower quality threshold} = \langle \text{high} \rangle, \\ &\text{THEN quality level} = \langle \text{medium} \rangle. \end{aligned}$$

A matrix of fuzzy relations is built on the basis of a set of rules. As is known, a fuzzy binary relation R is a subset of a Cartesian product $X \times Y$:

$$R = \int_{(x,y) \in X \times Y} \mu_R(x,y) / (x,y).$$

Next, the constructed matrices are combined

$$\mu_R = \max(\mu_{R_1}, \dots, \mu_{R_n}).$$

For the organization of the logical conclusion the compositional rule of the logical conclusion which separate case is the known syllogism Modus Ponens is used.:

$$\text{BASIS 1 IF } x \in A, \text{ THEN } y \in B$$

$$\text{BASIS 2 } x \in A$$

$$\text{BASIS } y \in B.$$

There are quite a number of fuzzy relations used in the compositional rules of inference. But in this case it is appropriate to apply one of three rules:

$$1. R_m = (A \times B) \cup (-A \times V) = \int_{u \times v} (\mu_A(u) \wedge \mu_B(v)) \vee (1 - \mu_A(u)) / (u, v).$$

$$2. R_a(-A \times V) \oplus (U \times B) = \int_{u \times v} (1 \wedge (1 - \mu_A(u) + \mu_B(v))) / (u, v).$$

$$3. R_C = A \times B = \int_{u \times v} \mu_A(u) \wedge \mu_B(v) / (u, v).$$

The specifics of LIP life cycle management, including the solution of the problem of determining the HAE model range, necessitates the use of a number of special methods based on the principles of the competency approach in the selection of applicants for inclusion in the team of experts. Collective expert evaluation is largely determined by the fuzzy nature of the process of forming evaluations by both individual experts and the team of experts as a whole. These circumstances indicate the feasibility of using fuzzy logic in collective expert evaluation, in order to reduce the impact of uncertainty on the objectivity of expert evaluation.

The expert survey procedure can lead to several cases, each of which requires special methods of processing the survey data. However, quite often in practice it all comes down to averaging in one way or another assessment of individual experts. Obtaining an average assessment will be justified only if there is a sufficiently high consistency of expert assessments. If several groups are formed in the expert commission, standing in significantly different positions, then a simple averaging of the assessments of all experts will be meaningless.

Subgroups of experts (usually small) or individual experts, whose assessments differ quite sharply from the assessments of the majority, have been called "dissidents" in the literature. In order to artificially achieve consistency in the assessments of dissident experts are excluded from the expert group. However, they may include original thinkers who have delved deeper into the problem than most experts.

A mild way to combat dissidents is to use robust (stable) statistical procedures, namely the use of methods that are known in the theory of rough sets.

When performing an expert operation (in the case when the assessments of experts are expressed in the scale of relations) with the appointment of weights of criteria and alternatives, the number of which can be quite large (more than 10), there are some difficulties. This is due to the fact that in such conditions, the expert is quite difficult to rank or break the elements. To solve this problem, the method of pairwise comparison of elements (objects) is widely used, which in turn is the basis for other methods of analysis of multicriteria alternatives (ordinal sum method, generalized ordinal sum method for incomplete pairwise comparisons, hierarchy analysis method, and scalar convolution method), etc.).

The application of the above formal means of collective peer review aims to increase the objectivity of the decisions made regarding the justification for the choice of the HAE model line at the stage of LIP initiation.

In the course of the research an applied information technology was developed, the description of which in the IDEF0 notation is given in fig. 3.

The application of the developed information technology, based on CASE-tools, common in the practice of software engineering, will increase the efficiency of the process of assessing the operational quality of HAE by reducing the risks of irrational decisions that lead to financial losses in both HAE procurement and operation.

Conclusions and prospects for further research

1. A comprehensive model for assessing the quality of heavy vehicles, at the stage of its operation, using the principles and approaches that are generally accepted in the system analysis.

2. The method of presentation and further realization of the complex model of quality estimation by means of

fuzzy mathematics that increases efficiency of expert estimation is stated.

3. A method of forming a team of experts is proposed, which allows to justify the choice of an expert from a number of applicants and to draw conclusions about the communication capabilities of individual members of the team of experts.

4. The applied information technology of complex assessment of quality of heavy automobile equipment in the aspect of its operation is described, for the purpose of a substantiation of a choice of a model line for purchase of this equipment at realization of large-scale infrastructure projects.

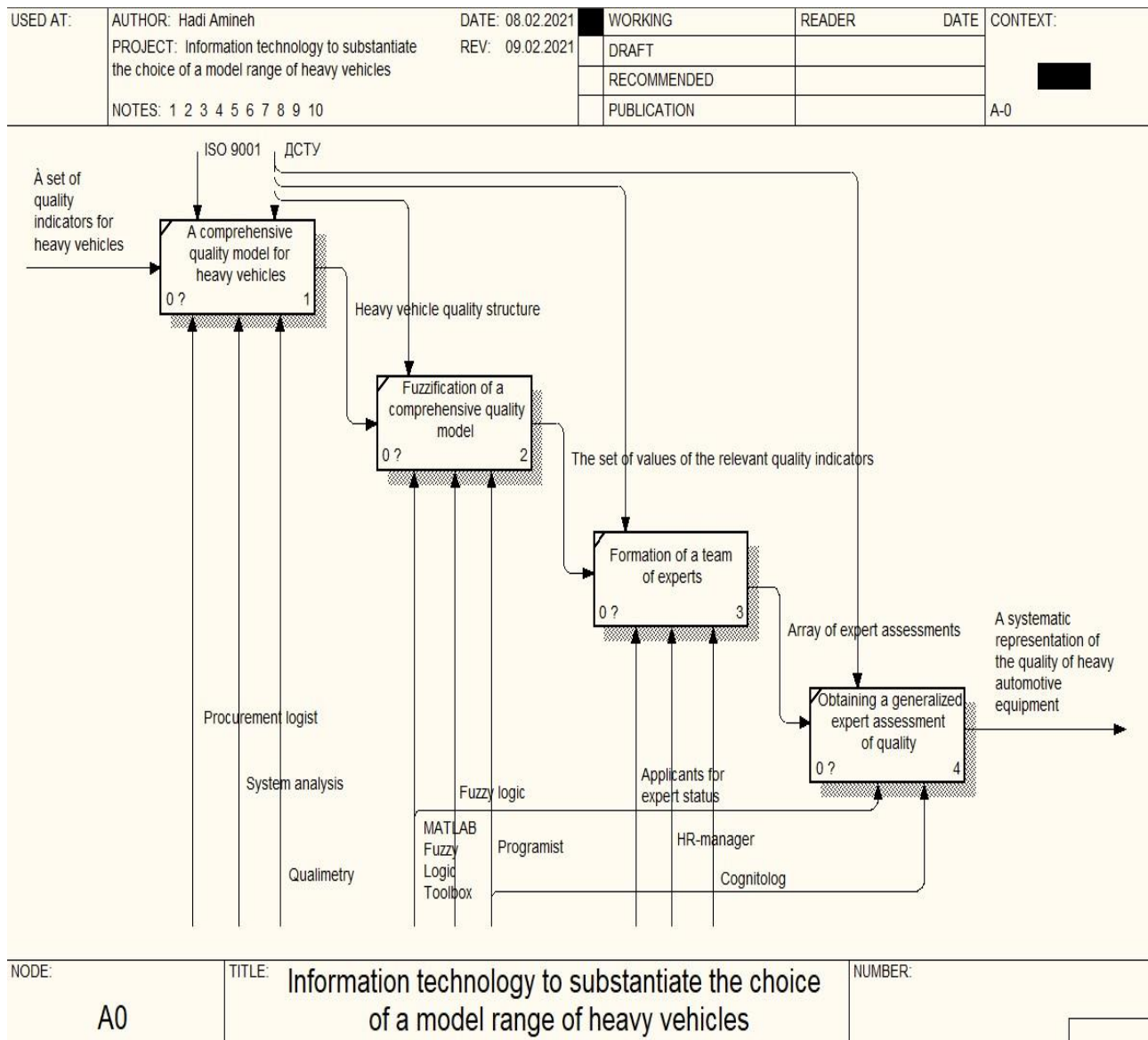


Fig. 3. Applied information technology for substantiation of the HAE model line in the process of planning and implementation of LIP

References

- Zekunov, A. G., Ivanov, V. N., Mishin, V. M., Pazyuk, Yu. V., Vlasova, T. I. (2015), *Quality management* : collective monograph, Moscow : Yurayt Publishing House, 475 p.
- Huang, E. (2010), "Product quality indicators and methods of their assessment at an industrial enterprise", *Questions of modern science and practice*, No. 10-12 (31), P. 246–254.
- Medunetskiy, V. M. (2013), *Fundamentals of quality assurance and certification of industrial products* : a tutorial, SPb. : NRU ITMO, 61 p.
- Astanina, M. A. (2014), *The system of quality audit: a cognitive approach*, Moscow : MISAO, 108 p.
- Stylidisa, K., Wickmana, C., Söderberga, R. (2015), "Defining perceived quality in the automotive industry: an engineering approach", *Procedia CIRP* 36 (2015) P. 165–170, available at : http://ac.els-cdn.com/S2212827115006034/1-s2.0-S2212827115006034-main.pdf?_6

6. Paulo, A., Cauchick, M., Terra da Silva, M., Chiosini, E. L., Schütze, K. (2007), "Assessment of service quality dimensions: a study in a vehicle repair service chain", available at : <http://www.poms.org/conferences/cso2007/talks/36.pdf>
7. Liu, X. - B., Zhou, M., Yang, J. – B., Yang, S. - L. (2008), "Assessment of strategic R&D projects for car manufacturers based on the evidential reasoning approach", *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Vol. 1, No. 1, P. 24–49.
8. Key outcomes from Life Cycle Assessment of vehicles, a state of the art literature review Maarten Messagie1, Cathy Macharis, Joeri. VanMierlo// Barcelona, Spain, November 17-20, 2013.
9. Huang En. (2010), Product quality indicators and methods of their assessment at an industrial enterprise / Enb Huang // Questions of modern science and practice. - No. 10-12 (31). - P. 246-254.
10. Hadi Amineh (2016), "The product quality: characteristics, essence, evolution of approaches", *Economy. Management. Modern problems and prospects of development*, Kraków, No. 4, P. 64–72.
11. Kosach, N. I., Siroklyn, V. P., Hadi, A. (2016), "The quality of the system engineering company Iran Khodro management", *All-Ukraine Scientific and Technic Conferense of Young Scientists in Metrology*, No. 1-5, P. 8296.
12. Hadi Amineh, Kosach, N. (2016), "Assessment of Consumers' Satisfaction with the Automotive Product Quality", *International Journal of Environmental & Science Education*, Vol. 11, No. 16, P. 8726–8739.
13. Stroganov, V. I. (2012), "Results and prospects of development of electric vehicles and cars with hybrid power plants", *Electronics and electrical equipment of transport*, No. 2.
14. Vitovtova, A. A. (2016), "Analysis of quality and evaluation of competitiveness of the product products", *Materials of the VIII International Student Electronic Scientific Conference "Student Scientific Forum"*, available at : <http://www.scienceforum.ru/2016/1846/21694> (date accessed: 06.12.2016).
15. Leonov, O. A., Tamasova, G. N. (2015), *Economy of quality*, Saarbruken, 305 p.
16. Leonov, O. A., Tamasova, G. N., Vergazova, Yu. G. (2015), *Quality management*, Moscow : Publishing house RSAU, Moscow Agricultural Academy, 180 p.
17. Kovalenko, I. I., Shved, A. V. (2012), *Methods of expert assessment of scenarios* : textbook allowance, Nikolaev : Publishing house of ChGU im. Petra Mogila, 156 p.
18. Zadeh, L. (1975), "Fuzzy Logic and Approximate Reasoning", *Synthese*, Vol. 80, P. 407–428.
19. Shostak, E. I. (2016), "Fuzzy model for assessing the admissibility of including applicants in the team of executors of high-tech projects, according to the level of competence", *Vestnik dvigatelestroyeniya*, No. 2, P. 42–48.

Received 29.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Рудницький Володимир Миколайович – доктор технічних наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, завідувач кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії, Черкаси, Україна; email: rvn_2008@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3473-7433>.

Рудницький Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Черкасский государственный технологический университет, заведующий кафедры информационной безопасности и компьютерной инженерии, Черкассы, Украина.

Rudnytskyi Volodymyr – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Cherkasy State Technological University, Head of the Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy, Ukraine.

Хаді Аміне – Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", аспірант, Харків, Україна; email: hadiamineh@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6367-5027>.

Хади Амине – Национальный аэрокосмический университет имени Н. Е. Жуковского "Харьковский авиационный институт", аспирант, Харьков, Украина

Hadi Amineh – National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Postgraduate, Kharkiv, Ukraine.

МЕТОДИЧНІ ЗАСОБИ РЕАЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСПЕРТНОГО ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ВАЖКОЇ АВТОМОБІЛЬНОЇ ТЕХНІКИ В ПРОЦЕСІ ЇЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Предмет. Обґрунтування вибору модельного ряду важкої автомобільної техніки при організації закупівель в рамках великомасштабних інфраструктурних проєктів. **Мета.** Підвищення ефективності процесу визначення модельного ряду важкої автомобільної техніки, в аспекті її експлуатації, на етапі ініціації великомасштабних інфраструктурних проєктів, шляхом створення спеціального методичного підходу, а на його основі – відповідної інформаційної технології підтримки прийняття рішень. **Завдання.** Розробити комплексну нечітку модель оцінювання якості важкої автомобільної техніки в ході її експлуатації. Запропонувати метод колективного експертного оцінювання якості важкої автомобільної техніки в ході її експлуатації. Розробити прикладну інформаційну технологію підтримки прийняття рішень щодо формування модельного ряду важкої автомобільної техніки, що закуповується. **Методи.** Системний аналіз - при розробці комплексної моделі якості важкої автомобільної техніки; нечітка математика – для забезпечення процесу нечіткого оцінювання експертами якості важкої автомобільної техніки в ході її експлуатації;

експертологія – при створенні методу формування узагальненої оцінки якості шляхом колективного експертного оцінювання; програмна інженерія – при створенні прикладної інформаційної технології колективного експертного оцінювання якості важкої автомобільної техніки. **Результати.** Підхід до створення низки прикладних інформаційних технологій комплексного експертного оцінювання якості експлуатації широкого класу транспортних засобів на прикладі важкої автомобільної техніки. **Висновки.** Розроблено комплексну модель оцінювання якості важкої автомобільної техніки, на етапі її експлуатації, з використанням принципів та підходів, що є загальноприйнятими у системному аналізі. Викладено метод представлення й подальшої реалізації комплексної моделі оцінювання якості засобами нечіткої математики, що підвищує ефективність експертного оцінювання. Запропоновано метод формування колективу експертів, що надає змогу обґрунтувати вибір експерта з низки претендентів та зробити висновки про комунікаційні можливості окремих членів колективу експертів. Описано прикладну інформаційну технологію комплексного оцінювання якості важкої автомобільної техніки в аспекті її експлуатації, з метою обґрунтування вибору модельного ряду для закупівлі цієї техніки при реалізації великомасштабних інфраструктурних проектів.

Ключові слова: важка автомобільна техніка; комплексна модель якості; нечітка математика; колективне експертне оцінювання; підтримка прийняття рішень; прикладна інформаційна технологія.

МЕТОДИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ТЯЖЕЛОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В ПРОЦЕССЕ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Предмет. Обоснование выбора модельного ряда тяжелой автомобильной техники при организации закупок в рамках крупномасштабных инфраструктурных проектов. **Цель.** Повышение эффективности процесса определения модельного ряда тяжелой автомобильной техники, в аспекте ее эксплуатации, на этапе инициации крупномасштабных инфраструктурных проектов, путем создания специального методического подхода, а на его основе – соответствующей информационной технологии поддержки принятия решений. **Задание.** Разработать комплексную нечеткую модель оценки качества тяжелой автомобильной техники в ходе ее эксплуатации. Предложить метод коллективного экспертного оценивания качества тяжелой автомобильной техники в ходе ее эксплуатации. Разработать прикладную информационную технологию поддержки принятия решений по формированию модельного ряда закупаемой тяжелой автомобильной техники. **Методы.** Системный анализ - при разработке комплексной модели качества тяжелой автомобильной техники; нечеткая математика – для обеспечения процесса нечеткого оценивания экспертами качества тяжелой автомобильной техники в ходе ее эксплуатации; экспертология – при создании метода формирования обобщенной оценки качества путем коллективного экспертного оценивания; программная инженерия - при создании прикладной информационной технологии коллективного экспертного оценивания качества тяжелой автомобильной техники. **Результаты.** Подход к созданию ряда прикладных информационных технологий комплексного экспертного оценивания качества эксплуатации широкого класса транспортных средств на примере тяжелой автомобильной техники. **Выводы.** Разработана комплексная модель оценки качества тяжелой автомобильной техники, на этапе ее эксплуатации, с использованием принципов и подходов, которые являются общепринятыми в системном анализе. Изложен метод представления и дальнейшей реализации комплексной модели оценки качества, средствами нечеткой математики, который дает возможность повысить эффективность экспертного оценивания. Предложен метод формирования коллектива экспертов, который реализует выбор эксперта из нескольких претендентов, при этом учитываются коммуникационные возможности отдельных членов коллектива экспертов. Описана прикладная информационная технология комплексной оценки качества тяжелой автомобильной техники в аспекте ее эксплуатации, с целью обоснования выбора модельного ряда для приобретения этой техники при реализации крупномасштабных инфраструктурных проектов.

Ключевые слова: тяжелая автомобильная техника; комплексная модель качества; нечеткая математика; коллективное экспертное оценивание; поддержка принятия решений; прикладная информационная технология.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Рудницький В. М., Хаді Аміне. Методичні засоби реалізації інформаційної технології експертного оцінювання якості важкої автомобільної техніки в процесі її експлуатації. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.069>

Rudnytskyi, V., Hadi Amineh (2021), "Methodological tools for the implementation of information technology for expert assessment of the quality of heavy automobile equipment in the process of its exploitation", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.069>

L. SOKOLOVA, V. DYUZHHEV, G. VERIASOVA, O. KURDENKO, AL-FAKHORE ESKNDER SULIAMAN SALTU

SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL SUPPORT OF FINANCIAL EXPRESS ANALYSIS OF SMALL INDUSTRIAL ENTERPRISES OF UKRAINE

The **subject** of research of this work is the current direction in the financial activities of small industrial enterprises – financial express analysis. The **purpose** of the study is to develop a scientific and methodological basis for a simplified procedure of financial supervision of small industrial enterprises in the country in order to provide qualified assistance to managers of small industrial enterprises in the financial sphere of their activities. The article solves the following **tasks**: study of the state of small industrial enterprises and their role in the development of Ukraine's economy, definition of "financial supervision", development of algorithm for financial express analysis of small industrial enterprises, choice of directions for financial express analysis of small industrial enterprises financial supervision, the formation of a bank of input data on four components, testing of scientific and methodological support on the example of a particular enterprise. The following **methods** are used: theoretical generalization, retrospective analysis, comparative analysis, analytical, analysis and synthesis, rapid analysis. The following **results** were obtained: the method of financial express analysis of a small industrial enterprise was proposed on the basis of financial supervision; selected areas of financial analysis under a simplified procedure; the scheme of algorithm of carrying out procedure of financial supervision is developed; the bank of the input data which are necessary for the decision of the set task is formed; substantiation of the choice of applied mathematical models is carried out; the experimental approbation of the offered scientific and methodical approach to carrying out the financial express-analysis on the factual basis of the real small industrial enterprise is carried out; appropriate recommendations were given to the management of the researched enterprise. **Conclusions**: It is determined that in the current unstable economic conditions, small industrial enterprises need professional assistance of consulting orientation in financial activities. Obtaining up-to-date relevant information on the financial condition of small industrial enterprises is a very important task that requires a rapid financial analysis of their activities. The study of this issue showed the lack of consensus of analysts on the directions and methods of financial rapid analysis. This led to the need and feasibility of developing for the management of small industrial enterprises under a simplified procedure of an orderly methodology of financial rapid analysis on the basis of financial supervision.

Keywords: small enterprise; retrospective analysis; financial supervision; methodical support; algorithm scheme; data bank; mathematical model; express analysis; results.

Introduction

Negative phenomena currently occurring in the economy of Ukraine and many countries around the world, significantly affect the viability, competitiveness and efficiency of industrial enterprises, regardless of their size and ownership [1]. This leads to a crisis in the activities of enterprises and can lead them to bankruptcy. A necessary condition for the recovery of the country's economy is the survival of small business. According to a survey conducted by the Union of Ukrainian Entrepreneurs and the Ukrainian Marketing Group, during the pandemic, 29% of Ukrainian companies suspended their quarantine and 6% closed their businesses. Small and medium-sized businesses lost 25-50% of profits and were forced to lay off 10-25% of employees compared to the pre-quarantine period [2].

Thus, in the period of crisis from 2020, small businesses suffer the most. This can be seen in the deterioration of the financial results of small industrial enterprises, their financial stability, and insolvency. Not all companies in crisis can stabilize in time. In the conditions of unstable external environment, strengthening of threats and growth of crisis phenomena in economic and political spheres of the country for domestic industrial small enterprises the task of receiving a positive financial result of their activity acquires special value. That is why the issue of conducting a financial rapid analysis of the small industrial enterprises of the country as a measure that helps prevent companies from falling into crisis and manage them in such a period, is very important and necessary today. We consider it

expedient to propose the introduction of scientific and methodological support for financial rapid analysis as a modern tool of supervision. Based on general interpretations of the concept of supervision [3, 4], we define the definition of "financial supervision" as follows: it is a tool for providing professional assistance in conducting rapid analysis of financial activities of small industrial enterprises, which aims to work with professional difficulties and eliminate shortcomings organization of work in general.

The introduction of such a methodological approach (tool) requires, first of all, the development of a set of measures of scientific and methodological orientation due to the lack of a specialist in financial management in the staff of small enterprises. This determines the relevance of this study, focused on the development of scientific and methodological tools for financial supervision of the management of small industrial enterprises.

Analysis of recent research and publications

Many foreign and domestic scientists have been engaged in research of theoretical and methodological issues of financial analysis of industrial enterprises. Determining the content and assessment of the financial condition of the enterprise, directions, methods and forms of financial analysis, the choice of indicators for assessing solvency, financial stability, business activity, financial management, issues of preventing bankruptcy of economic entities are widely considered in the scientific works of F. Allen, G. Artemenko, O.Ya. Bazilinskaya,

I.T. Balabanov, I.A. Blank, M.V. Belendyr, I.A. Berzhanir, I.M. Boyarko, R. Brayley, E. F. Brigham, A. E. Voronkova, L.T. Gilyarovskiy, O.V. Deineka, I.V. Demyanenko, O.V. Yefimova, L.V. Ivchenko, V.V. Kovaliova, L.O. Ligonenko, S. Myers, I.P. Otenko, A.M. Podderogin, V.M. Rodionova, G.V. Savitskaya, O.S. Stoyanova, L.S. Strygul, T.E. Unkovskaya, K. Walsh, N.M. Ushakova, Yu.S. Tsal-Tsalko, R.A. Chemchikalenko, V.V. Chepko, Yu.V. Shevchuk, A.D. Sheremet, N.I. Shifrin, I.O. Shkolnik, M. Erhard, V.P. Yakovenko, O.O. Yatsukh and many others [5-22]. Scientists have considered a significant part of methodological and applied issues in a particular area of research, but still there is no consensus on the scientific and methodological support of financial rapid analysis of small industrial enterprises. Some issues of theoretical and methodological orientation require further research, which led to the relevance of the research topic.

According to the authors of [19], the analysis of domestic and foreign scientific literature reveals the lack of coverage of the evaluation of the mechanism of studying the financial stability of enterprises. Therefore, they proposed the use of a method of comprehensive comparative rating assessment of financial stability of enterprises.

Scientist V.M. Polozova developed a method of comprehensive graphical assessment of the financial condition of the enterprise [18]. The proposed economic-mathematical model is complex, dynamic and simulation, which makes it impossible to use it as a tool for financial rapid analysis of small industrial enterprises.

In the scientific work of G.M. Shamota and D.O. Malysh approaches to a comprehensive assessment of the financial condition of the enterprise are given [7]. The possibilities of using traditional methods of analysis of the financial condition of business entities in combination with models for assessing their financial stability, which are used in the practice of foreign countries, are described. It is concluded that the current problems are the imperfection of methods for assessing the financial condition of the enterprise, the complexity of the analysis of the financial condition of enterprises. This means that domestic methods need to unify and reduce the number of indicators analyzed. When choosing the estimated financial and economic indicators, preference should be given to those indicators that are more necessary, most meaningful and accessible by the method of calculation.

An article by scientists N.S. Pedchenko and V.O. Zirka [5] is devoted to the modern view on the application of the method of rating assessment of the financial condition of the enterprise. The developed methodology is based on the use of modern economic and mathematical methods and necessarily requires the formation of a group of enterprises – participants in such an assessment within a certain market segment or a certain industry. This approach, in our

opinion, is quite problematic in terms of practical implementation.

Scientific and methodological approach to the integrated assessment of the financial condition of the enterprise for the purpose of its comprehensive analysis and development of proposals for its improvement is covered in [6]. The authors of the article I.A. Berzhanir, O.A. Vinnytska, N.I. Gvozdey came to the conclusion that despite the large number of publications on the assessment and analysis of the financial condition of enterprises, today we can state the lack of a unified approach to the formation the main indicators of financial condition assessment, methods of their calculation and interpretation of evaluation parameters that affect the quality and reliability of the calculation of the integrated assessment of the financial condition of economic entities, with which it is impossible to disagree.

To date, not all experts, analysts agree on the directions and methods of financial rapid analysis. So scientists V.M. Ivakhnenko and K.G. Kirichenko devoted their article to the express analysis of the financial condition of the enterprise [13]. Based on the results of consideration of existing developments in this matter, they proposed as a criterion for assessing the financial condition of the enterprise solvency ratio. Co-authors of the work [2] Sinitsyna Yu. P., Kvasova L.S., Chebanova M.O. conducted research of crisis situations during a pandemic on the example of small business organization, which determines a certain potential for further research on possible ways to improve scientific and methodological approaches to financial express analysis, diagnostics and overcoming of crisis situations in the activity of small industrial enterprises of Ukraine. To assess the level of financial stability of small enterprises in [30] a methodological approach is proposed, which is based on the use of a system of financial indicators with a limited number of them: Beaver ratio and total solvency ratio. Scientists L.V. Sokolova and O.V. Kolisnyk in scientific work [26] formed a matrix of dynamics of the level of financial stability on the example of statistical information of four real small enterprises. The advantages of the proposed methodological approach are the simplicity of calculation of indicators, visual presentation of the results, the ability to assess the level of financial stability of enterprises in the dynamics, which can be further taken into account when developing strategies for small industrial enterprises and management decisions.

An important component of financial rapid analysis is the assessment of the stability of the financial condition of a small enterprise. Both foreign and domestic scientists have dealt with the issue of crisis prevention and the probability of bankruptcy at enterprises, so currently there are many working methods/assessment models, some of which are used in the practice of domestic enterprises [43-45]. Popular mathematical models and methods in Ukraine are those that are presented in table 1.

Table 1. Comparative characteristics of existing models for assessing the crisis probability of bankruptcy

| Name of methodology/model | Advantage | Disadvantage |
|---|--|--|
| Regulatory methods for diagnosing the threat of bankruptcy | | |
| Order of the Ministry of Economy of Ukraine dated January 19, 2006 No. 14 | Unambiguous approach in assessing the crisis and bankruptcy, a comprehensive analysis of financial and economic activities, the ability to determine the type of bankruptcy and the causes of the crisis | Too many evaluated indicators complicate the application of the methodology, duplication of individual ratios, ignoring the indicators of market activity, as well as the state and structure of cash flows of the enterprise |
| Models of integrated assessment of crisis/probability of bankruptcy | | |
| Models of Altman, Fox, Taffler, Springgate, Fulmer, Tishaw, Olson, R-model of bankruptcy risk forecast | Insignificant number of indicators, simplicity and speed of calculations, availability of data necessary for calculations, possibility to estimate a financial condition and to predict bankruptcy | Not suitable for the economy of Ukraine, the impossibility of application to small businesses, lack of accounting legislation, inconsistency of methodological methods of calculating indicators of Ukrainian financial statements, subjectivity of choice of indicators, lack of time adjustments, the use of linear dependence |
| Rating number method (Saifulina, Kadykova) | | Insufficient validity of indicators and their normative values, impossibility to determine the reasons for enterprises to fall into the zone of "insolvency", ignoring the sectoral characteristics of objects |
| Discriminant model of integrated assessment of financial condition by Tereshchenko | Taking into account the specifics of the subjects, a small number of indicators, the availability of information needed to calculate the parameters of the model | Insufficient level of validity of indicators, application only for individual enterprises, wide range of uncertainty |
| Comprehensive diagnosis of crisis state by Ligonenko | A large number of indicators of financial condition, the possibility of application by both internal and external stakeholders, the allocation of indicators of rapid and fundamental diagnostics | Duplication of individual indicators, identification of liquidity and solvency indicators, ignoring indicators of production and economic activity and market activity of the enterprise |
| Techniques based on building a system of indicators | | |
| In-depth analysis of financial and economic activity by Chernyavsky | Coverage of various indicators of economic activity, the presence of criteria for which the state of the enterprise can be attributed to a certain type | Insufficient number of indicators, unavailability of information for calculation of indicators of the model of ignoring indicators, which are calculated on the basis of net cash flow |
| In-depth analysis of the financial and economic activities by Gryaznova | Phased and simple calculations, coverage of indicators of various aspects of economic activity, availability of information for analysis | ignoring indicators of business activity, identification of indicators of liquidity and solvency, lack of limits of criteria for carrying the enterprise to this or that condition |
| Methods for assessing the threat of financial crisis and bankruptcy of enterprise by Sypyagin | Insignificant number of indicators, simplicity and speed of calculations, availability of information for analysis, detailed analysis of the composition and structure of receivables and payables | Lack of indicators that can be used to predict the loss or recovery of solvency, limited list of indicators of financial condition, which does not allow for a comprehensive assessment, lack of consideration of the dynamics of changes in the financial condition of the enterprise |
| The system of indicators of the financial condition of the enterprise for the diagnosis of its bankruptcy according to the Beaver model | Ability to identify unsatisfactory balance sheet structure, simplicity and speed of application, forecasting the risk of bankruptcy for several years ahead | Designed only for successful enterprises, non-compliance with regulatory values for enterprises in some industries, ignoring the status and structure of cash flows, receivables |

Source: formed taking into account [43-45]

Each model and methodology has its advantages and disadvantages that can affect the forecasting results. Therefore, it is important to indicate them in order to make an adequate choice of model and correctly interpret the results. It is necessary to choose such models that would take into account the peculiarities of the Ukrainian economic space and the industry in which a particular enterprise operates.

Selection of previously unsolved parts of the overall problem

Currently, the strategic focus of the industrial enterprises of Ukraine is a high level of their competitiveness, which is impossible without ensuring their efficiency, financial stability, solvency, flexibility [1, 23] in an unstable environment. The analysis of professional literature on the chosen research topic

allowed to state the following: despite a significant amount of theoretical and methodological developments in the field of financial management of enterprises, further research requires the development of theoretical and methodological support for small industrial enterprises to conduct financial rapid analysis of their activities; the choice of specific scientific and methodological support to some extent depends on the ultimate goal of financial analysis, the essence of analytical work at the enterprise, its size and industry affiliation.

It was found that not only the essence of the definition of "financial supervision" has been insufficiently studied, but also a number of issues related to the procedure of providing professional assistance in conducting a simplified procedure of financial express analysis of small industrial enterprises. This indicates the relevance of the topic of this study.

Formulation of the goals of the article (task statement)

The purpose of the study is to develop a scientific and methodological basis. The purpose of the article is to develop a scientific and methodological basis in the form of methodological recommendations for providing financial express analysis of the activities of small industrial enterprises in selected areas on the basis of financial supervision to provide qualified professional assistance to the management of these enterprises. The purpose of the article is to create a scientific and

methodological basis for the financial supervision of the activities of small industrial enterprises in the country using the method of express analysis.

Study results

In a market economy, small business is an element of development of the regions and Ukraine as a whole. Small enterprises are an organic structural element of the national economy, because the results of their activities affect the socio-economic indicators of the country [24-26]. Therefore, today the intensification of Ukrainian small industrial enterprises, their development, organization and analysis of financial results is of particular importance. Indicators of development of small enterprises in Ukraine are characterized by a certain dynamics. The table 2 shows the data that characterize the changes in the volume of output by small enterprises - small businesses of Ukraine for the period 2013-2019 [27].

It can be concluded that the volume of products produced by small enterprises, calculated both in natural and relative terms, and is characterized by growth dynamics. However, against the background of increasing inflation in the country, it is impossible to assess this as a 100 percent positive result. Table 3 shows individual indicators that characterize the activities of small enterprises.

Table 2. Volume of products manufactured by small enterprises of Ukraine

| Year | Volume of products manufactured by small enterprises | | | |
|------|--|---|--------------|---|
| | total | | industry | |
| | million UAH. | % to the total indicator of business entities | million UAH. | % to the total indicator of business entities |
| 2013 | 513644 | 19,8 | 91512 | 7,2 |
| 2014 | 616086 | 21,3 | 96450 | 7,2 |
| 2015 | 745058 | 21,6 | 120655 | 7,5 |
| 2016 | 1014203 | 24,0 | 169140 | 8,8 |
| 2017 | 131332 | 24,7 | 216640 | 8,8 |
| 2018 | 1605385 | 25,9 | 267790 | 9,6 |
| 2019 | 1971187 | 28,2 | 295145 | 10,1 |

Source: formed on the basis of [27].

Table 3. Performance indicators of small enterprises in Ukraine

| Year | Number of small enterprises, units | The share of the number of small enterprises in the total number of enterprises, % | Volume of sold products (goods, services) of small enterprises / total enterprises, UAH million | The share of sales of products (goods, services) of small enterprises in total sales, % |
|------|------------------------------------|--|---|---|
| 2013 | 373809 | 95,04 | 670258/4050215 | 16,55 |
| 2014 | 324598 | 95,19 | 705000/4170660 | 16,90 |
| 2015 | 327814 | 95,45 | 937113/5159067 | 18,16 |
| 2016 | 291154 | 95,03 | 1177385/6237532 | 18,88 |
| 2017 | 322920 | 95,47 | 1482001/7707935 | 19,23 |
| 2018 | 339374 | 95,36 | 1766150/9206049 | 19,18 |
| 2019 | 362328 | 95,20 | 1839876/9639731 | 19,09 |

Source: formed on the basis of [27].

It should be noted that the statistics, which are given in table 2 and table 3, do not take into account the information of the temporarily occupied territories of the Autonomous Republic of Crimea, the city of Sevastopol

and parts of the temporarily occupied territories in Donetsk and Luhansk regions. The positive direction of the dynamics of the above specific indicators is mainly characteristic of the periods of time: 2013-2015, 2017.

The number of small enterprises per 10 thousand people of the current population was: 2013 - 82, 2014 - 76, 2015 - 77, 2016 - 68, 2017 - 76, 2018 - 80, 2019 - 86 units [27]. The rate of change in the number of small enterprises per 10 thousand people of the current population amounted to 104.88% in 2019 compared to 2013, which is a positive sign of development.

A necessary factor in the development of the economy of Ukraine and its regions is the cash flow from the activities of business structures, including the activities of small industrial enterprises. A significant

percentage of the population working in a particular sector of the economy creates competitive products, thus affecting the socio-economic situation of the country. For example, in many European countries, small businesses generate up to 60% of cash flows to the budget [24]. In Ukraine, unfortunately, the pace of development of small enterprises has an unstable trend. In fig. 1 presents changes in the share of sales of products (goods, services) by small enterprises of Ukraine in the total sales for the period 2013-2019.

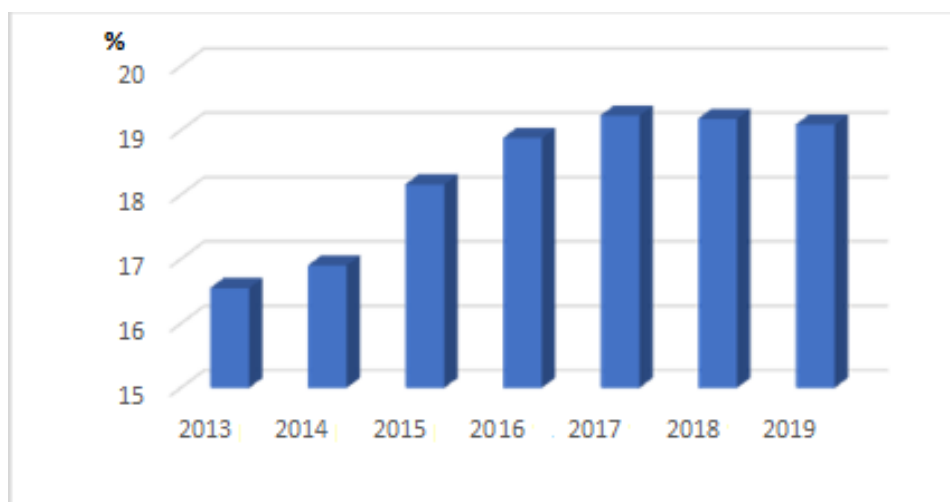


Fig. 1. The share of sales of products (goods, services) by small enterprises of Ukraine

Source: formed on the basis of [27].

An important indicator of the activity of each small enterprise is the financial result. An analysis of the net profit indicator, which is a characteristic of the financial result of production and economic activities of each entity was done. In order to assess the dynamics of changes in such indicators as the share of profitable enterprises of

Ukraine and the financial result of their activities, based on official statistical information of the State Statistics Service of Ukraine [27] was analyzed profitability of small industrial enterprises of Ukraine. The table 4 shows data that demonstrate the change in profitability of small industrial enterprises of Ukraine during 2013-2019.

Table 4. Dynamics of profitability indicators of small industrial enterprises of Ukraine

| Year | The share of small industrial enterprises that made a profit, % | Financial result of profitable small industrial enterprises | |
|------|---|---|--|
| | | absolute value, UAH million | relative value, % to the previous year |
| 2013 | 65,0 | 35748 | 100,00 |
| 2014 | 65,7 | 45237 | 126,54 |
| 2015 | 73,5 | 89390 | 197,60 |
| 2016 | 72,8 | 99299 | 111,09 |
| 2017 | 72,3 | 107935 | 108,70 |
| 2018 | 73,7 | 127659 | 118,27 |
| 2019 | 73,3 | 162563 | 127,34 |

Source: formed taking into account [27].

The analysis of the obtained data shows the instability of the dynamics of the financial result of profitable small industrial enterprises from 2014 to 2019 inclusive compared to the previous year, respectively.

Representatives of small business of Ukraine - small industrial enterprises represent one of the leading sectors of the market economy, which is formed on the basis of small-scale production. Small enterprises are characterized by rational forms of management, rapid and

adequate adaptation to unpredictable changing challenges of the market and the external environment. A significant advantage of small enterprises is their mobility, which is ensured by the absence of complex multi-level management decision-making systems. During the pandemic and, as a consequence, the financial crisis in the country, the advantages of small businesses over large areas of life include those listed in table 5.

Table 5. Advantages of small enterprises during the financial crisis

| Sphere of life | Advantage |
|----------------|--|
| Economic | Structural restructuring of the country's economy and its regions, freedom of market choice, mobility of responding to changes in the external environment and economy of the country, promotion of weakening of monopolism and development of competition |
| Social | Formation of a new social layer of entrepreneurs - owners; reducing social tension in society, ensuring the saturation of the market with consumer goods and services of everyday demand |
| Financial | Replenishment of local budgets of regions, fast payback of expenses, implementation of innovations, introduction of creative startups |
| Labor | Creating additional jobs, solving the problem of unemployment in the country |
| Banking | Carrying out activities at their own funds, which eliminates the problem of providing loans |

Source: formed taking into account [24, 25, 28, 29].

So we can hope for the revival of Ukrainian industry through the successful development of small enterprises, because the modern development of Ukraine's economy takes place in an instability environment, inflationary fluctuations, and crisis of defaults, which leads to a decline in production and has a very negative impact on industrial enterprises, especially in the small business segment. Recently, small industrial enterprises operate in a harsh pandemic in the country, resulting in a decrease in their solvency and financial stability, which can lead to complete bankruptcy [26,29].

In these conditions, the problem of obtaining relevant information on the financial condition of small industrial enterprises is very relevant, which requires rapid analysis of their activities. Adequate assessment of the financial condition, attraction and highly efficient use of financial resources requires constant monitoring, with the long-term goal of achieving and maintaining the current level of competitiveness of the enterprise. In the analysis of the financial condition of small businesses can use a variety of techniques, methods and models of analysis. Their number and breadth of application depends on the specific objectives of the analysis and are determined by its objectives in each case. However, small businesses, as small businesses, objectively have limited opportunities to conduct regular financial analysis of their activities. Therefore, we consider it appropriate to recommend small businesses to conduct on a regular basis financial rapid analysis, which belongs to the group of methods of analysis of financial ratios. The economic essence of this method is to assess the crisis parameters of the financial development of the enterprise, carried out on the basis of its financial statements [17, 21, 31-33]. The advantages of this method include efficiency, speed, simplicity (does not require extra time and complex calculations), cheap calculations, the ability to detect signs of crisis in the early stages of the entity, the disadvantage is the superficial assessment of crisis phenomena.

The developed step-by-step scheme of the algorithm of financial express analysis of the activity of a small industrial enterprise is shown in Figure 2.

1. The task statement includes the purpose of solving this problem and contains a description of the economic essence of the financial rapid analysis of a small enterprise and the sources of obtaining the necessary information. Financial rapid analysis is one of the main forms of internal financial analysis at the enterprise level on the basis of "research purpose". The main objectives of the

rapid analysis of the financial condition is a general assessment of the enterprise, its financial condition, identification of "weaknesses" and areas for further in-depth assessment. It is used to quickly assess the financial condition of the enterprise in selected areas and the relevant calculated indicators. Financial rapid analysis is performed according to the financial statements; its advantages are the speed and simplicity of calculations. The source of input information by year is usually an official document of Annex 1 to the provision (standard) of accounting 25 "Simplified financial statements" (paragraph 5 of section 1) "Financial statements of a small enterprise" consisting of: form № 1-m "Balance Sheet", code for SCMD 1801006; form № 2 "Report on financial results", code according to SCMD 1801007. The factual basis of the study was chosen a private small industrial enterprise, the main activity of which according to NCEA 25.62 is the machining of metal products.

2. In the context of financial supervision, a method of scientific and methodological support of financial express analysis of a small industrial enterprise in a simplified procedure in such areas as:

- analysis of the comparative analytical balance with the determination of the dynamics and share of its main sections of assets and liabilities (if necessary);
- analysis of the "golden rule of economics" (business activity) of the enterprise;
- ratio analysis of liquidity, financial stability, business activity, profitability;
- analysis of the level of probability of bankruptcy (as an example of the R-model and the Beaver model);
- the use of financial scoring (for example, according to the method of YouControl) as a fast and convenient system for assessing the solvency of a potential borrower (provided the opportunity and need for the company to assess in advance a positive decision to obtain a loan) [16, 18, 20, 21, 22, 30-42].

3. The formation of the input bank is assumed by such components as: input data of a small enterprise (I - input statistical information; II - intermediate normative and reference information; III - scale of assessment of the stability of the financial condition of the enterprise (Table 6 on the example of a real small industrial enterprise according to the R-model); IV - mathematical models of financial express analysis of enterprise activity (table 7). To solve the problem, a certain set of deterministic analytical multiple and mixed models and the corresponding methods of deterministic analysis was

selected, taking into account the recommendations of [6, 7, 11, 13, 14, 16, 18, 19, 20, 22, 30, 31, 35-38, 42, 43-45].

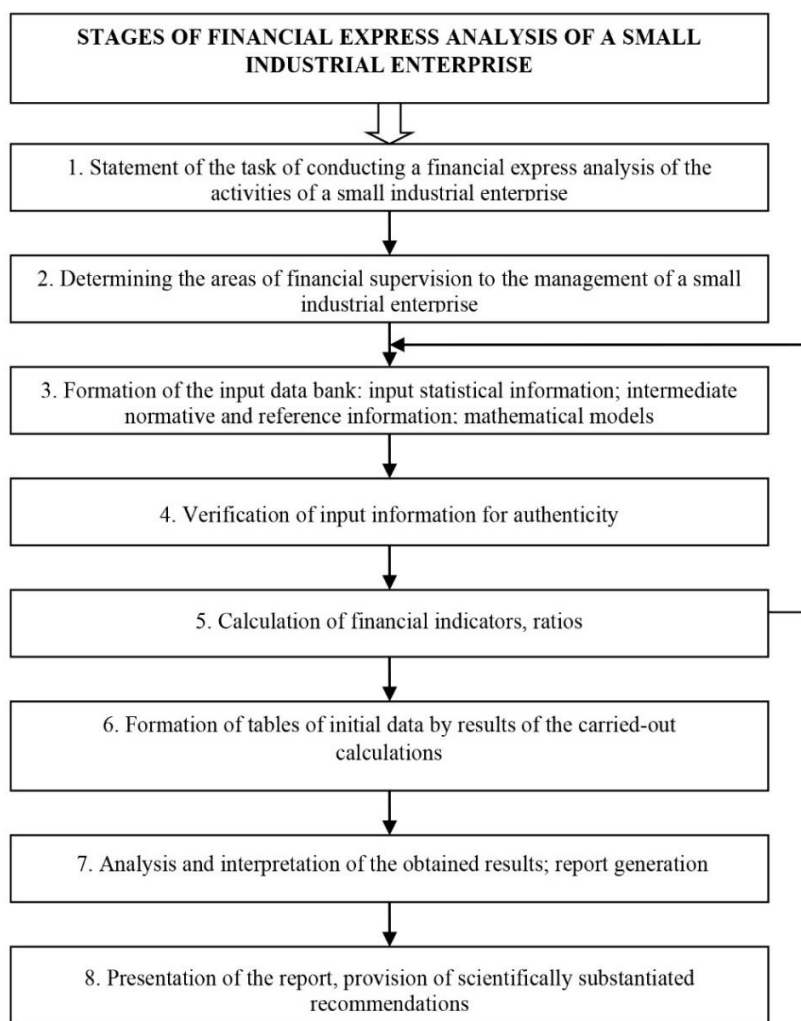


Fig. 2. Scheme of algorithm of financial express-analysis of activity of small industrial enterprise

Source: author's development.

Table 6. Data bank structure by component "Input data of small industrial enterprise"

| Indicator | Value, thousand UAH. | |
|--|----------------------|--------|
| | (t-1) year | t year |
| 1 | 2 | 3 |
| I. Input statistical information | | |
| Non-current assets | 78,3 | 289,2 |
| Wear and tear | 274,7 | 293,0 |
| Current assets | 437,1 | 617,9 |
| Balance | 515,4 | 907,1 |
| Equity | 210,9 | 197,7 |
| Long-term liabilities | - | - |
| Current liabilities | 726,3 | 1104,8 |
| Net income from sales of products (goods, works, services) | 2769,5 | 2690,7 |
| Total costs | 2602,0 | 2677,6 |
| Net profit | 167,5 | 13,2 |
| II. Intermediate regulatory information | | |
| Coefficient/indicator | Recommended value | |
| Current ratio | 1,0–1,5 | |
| Coefficient of financial stability | 0,7–0,9 | |
| Coefficient of financial autonomy | 0,5 | |
| Financial risk ratio | <1 | |
| Beaver coefficient | >0,2 | |
| Indicator of financial stability according to the R-model | >0,42 | |

The end **Table 6.**

| III. Scale for assessing the stability of the financial condition of the enterprise according to the R-model | |
|--|-----------------------|
| The value of the stability index R | Level of stability, % |
| Less than 0 | Minimum (90-100) |
| 0-0,18 | Low (60-80) |
| 0,18-0,32 | Average (35-50) |
| 0,32-0,42 | High (15-20) |
| More than 0.42 | Maximum (up to 10) |

Source: developed by the authors taking into account [7, 8, 16, 22, 35-38].

Next, according to the presented algorithm, it is necessary to check the input information for authenticity. In case of errors it is necessary to correct input data (table 6).

Table 7. The structure of the data bank on the component "IV - Mathematical models"

| Direction of analysis | Mathematical model (formula) | Characteristics of the model parameter |
|---|--|--|
| 1 | 2 | 3 |
| 1. Analysis of the main items of the balance sheet of the enterprise | $GRE_i = \frac{I_{ir}}{I_{ib}} \cdot 100\%$ | GRE_i – growth rate of the i -th indicator of the balance sheet of the enterprise; I_{ir} , I_{ib} – the numerical value of the i -th indicator of the balance sheet of the enterprise in the base and reporting years, respectively |
| 2. Analysis of the "golden rule of economics" of the enterprise | $100\% \leq GR(A) \leq GR(Eq) \leq GR(NI) \leq GR(NP)$ | $GR(A)$, $GR(Eq)$, $GR(NI)$, $GR(NP)$ – chain growth rates of assets, equity, net income from sales of products (goods, works, services), net profit of the enterprise, respectively |
| 3. Calculation and ratio analysis of liquidity, financial stability, business activity, profitability | $R_{cl} = \frac{C_{irc}A}{CL}$, $C_{fs} = \frac{Eq+LL}{A}$, $R_{fr} = \frac{CL}{Eq}$, $CB = \frac{NP + A_m}{BC}$, $T_{wc} = \frac{NP_s}{WC}$, $R_a = \frac{NP}{A} \cdot 100\%$, $R_{ca} = \frac{NP}{CircA} \cdot 100\%$, $R_{eq} = \frac{NP}{Eq} \cdot 100\%$ | R_{cl} – current liquidity ratio; $C_{irc}A$ – circulating assets; CL – current liabilities; C_{fs} – coefficient of financial stability; Eq – equity; LL – long-term liabilities; A – assets of the enterprise; R_{fr} – financial risk ratio; CB – Beaver coefficient; A_m – amortization; BC – borrowed capital; NP – net profit of the enterprise; T_{ta} – turnover of total assets; NP_s – net income from sales of products (goods, works, services); \bar{A} – average annual assets; T_{wc} – working capital turnover; \bar{WC} – average annual working capital; R_a – return on assets; R_{ca} – return on current assets; R_{eq} – return on equity |
| 4. Assessment of the stability of the financial condition of the enterprise | $R = 0,838K_1 + K_2 + 0,054K_3 + 0,63K_4$ | R – an indicator of the stability of the financial condition of the enterprise according to the discriminant R-model; K_1 – coefficient, which is determined by the ratio of $CircA$ to A of the enterprise; K_2 – coefficient determined by the ratio of NP to Eq ; K_3 – coefficient determined by the ratio of NP_s to A ; K_4 – coefficient, which is determined by the ratio of NP to IC (integrated costs) of the enterprise |

Source: formed taking into account [14, 16, 30, 35, 37, 38].

We consider it expedient to substantiate the choice of a mathematical model for assessing the stability of the financial condition of predicting the risk of bankruptcy of a small enterprise in the form of a discriminant R-model

[37]. In conditions of economic instability in Ukraine, a sufficiently high share of unprofitable domestic industrial enterprises, uncertainty and variability of the external environment, enterprises have a growing risk of losing their solvency, financial stability, which can lead to bankruptcy. Therefore, it is important to solve the problem of timely detection of negative changes in the financial condition of economic entities, including small industrial enterprises.

To solve this problem, it is proposed to choose a discriminant R-model [37], according to which you can assess the stability of the financial condition of the enterprise. It has the following advantages: availability of accounting information; selection of independent variables; choice of a set of financial indicators; simplicity of calculations; suitable for companies whose shares are not listed on the stock exchange.

It is advisable to pay attention to another of the methodological approaches to conducting a rapid financial analysis of the enterprise. In the financial sphere of activity of each industrial enterprise efficiency, convenience and saved time are considered by experts as one of the main assets. The new tool "Financial Scoring" from YouControl provides an opportunity to quickly analyze the financial performance of the company and further calculate the consolidated final score - the index FinScore (1-4) [40]. This index reflects the financial condition of the enterprise relative to others in the industry, has a probabilistic nature, indicates a relatively lower probability of bankruptcy. In the field of banking, the FinScore risk index is a convenient and fast system for assessing the solvency and integrity of a potential borrower.

Financial scoring is based on the following indicators: current liquidity; absolute liquidity; coefficient of autonomy; return on assets; return on current assets; net margin; return on total assets; turnover of total assets; working capital turnover; turnover of receivables. The scale of financial scoring is as follows: A – high level of financial stability (4 points); B – good level of financial stability (3 points); C – satisfactory level of financial stability (2 points); D – unsatisfactory level of financial stability (1 point).

It should be noted that this method is an information product, it reflects the opinion of YouControl experts on the overall level of financial risks of economic entities. The financial scoring system uses special computer programs that allow you to analyze information about each business entity [39-41]. For these reasons, the current bank of mathematical models does not contain information on the calculation of financial scoring.

The calculation of financial indicators, coefficients is provided at the fifth stage of implementation of the developed algorithm. Table 8 presents the results of the financial express analysis of this enterprise in the first (a) direction.

Table 9 presents the results of the financial express analysis of the enterprise in the second (b) direction, which allowed to analyze its "golden rule".

Table 10 presents the results of the financial express analysis of a small industrial enterprise in the third (c) direction, which allowed to conduct a ratio analysis of liquidity, financial stability, business activity, profitability of the enterprise

Table 8. The results of the analysis of the comparative analytical balance with the determination of the dynamics and the share of its main sections (on the example of the asset)

| Section name | Balance line code | At the beginning of t year | | At the end of t year | | Change of the indicator | | |
|---|-------------------|----------------------------|--------------|-------------------------|--------------|--|-----------------------------------|------------------------------------|
| | | abs. val., thousand UAH | rel. val., % | abs. val., thousand UAH | rel. val., % | in abs. val., (gr.5- gr.3), thousand UAH | in the structure, (gr.6- gr.4), % | basic growth rate, (gr.5/ gr.3), % |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Active | | | | | | | | |
| I. Non-current assets | 1095 | 78,3 | 15,2 | 289,2 | 31,9 | 210,9 | 16,7 | 369,3 |
| II. Current assets | 1195 | 437,1 | 84,8 | 617,9 | 68,1 | 180,8 | -16,7 | 141,4 |
| III. Non-current assets held for sale and disposal groups | 1200 | - | - | - | - | - | - | - |
| Balance | 1300 | 515,4 | 100,0 | 907,1 | 100,0 | 391,7 | 0,0 | 176,0 |

Source: author's development.

Table 9. The results of calculating the chain growth rate of economic indicators of the enterprise

| Indicator | The value of the indicator, thousand UAH | | Chain growth rate of the indicator (gr.3/gr.2), % |
|---|--|--------------------------------|---|
| | as of the beginning of the t-th year | as of the end of the t-th year | |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. Net income | 167,5 | 13,2 | 7,88 |
| 2. Net income from sales of products (goods, works, services) | 2769,5 | 2690,7 | 97,15 |
| 3. Equity | 210,9 | 197,7 | 93,74 |
| 4. Assets | 515,4 | 907,1 | 176,00 |

Source: author's development.

Table 10. The results of the analysis of liquidity, financial stability, business activity, profitability and probability of bankruptcy of a small industrial enterprise

| Indicator | Recommended value, positive trend | Indicator value | | Absolute change in the indicator, (gr.4-gr.3) |
|---------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|--------|---|
| | | (t-1) year | t-year | |
| 1. Current liquidity ratio | 1,0–1,5 | 0,60 | 0,56 | -0,04 |
| 2. Coefficient of financial stability | 0,7–0,9 | 0,42 | 0,22 | -0,20 |
| 3. Financial risk factor | <1 | 3,44 | 5,56 | 2,12 |
| 4. Beaver coefficient | >0,2 | 0,61 | 0,28 | -0,33 |
| 5. Turnover of total assets | growing | 0,62 | 0,39 | -0,23 |
| 6. Working capital turnover | growing | 7,62 | 5,11 | -2,51 |
| 7. Return on assets, % | growing | 32,50 | 4,60 | -27,90 |
| 8. Profitability of current assets, % | growing | 36,60 | 2,10 | -34,50 |
| 9. Return on equity, % | growing | 38,30 | 6,70 | 31,60 |
| 10. Stability by R-model | >0,42 | 1,8 | 0,8 | -1,0 |

Source: author's development.

The penultimate stage of the proposed algorithm (fig. 2) is the analysis and interpretation of the results and report generation. The following conclusions can be drawn from the results of the financial express analysis of a small industrial enterprise conducted as an example

- 1) The balance of the enterprise for the t -th year is characterized by positive dynamics of growth by 391.7 thousand UAH. due to the change of non-current assets by UAH 210.9 thousand. and current assets - by UAH 180.8 thousand. The basic growth rate of non-current assets in the amount of UAH 369.3 thousand gets 227.9% ahead of the same indicator of current assets in the amount of 141.4 thousand UAH. In general, the basic growth rate of the balance sheet of the enterprise for the studied year was 176.0%, which is a good sign.
- 2) The "golden rule of economics" for the studied small business for the whole chain of inequalities is not fulfilled, except for the latter, namely: $100\% < TK(A)$. This inequality means that the economic potential of the enterprise is growing – the scale of its activities is expanding and this is a good sign. However, the chain rate of change in net profit, net income from sales of products (goods, works, and services), and equity is characterized by a negative trend that will not strengthen the financial condition of the enterprise. Therefore, it is recommended that the company's management pay attention to improving the financial situation in the future.
- 3) The estimated values of liquidity, financial stability, business activity and profitability of the surveyed enterprise do not meet the relevant recommended values and are characterized by a negative trend over time.
- 4) Despite the decrease in the value of the Beaver coefficient over time, we can state the following. Since the estimated values of this indicator exceed 0.2, this is a positive sign of the financial stability of the enterprise in assessing the risk of bankruptcy.

References

1. Skrynkovskyy, R., Kataiev, A., Zaiats, O., Andrushchenko, H., Popova, N. (2021), "Competitiveness of the Company on the Market: Analytical Method of Assessment and the Phenomenon of the Impact of Corruption in Ukraine", *Journal of Optimization in Industrial Engineering*, No. 14 (1), P. 103–110.
2. Sinitsyna, Y. P., Kvasova, L. S., Chebanova, M. O. (2020), "Research of crisis situations during a pandemic on the example of small business organization" ["Doslidzhennia kryzovykh sytuatsii pid chas pandemii na prykladi orhanizatsii maloho biznesu"], *Market Infrastructure*, No. 43, P. 270–275.
3. "What is supervision?" ["Shcho take superviziia?"], available at : <http://barna-consult.com/Digest/Supervision> (last accessed 24.08.2021).
4. "The Ministry of Education and Science has developed regulations on supervision" ["MON rozrobylo polozhennia pro superviziiu"], available at : <https://nus.org.ua/news/mon-rozrobylo-polozhenny> (last accessed 24.08.2021).

Numerical values of the indicator of stability of the financial condition of the enterprise according to the R-model for two years exceed 0.42, which indicates the maximum level of the required indicator.

The implementation of this algorithm ends with the presentation of the report and providing the management of the enterprise with scientifically sound recommendations. The application of the proposed mathematical models of financial express analysis of small industrial enterprises, which were combined in the areas of financial supervision, allowed to calculate a certain set of financial and economic indicators on the example of a particular small enterprise. Their analysis in the dynamics provided a basis for drawing conclusions about the financial condition of a particular enterprise.

Conclusions

The study of the methodological support of financial analysis of industrial enterprises revealed that there is an urgent need to use the tools of financial supervision in the small business sector of the country. Therefore, the problem of developing appropriate scientific and methodological support for financial rapid analysis of small industrial enterprises of Ukraine has become important. The practical application of the developed scientific and methodological approach to conducting financial express analysis on the basis of financial supervision will serve as a "guideline" for the analysis of the financial condition of small businesses and will facilitate the timely adoption of scientifically sound decisions in the financial management of small industrial enterprises of Ukraine.

5. Pedchenko, N. S., Zirka, V. O. (2019), "Rating assessment of the financial condition of the enterprise: a modern view" ["Reitynhove otsiniuvannia finansovoho stanu pidpriemstva: suchasnyi pohliad"], *Scientific achievements of modern society, Abstracts of the 1st International scientific and practical conference*, Liverpool: Cognum Publishing House, P. 123–130, available at : http://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2019/09/scientific-achievements-of-modern-society_11-13.09.19-1.pdf#page=123 (last accessed 09.09.2021).
6. Berzhanir, I. A., Vynnytska, O. A., Gvozdey, N. I. (2018), "Integral assessment of the financial condition of the enterprise" ["Integralna otsinka finansovoho stanu pidpriemstva"], *Young Scientist*, No. 2 (2), P. 682–686.
7. Shamota, G. M., Malys, D. O. "Research of approaches to a complex estimation of a financial condition of the enterprise" ["Doslidzhennia pidkhdov do kompleksnoi otsinky finansovoho stanu pidpriemstva"], available at : [http://www.business-inform.net/export_pdf/bu ...](http://www.business-inform.net/export_pdf/bu...) (last accessed 09.09.2021).
8. Yatsukh, O. O., Zakharova, N. Y. (2018), "Financial condition of the enterprise and methods of its estimation" ["Finansovyi stan pidpriemstva ta metodyka yoho otsinky"], *Scientific notes of V. I. Vernadsky Tavriya National University*, Vol. 29 (68), No. 3, P. 173–180, available at : http://nbuv.gov.ua/UJRN/UZTNU_econ_2018_29_3_35 (last accessed 09.09.2021).
9. Brigham, E., Erhard, M. "Financial Management" ["Finansovyi menedzhment"], available at : <https://www.twirpx.com/file> (last accessed 29.08.2021).
10. Chepka, V. V., Sviderska, I. M., Gavrilenko, Y. O. (2020), "Financial condition of the enterprise: theoretical bases" ["Finansovyi stan pidpriemstva: teoretychni osnovy"], *Investments: practice and experience*, No. 19-20. P. 96–102.
11. Yakovenko, V. P., Shevchuk, Y. V., Pirogov, D. L., Talover, V. A. (2019), "Financial analysis of enterprise activity: modern approaches and specifics of carrying out" ["Finansovyi analiz diialnosti pidpriemstva: suchasni pidkhody ta spetsyfika provedennia"], *Strategic and innovative development of the economic system in the context of globalization: Collection of abstracts of the IV International Scientific and Practical Internet Conference (Kremenchuk, November 5-7, 2019)*, Kremenchuk : KrNU, P. 117–120.
12. Chemchikalenko, R. A., Sukrusheva, G. O., Tkachenko, A. Y. (2019), "Theoretical bases of management of a financial condition of the enterprise" ["Teoretychni osnovy upravlinnia finansovym stanom pidpriemstva"], *Money, Finance and Credit*, P. 350–354.
13. Ivakhnenko, V. M., Kirichenko, K. G. (2012), "Express analysis of the financial condition of the enterprise" ["Ekspres-analiz finansovoho stanu pidpriemstva"], *Scientific Notes*, No. 14, P. 179–186.
14. Kovalev, V. V. "Financial analysis" ["Fynansovyi analiz"], available at : http://afdanalyse.ru/load/biblioteka/finansovyy_analiz/finansovyy_analiz_i_procedury_kovalev_v_v/7-1-0-53 (last accessed 05.09.2021).
15. Kovtunen, Y. V. (2016), "Methodical bases of the analysis of a financial condition of the industrial enterprise" ["Metodychni osnovy analizu finansovoho stanu promyslovoho pidpriemstva"], *Economy. Finances. Right*, No. 8 (2), P. 40–41.
16. Otenko, I. P., Azarenko, G. F., Ivashchenko, G. A. (2015), *Financial analysis [Finansovyi analiz]*, KhNEU, Kharkiv, 156 p.
17. Tyshchenko, V. V., Tyshchenko, O. I. (2016), "Assessment of the financial condition of enterprises in the context of economic security" ["Otsinka finansovoho stanu pidpriemstv v konteksti ekonomichnoi bezpeky"], *Bulletin of ONU im. I. I. Mechnikov*, Vol. 21, No. 6 (48), P. 196–201.
18. Polozova, V. M. (2010), "Modern approaches to assessing the financial condition of the enterprise" ["Suchasni pidkhody do otsinky finansovoho stanu pidpriemstva"], *Bulletin of Khmelnytsky National University*, Vol. 2, No. 5, P. 78–83.
19. Strygul, L. S., Panchevka, K. O., Kitan, M. V. (2014), "Peculiarities of approaches to assessing the financial stability of the enterprise" ["Osoblyvosti pidkhdov shchodo otsinky finansovoi stiiikosti pidpriemstva"], *Research and optimization of economic processes: a collective monograph*, Kharkiv : NTU "KhPI", P. 26–34, available at : <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/18569> (last accessed 04.09.2021).
20. Gritsenko, T. V., Brovko, L. I. (2018), "Theoretical and practical aspects of managing the financial condition of the enterprise in modern conditions" ["Teoretychni ta praktychni aspekty upravlinnia finansovym stanom pidpriemstva v suchasnykh umovakh"], *Young Scientist*, No. 9 (2), P. 465–469.
21. Shifrina, N. I. (2011), "Express analysis of the financial condition of the enterprise" ["Ekspres-analiz finansovoho stanu pidpriemstva"], *Bulletin of Transport Economics and Industry*, No. 35, P. 191–194.
22. Shkolnik, I. O., Boyarko, I. M., Deineka, O. V. (2016), *Financial analysis [Finansovyi analiz]*, Center for Educational Literature, Kharkiv, 318 p.
23. Sokolova, L., Veriasova, G., Sokolov, O. (2011), "Enterprise competitiveness evaluation: Theory and graphic support", *Actual Problems of Economic*, No. 126 (12), P. 289–298.
24. Britchenko, I. G. (2011), "The impact of small business on the development of the region" ["Vplyv maloho biznesu na rozvytok rehionu"], *Economy and State*, No. 1, P. 14–15, available at : <http://dspace.uzhnu.edu.ua/bitstream/lib/1> (last accessed 29.08.2021).
25. Sokolova, L. V., Kolisnyk, O. V. (2014), *Strategic management of small machine-building enterprises in the conditions of unstable external environment [Stratehichne upravlinnia malymy mashynobudivnymy pidpriemstvamy v umovakh nestabilnoho zovnishnoho seredovyscha]*, Point, Kharkiv, 278 p.
26. Sokolova, L. V., Kolisnyk, O. V. (2020), "Diagnosis of financial stability of small business enterprises" ["Diahnostyka finansovoi stiiikosti pidpriemstv maloho biznesu"], *Modern strategies of economic development: science, innovation and business education: materials and international. Scientific-practical conference (Kharkiv, November 3, 2020)*, Kharkiv : KNURE, P. 311–314.
27. Official site of the State Statistics Service of Ukraine, "Economic statistics", available at : https://ukrstat.org/uk/operativ/oper_new.html (last accessed 17.03.2021).
28. Zaborovets, O. P., Shevchenko, T. E., Skrypchenko, M. O. "Small business and its impact on the development of the national economy" ["Male pidpriemnytstvo ta yoho vplyv na rozvytok natsionalnoi ekonomiky"], available at : http://www.economy.kpi.ua/files/files/5_kpi_2010_7 (last accessed 29.08.2021).
29. "Small business in the conditions of the COVID-19 pandemic" ["Malyi biznes v umovakh pandemii COVID-19"], available at : <https://unba.org.ua/publications/print/5792-malij-...> (last accessed 17.09.2021).
30. Kononenko, O., Makhanko, O. (2012), *Analysis of financial statements [Analiz finansovoi otchetnosti]*, Factor, Kharkiv, Vol. 5, 20 p.
31. "Express analysis of the financial condition of enterprises" ["Ekspres-analiz finansovoho stanu pidpriemstv"], available at : https://www.pidru4niki.com/finans/ekspres-analiz_finansovogo... (last accessed 01.03.2021).
32. Rozhelyuk, V. M., Zhuk, N. T. (2017), "Express diagnostics of financial condition in the security management system of the enterprise" ["Ekspres-diahnostyka finansovoho stanu v systemi upravlinnia bezpekoiu pidpriemstva"], *Accounting, taxation and control: theory and methodology: materials between the people. scientific-practical Internet conference (Ternopil, November 20, 2017)*, Ternopil : TNEU, Vol. 1, P. 181–184.
33. "Express analysis of financial and economic condition" ["Ekspres-analiz finansovo-ekonomichnoho stanu"], available at : <https://www.finalon.com/metodyka-rozrakhunku/90-ekspres-analiz> (last accessed 01.03.2021).
34. Ivchenko, L. V., Fedorchenko, O. E. (2015), "Analysis of the financial condition of enterprises: information and methodological support" ["Analiz finansovoho stanu pidpriemstv: informatsiine ta metodychne zabezpechennia"], *Finance, accounting and auditing*, No. 1 (25), P. 197–210.
35. Rudenko, E. M. "Application of the "golden rule of economics" for evaluation" ["Zastosuvannia «zolotoho pravyla ekonomiky» dlia otsinky"], available at : <http://www.agrosvit.info/pdf/8.pdf> (last accessed 28.04.2021)
36. Yankovets, G. M., Chernyuk, Y. V. "Comparison of modern models of diagnostics of probability of bankruptcy of the enterprise: foreign and domestic experience" ["Porivniannia suchasnykh modelei diahnozyky ymovirnosti bankrutstva pidpriemstva: zakordonnyi i vitchyzniani dosvid"], available at : www.investplan.com.ua/pdf/20_2016/14.pdf (last accessed 04.05.2021).
37. Ishchenko, N. A. "Diagnosis of bankruptcy probability and ways of its stabilization" ["Diahnostyka ymovirnosti bankrutstva ta shliakhy yoho stabilizatsii"], available at : <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/bitstream> (last accessed 06.05.2021).

38. "Diagnosis of the probability of bankruptcy of the enterprise" ["Diahnostyka ymovirnosti bankrutstva pidpriemstva"], available at : https://pidru4niki.com/economics/diagnostics_ymo... (last accessed 06.05.2021).
39. "Method of financial scoring from YouControl" ["Metodyka finansovoho skorynhu vid YouControl"], available at : <https://youcontrol.com.ua/financial-scoring/method> (last accessed 29.08.2021).
40. "How to read financial analytics YouControl" ["Yak pravylno chytaty finansovu analytku YouControl"], available at : <https://youcontrol.com.ua/blog/yak-pravilno-chitati-...> (last accessed 29.08.2021).
41. "Financial scoring: what it is and how it can help Big..." ["Finansovyi skorynh: shcho tse take ta chym mozhe dopomohty Big..."], available at : <https://hub.kyivstar.ua/News> (last accessed 29.08.2021).
42. Tyutyunnyk, Y. M., Dorogan-Pisarenko, L. O., Tyutyunnyk, S. V. (2016), *Financial analysis [Finansovyi analiz]*, PDAA, Poltava, 430 p.
43. Sokolova, L. V., Veryasova, G. M., Sokolov, O. E. (2019), "Comparative analysis of application of crisis assessment models of industrial enterprises" ["Porivnialnyi analiz zastosuvannya modelei otsinky kryzovoho stanu promyslovykh pidpriemstv"], *Eastern Europe: Economics, Business and Management*, No. 3 (20), P. 357–364, available at : http://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/20_2019/55.pdf.
44. Sabadash, V. V., Kovalenko, E. V. (2012), "Diagnosis of the crisis and the threat of bankruptcy of an industrial enterprise: comparative assessments" ["Diahnostyka kryzovoho stanu ta zahrozy bankrutstva promysloвого pidpriemstva: porivnialni otsinky"], *Mechanism of economic regulation*, No. 2, P. 126–132.
45. Sokolova, L. V., Porokhnenko, O. A. (2015), "Problems of choice of models of probability of bankruptcy of the enterprises" ["Problemy vyboru modelei otsinky ymovirnosti bankrutstva pidpriemstv"], *Global and national economic problems. Scientific journal of V. O. Sukhomlinsky Nikolaev National University*, No. 7, P. 910–915.

Received 23.07.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Соколова Людмила Василівна – доктор економічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою, Харків, Україна; email: liudmyla.sokolova@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8106-1523>.

Соколова Людмила Васильевна – доктор экономических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры экономической кибернетики и управления экономической безопасностью, Харьков, Украина.

Sokolova Liudmyla – Doctor of Sciences (Economics), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Economic Cybernetics and Management of Economic Security, Kharkiv, Ukraine.

Дюжев Віктор Геннадійович – доктор економічних наук, професор, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", професор кафедри менеджменту інноваційного підприємництва та міжнародних економічних відносин, Харків, Україна; email: Viktor.Dyuzhev@khpri.edu.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9929-2431>.

Дюжев Виктор Геннадьевич – доктор экономических наук, профессор, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", профессор кафедры менеджмента инновационного предпринимательства и международных отношений, Харьков, Украина.

Dyuzhev Viktor – Doctor of Sciences (Economics), Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor of the Department of Innovative Entrepreneurship Management and International Economic Relations, Kharkiv, Ukraine.

Верясова Ганна Миколаївна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою, Харків, Україна; email: ganna.veriasova@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5287-9833>.

Верясова Анна Николаевна – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры экономической кибернетики и управления экономической безопасностью, Харьков, Украина.

Veriasova Ganna - Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of the Department of Economic Cybernetics and Management of Economic Security, Kharkiv, Ukraine.

Курденко Олександр Васильович – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою, Харків, Україна; email: oleksandr.kurdenko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2127-230X>.

Курденко Александр Васильевич – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры экономической кибернетики и управления экономической безопасностью, Харьков, Украина.

Kurdenko Oleksandr – Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of the Department of Economic Cybernetics and Management of Economic Security, Kharkiv, Ukraine.

Аль-Фахор Ескндер Суліаман Салти – Харківський національний університет радіоелектроніки, аспірант кафедри економічної кібернетики та управління економічною безпекою, Харків, Україна; email: esknder.suliaman.salty.al-fakhor@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5344-0072>.

Аль-Фахори Искандер Сулейман Салти – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры экономической кибернетики и управления экономической безопасностью, Харьков, Украина.

Al-Fakhore Esknder Suliaman Salty – Kharkiv National University of Radio Electronics, PhD Student of the Department of Economic Cybernetics and Management of Economic Security, Kharkiv, Ukraine.

НАУКОВО-МЕТОДИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФІНАНСОВОГО ЕКСПРЕС-АНАЛІЗУ МАЛИХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ УКРАЇНИ

Предметом дослідження даної роботи є сучасний напрямок у фінансовій діяльності малих промислових підприємств – проведення фінансового експрес-аналізу. **Метою** дослідження є розробка науково-методичного підґрунтя для проведення за спрощеною процедурою фінансової супервїзії діяльності малих промислових підприємств країни з метою надання кваліфікованої допомоги керівникам малих промислових підприємств у фінансовій сфері їх діяльності. В статті вирішуються наступні **завдання**: дослідження стану малих промислових підприємств та їх ролі в розвитку економіки України, визначення

дефініції поняття «фінансова супервізія», розробка алгоритму фінансового експрес-аналізу малого промислового підприємства, вибір напрямків проведення фінансового експрес-аналізу малих підприємств промисловості на засадах фінансової супервізії, формування банку вхідних даних за чотирма складовими, апробація науково-методичного забезпечення на прикладі конкретного підприємства. Використовуються такі **методи**: теоретичне узагальнення, ретроспективний аналіз, порівняльний аналіз, аналітичний, аналіз та синтез, експрес-аналіз. Отримано наступні **результати**: в роботі запропоновано на засадах фінансової супервізії методичні рекомендації щодо проведення фінансового експрес-аналізу малого промислового підприємства; обрано напрямки проведення фінансового аналізу за спрощеною процедурою; розроблено схему алгоритму реалізації фінансової супервізії; сформовано банк вхідних даних, які необхідні для вирішення поставленого завдання; проведено обґрунтування вибору прикладних математичних моделей; проведено експериментальну апробацію запропонованого науково-методичного підходу до проведення фінансового експрес-аналізу на фактологічній базі реального малого промислового підприємства; надано відповідні рекомендації керівництву досліджуваного підприємства. **Висновки**: Досліджено фінансові результати функціонування суб'єктів господарювання у сфері малого бізнесу. Визначено, що у теперішній час малі промислові підприємства України потребують професійної допомоги консультативної спрямованості у фінансовій сфері своєї діяльності. Було розроблено науково-методичне підґрунтя для фінансової супервізії з використанням методу експрес-аналізу, складено та описано етапи схеми алгоритму проведення фінансового експрес-аналізу за спрощеною процедурою. Проведено апробацію реалізації алгоритму на фактологічній базі конкретного малого промислового підприємства, зроблено конкретні рекомендації.

Ключові слова: мале підприємство; ретроспективний аналіз; фінансова супервізія; методичне забезпечення; схема алгоритму; банк даних; математична модель; експрес-аналіз; результати.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФИНАНСОВОГО ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА МАЛЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ УКРАИНЫ

Предметом исследования данной работы является современное направление в финансовой деятельности малых промышленных предприятий - проведение финансового экспресс-анализа. **Целью** исследования является разработка научно-методического основания для проведения по упрощенной процедуре финансовой супервизии деятельности малых промышленных предприятий страны с целью оказания квалифицированной помощи руководителям малых промышленных предприятий в финансовой сфере их деятельности. В статье решаются следующие **задачи**: исследование состояния малых промышленных предприятий и их роль в развитии экономики Украины, определение дефиниции понятия «финансовая супервизия», разработка алгоритма проведения финансового экспресс-анализа малого промышленного предприятия, выбор направлений проведения финансового экспресс-анализа малых предприятий промышленности на основе финансовой супервизии, формирование банка входных данных по четырем составляющим, апробация научно-методического обеспечения на примере конкретного предприятия. Используются следующие **методы**: теоретическое обобщение, ретроспективный анализ, сравнительный анализ, аналитический анализ и синтез, экспресс-анализ. Получены следующие **результаты**: в работе предложено на основе финансовой супервизии методичку проведения финансового экспресс-анализа малого промышленного предприятия; избран направления проведения финансового анализа по упрощенной процедуре; разработана схема алгоритма проведения процедуры финансового супервизии; сформирован банк входных данных, которые необходимы для решения поставленной задачи; проведено обоснование выбора прикладных математических моделей; проведена экспериментальная апробация предложенного научно-методического подхода к проведению финансового экспресс-анализа на фактологической базе реального малого промышленного предприятия; даны соответствующие рекомендации руководству исследуемого предприятия. **Выводы**: Установлено, что в современных нестабильных условиях хозяйствования малые промышленные предприятия нуждаются в профессиональной помощи консультационной направленности в финансовой деятельности. Получение актуальной релевантной информации о финансовом состоянии малых промышленных предприятий является очень актуальной задачей, требующей проведения финансового экспресс-анализа их деятельности. Изучение данного вопроса показало отсутствие единого мнения аналитиков относительно направлений и методов проведения финансового экспресс-анализа. Это обусловило необходимость и целесообразность разработки для руководства малых промышленных предприятий по упрощенной процедуре упорядоченной методички финансового экспресс-анализа на основе финансовой супервизии.

Ключевые слова: малое предприятие; ретроспективный анализ; финансовая супервизия; методическое обеспечение; схема алгоритма; банк данных; математическая модель; экспресс-анализ; результаты.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Соколова Л. В., Дюжев В. Г., Верясова Г. М., Курденко О. В., Аль-Фахор Ескндер Суліаман Салти. Науково-методичне забезпечення фінансового експрес-аналізу малих промислових підприємств України. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.078>

Sokolova, L., Dyuzhev, V., Veriasova, G., Kurdenko, O., Al-Fakhore Esknder Suliaman Salty (2021), "Scientific and methodological support of financial express analysis of small industrial enterprises of Ukraine", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 78–90. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.078>

S. LUTSKYY

SYSTEM-INFORMATION APPROACH TO UNCERTAINTY OF PROCESS AND SYSTEM PARAMETERS

The **subject** matter of research in the article is a system-information approach to the uncertainty of the parameters of processes and systems of the technosphere as one of the scientific directions of using information theory in metrology and other scientific areas. The system-information approach is based on the definition of the term "information" of the properties of the system, its content and meaning. The solution of the basic problem in metrology, obtaining "information" of the quantitative characteristics of the true value of the properties of objects and phenomena that reveal the regularities of the environment, is a complex scientific problem. The instrument for obtaining information about the properties of the system is the measurement process. One of the directions in the development of measurement theory is the concept of uncertainty. The **goal** of the work is to research of non-traditional solutions to problems of technical-cybernetic systems based on the system-information approach to the uncertainty of the parameters of processes and systems. The article solves the following **tasks**: to analyze the assessment of the parameters of technological processes and systems based on the system-information approach; to develop system-information methods and algorithms for the effective use of discrete-probabilistic information in technical-cybernetic systems; to develop principles and approaches for using the system-information assessment of the uncertainty of the Planck units, use of system-information modeling in various scientific directions. The following **methods** are used: system-information approach to processes and systems, methodology of system-information modeling of the measured value; system information methodology for the assessment of the measured quantity and uncertainty. The following **results** were obtained: developed a system-information methodology for assessing the nominal parameter has been developed, which provides indirect control over the independent parameters associated with it; systemic and information methods for the effective use of discrete-probabilistic information in technical and cybernetic systems have been developed; a system-information methodology for calculating the energy equivalent of product performance indicators has been developed; the principle of calculating the efficiency of manufacturing a product based on the energy equivalent of Planck units is formulated. **Conclusions**: The solution of the set tasks on the basis of the system-information approach to the uncertainty of the parameters of processes and systems makes it possible, from the system-information point of view, to study the regularities of the stages of the life cycle of technical-cybernetic systems and conservation laws.

Keywords: system-information approach; discrete probabilistic information; uncertainty; Planck units.

Introduction

Mankind for a long time has paid attention to the definition of the term "information". But until the beginning of the 20th century, this question belonged to the philosophical category. The key question regarding the information was how to quantify it. Such scientists as R. Hartley, R. Fischer, W. Ashby, N. Wiener, K. Shannon, A.N. Kolmogorov and others dealt with this issue. As a result of research in the field of information, information theories have been developed, which are based on different scientific approaches: probabilistic (K. Shannon), synergetic (V.B. Vyatkin), quantum (A.S. Kholeva), system-information (S.V. Lutskiy) and others.

System-information (SI) approach to the processes and systems of the technosphere is one of the scientific directions in the field of information theory. Technosphere is an object of planetary ecology [1], part of the ecosphere, which contains artificial technical structures that are manufactured and used by man. Theoretical principles of SI approach to processes and systems are based on the scientific principle of "reflection" of the properties of interacting objects of any nature from the threshold of sensitivity of these objects to external influences and are identified as values of physical quantities (PQ), their location in space and time. "Reflection" is a fundamental property of the universe, which underlies the evolution of the universe. From a mathematical point of view, this is a "transformation", ie a function.

The SI approach is based on the definition of the term "information", its meaning and significance in the

system. The methodology of the SI approach is designed for information research of systems such as physical, biological, social, technical, cybernetic and use in engineering and scientific disciplines such as general systems theory, systems science, cybernetics, systems engineering, thermodynamics, systems dynamics, metrology and so on..

An important scientific and economic direction in the field of research from the standpoint of the SI approach is technical and cybernetic systems. With the development of mankind, technical and cybernetic systems are becoming increasingly complex, both in terms of mechanics and control. With the complexity of technical and cybernetic systems, the requirements for the safety of their manufacture, operation and disposal increase.

The basic difficulty of knowing the properties of systems is manifested in obtaining information on the quantitative characteristics of the true values of the properties of objects and phenomena that reveal the laws of the environment. The tool for obtaining information in the system is the measurement process. One of the directions of development of the theory of measurements is the concept of uncertainty. The concept of uncertainty is based on an "observer" who cannot obtain information about the true value of a measured quantity, but can only determine the range of values in which there is a true value of the quantity. The properties of the technical-cybernetic system, as a complex of interacting components, are in information equilibrium and have a stationary character with constant over time indicators of the distribution of probabilistic characteristics. The

scattering interval of the parameters that characterize the properties of the technical-cybernetic system is the uncertainty interval.

Control of information of the limits of the expanded uncertainty of parameters is extremely important for safety of operation of technical and cybernetic systems and environment. This information is necessary for the timely response of the management system to crisis situations - that is, to the unforeseen exit of the limits of the interval of extended uncertainty beyond the tolerance of the parameters of processes and systems and their prevention.

The parameters of technical-cybernetic systems are to some extent related by the relationship based on the information they possess, and their accuracy (uncertainty) tolerances are also related. This makes it possible, based on the information of the controlled parameter and its uncertainty, to control the algorithm of other parameters and uncertainties associated with it, as well as to predict their future state. SI approach, as a tool for analysis and synthesis of systems lays the information relations of objects at the initial stages of the product life cycle, which allows to solve problems in the development, manufacture, operation and disposal of technical cybernetic systems on the same system-information basis, and combines mechanical and cybernetic components of the system with one unit of measurement of parameters, which greatly simplifies and reduces the cost of digitization at the stages of the product life cycle.

Therefore, it is important to study non-traditional solutions to technical and cybernetic systems based on the SI approach to the uncertainty of the parameters of processes and systems that have emerged in new non-traditional fields of science and technology.

Analysis of literature data, problem statement

SI approach to processes and systems reveals the system and information characteristics of objects, which reflect the regular relationship between them [2]. The result of this relationship is the reflection of information. Information relations in the universe are absolute and comprehensive, both directly and indirectly. The category of time and space characterizes the intensity of information. Information in the system-information approach to processes and systems reveals not only quantitative characteristics, but qualitative and value [3].

Information is a fundamental quantity; it cannot be expressed through other basic quantities. Information contains the content of the system about itself and is an intrinsic property. Mathematically, information is defined as a measure of the order of a set consisting of different objects. A measure of information associated with a system that can accept N possible states and is measured in bits. The equation of information is valid if the different states are equally probable [4]. If the different states are not exactly probabilistic, then the probability is considered as a weighted average. The first fairly clear proposals for ways to measure the amount of information date back to the early 20th century and belong to R. Fisher (in connection with the work on mathematical statistics) and

R. Hartley (in connection with the storage of information in storage devices) and its transmission through communication channels) [5]. The most common use in various fields of science and technology was the measure of information, which is formulated in the information theory of K. Shannon [6]. The theory is closely related to information entropy and uses mainly the mathematical apparatus of probability theory and mathematical statistics. From the standpoint of defining the concept of information in the system according to K. Shannon – "the system takes many equally probabilistic states".

The SI approach considers information as the ordering of many stationary states of a system. A priori information of the steady state of the system is characterized by many possible manifestations of the properties that are realized in its interaction with other systems (objects). Manifested properties of the steady state of the system are identified as a set of physical quantities of their values and uncertainties, which is the content of system information. Under external (internal) influence, the state of the system changes and a posteriori information captures the steady state of the system over time and the corresponding values of physical quantities and uncertainties. In physical space, the state of the system changes from the threshold of sensitivity to external (internal) influence. The influencing system also changes due to the fundamental properties of the universe of symmetrical "reflection". Traditional information analysis considers the transfer of information from the "transmitter" to the "receiver" is one direction from which side to look.

In technical-cybernetic systems, information has a parameter. A technical parameter is a physical quantity that characterizes any property of a technical device, system, phenomenon, or process. The number that characterizes this parameter (value) is its value. Nominal parameter (nominal value of the parameter) is its value, which is the beginning of the countdown of the actual and maximum tolerances. The parameter is characterized by the accuracy tolerance, which is laid down in the technical documentation for the object. Within the tolerance limits, the "information" of the parameter is not a change, its state is stationary. From the standpoint of the SI approach to defining the concept of the amount of information, the parameter has a finite value of possible stationary states and the number of these states is calculated as the logarithm of the ratio of the parameter value to its accuracy. In technical and cybernetic systems, "information" is laid down in the design and technological documentation. As a rule, in the finished product the amount of "information" is greater than the value of the coefficient of technological margin of accuracy $k_{ma} = 1,2-1,5$. Therefore, the quality of "information" received by the product during manufacture is relative, it characterizes the ratio of the amount of "information" embedded in the parameters of the product according to the technical documentation to the amount of inflated "information" parameters of the finished product: $I^{qual} = I^{td}/I^{fp} \cdot I^{td}$. The value of the "information" of the product is the result of the ratio of the number of parameters in the product according to the technical

documentation to the amount of "information" according to the technical documentation: $I^{val} = N^{td}/I^{td}$. The less information is spent on the parameter of the technical documentation without changing the functional characteristics of the product, the more valuable the product information.

In production, the tolerance of the accuracy of the parameter of the technical object is obtained due to the technological process of processing. The tolerance of the accuracy of the parameter is laid down and corresponds to the statistical principle of three standard deviations. The change of the content of the parameter information occurs when the parameter goes beyond the tolerance limit of the parameter accuracy.

Thus, the system-information approach allows to determine the amount of parameter information and record its change. From the standpoint of defining the concept of "information" of the object in the SI approach as "discrete-probability" (DP) information, the parameter takes many possible stationary states with respect to accuracy, and this ratio is a deterministic value for stationary stochastic systems.

The theoretical principles of the SI approach to the processes and systems of the technosphere are based on the fundamental properties of space – "reflection" [7]:

1) any elementary deviation from the nominal properties of objects in space and time entails many results of elementary "reflections" on other categorical attributes (general information connection of categorical attributes of properties of objects in space and time);

2) the elements of deviations of the "system of reflections" of the properties of objects are discrete in nature, they are the lowest thresholds of sensitivity to each other;

3) the discreteness of elementary deviations of space is due to the quantum nature of physical space;

4) the determinism of elementary deviations is due to the stationary in the period of discrete space of "mapping systems" of categorical attributes of the technosphere.

According to the theoretical principles of the SI approach, the mathematical model of a process or system parameter can be represented at two levels: the first as an element x (threshold of sensitivity) of the set of possible state X , which has a stochastic nature, and the second as a deterministic value of the ratio X/x the final value of the number of possible states of the system.

Thus, the content of such a model for measuring the parameter of a process or system is a set (unity) of the content of stochastic and deterministic parts, which determine the numerical value of possible states of a process or system relative to their sensitivity threshold and probability of transition from one state to another. The stochastic part of such a model carries information on the sensitivity threshold of the measuring parameter of the process or system, and the deterministic part carries the numerical value of the possible states of these parameters.

The theoretical component of the SI approach is based on the axiom and four laws of system-information communication of interacting objects and the methodology of SI modeling of processes and systems [7].

(Axiom). The change in the state of an object occurs as a result of external (internal) influence starting from the threshold of sensitivity of the state of the object to this influence.

1. Law No. 1 of identical DP reflection of information of properties of objects

$$I(x_i) = I(y_j).$$

2. Law No. 2 matching DP information properties of the reflection process

$$\log_2 \frac{\mu_A}{\sigma_A} = \log_2 \frac{\mu_B}{\sigma_B}, \quad \log_2 \frac{x_i}{\Delta x_i} = \log_2 \frac{y_j}{\Delta y_j},$$

where $\frac{\sigma_A}{\sigma_B}, \frac{\Delta x}{\Delta y}$ is a coefficient of information communication.

3. Law No. 3 additivity of DP information parameter properties

$$I_{y_j} = \sum_{i=1}^t I_{x_i}, \quad i = (1, t), \quad j = (1, k), \quad M_{y_j} = \sigma_{y_j} \cdot n^{i=1}^t.$$

4. Law №4 system properties of stationary DP information space

$$\sum_{i=1}^n I_{out}(s_i) = \sum_{j=1}^n I_{in}(s_j), \quad \sum_{ij=1}^n I(S_{ij}) = const,$$

where $S_{ij} \in s_{ij}$ are the interacting elements of a stationary system S_{ij} .

The theoretical foundations of the SI methodology for modeling the parameters of processes and systems of the technosphere are based on the "display" of DP parameter information (intensity), space (length) and time (duration). SI modeling considers fragments of reality of manifestation of objects of system which are combined in various configurations: intensity - duration; intensity - length; intensity - duration and length, within the homogeneity and variability of intensity, duration and length [7].

The discreteness of the state of properties is defined as the ratio of the values of the interval max (sup) and min (inf) of the manifestation of the intensity of the object, duration, length to the value of their lower limits of manifestation – the sensitivity threshold. SI models are structured without reference to the measurement scale. The logarithmic form of the SI model function with base $n = 2$ indicates the logarithmic law of information relations between objects, and the number of characters (complexity) required to record word information in the memory of a computing electronic device.

The threshold of "sensitivity" of the manifestation of the property by its nature has two boundaries of the interval lower and upper, within which the object information is not variable. For a stationary system, and technical-cybernetic systems are such within the parameter tolerance, the sensitivity threshold coincides with the accuracy tolerance limits, and the extended parameter uncertainty is within the tolerance range. From

the position of the SI approach, the technical-cybernetic system changes its state, ie information about itself when the value of the parameter exceeds the tolerance limits for accuracy.

For the first time the concept of uncertainty, as one of the directions of development of measurement, was proposed in the work of L. Finkelstein "Theory and Philosophy of Measurement" [8]. The reasons for the concept of uncertainty were the emergence of new non-traditional areas of measurement - analytical chemistry, psychology, sociology, pedagogy, medicine and more. The theory of uncertainty developed by scientists of the world led to the appearance of the document of the International Organization for Standardization ISO "Guide to Expression of Uncertainty in Measurement", published in 1993.

The uncertainty of the measurement result is characterized by either the average quadratic deviation (AQD) or symmetric boundaries, and the distribution of the uncertainty components by the evaluation method is divided into components of categories A and B [9]. The ISO governing document presents the definition of uncertainty – a parameter combined with the result of the measurement, characterizing the scattering of values of the measuring value.

Thus the DP information of a parameter is closely related to its value and uncertainty and is simultaneously both a deterministic and probabilistic characteristic of a physical quantity. In order to emphasize the difference between the units of measurement of DP information with the generally accepted notion of "information" (which is measured in bits), DP information is measured in discrete probability bits (DPbit).

The purpose of the work is to study non-traditional solutions to problems of technical-cybernetic systems on the basis of a system-information approach to the uncertainty of process parameters and systems of the technosphere.

Materials and methods of research

Estimation of parameters of technological processes and systems on the basis of system-information approach.

The values of the parameters are obtained directly from the results of physical measurements, data and / or other parameters and the form is mathematical formulas, so the information of the uncertainties of the arguments of the components of the formula are displayed on the information of the uncertainty of the function. At direct one-time measurements values of parameter are defined on indications of the device. The estimation of the value of the measured value is directly the display of the device, such estimation of uncertainty belongs to category B. At repeated measurements and statistical data processing the estimation of variance u^2 is characterized by the components received by estimation of type A. Data processing consists in the analysis of components of an error. In many cases, the measured value of Y is not measured directly, but determined from N other values of x_1, x_2, x_N by the functional dependence of $f(x)$.

SI methodology for estimating parameters is to estimate the value and uncertainty of the measured value of one "information object" based on the values and uncertainties of other "information objects" by implementing information laws, principles and algorithms performed on the SI measurement model.

The technological process is a cyclic stationary stochastic process in which the characteristics of the probability distribution with time shift do not change with each cycle.

The extended uncertainty interval is a random variable, but the process developed on the basis of experimental data is provided by parameter tolerances where the expanded uncertainty U of the measured quantity is within the accuracy tolerance range with a probability close to $TI \geq U$ regardless of the probability distribution law.

The tolerance values for the accuracy of the process and product parameters are normalized in the early stages of the product life cycle (LCP). They are functionally interconnected both in the production process and in the process of product operation.

The concept of SI methodology for estimating the parameters of the technological process is based on functional dependencies (1)

$$LM \rightarrow f_k(N_{pr}, TI_{pr}, N_{TE}, TI_{TE}, N_{TP}, TI_{TP}, mN_j, TI_j), \text{ at } TI \geq U, \quad (1)$$

where, LM – logarithmic measure of communication capacity of parameter, TI_{pr} (tolerance of accuracy of parameters of product), TI_{TE} (tolerance of accuracy of parameters of technological equipment), TI_{TP} (tolerance of accuracy of parameters of technological process), N_{pr} – parameters of product, N_{TE} – parameters of technological equipment, N_{TP} – process parameters, mN_j – other environmental parameters, TI – parameter accuracy tolerance, U – extended parameter uncertainty.

Functional dependences (1) form new principles for the development of a methodology for estimating the parameters of the technological process, the effective use of measurement information based on the development of the concept of the measure of communication capacity PQ.

Communication Capability (CC) of PQ is the potential ability of the properties of some objects to "reflect" on other objects discretely. It is a scalar quantity and is the only measure of the various forms of

communication of objects and is defined as $\frac{x_i}{\Delta x_i}$. The

logarithmic unit measure of communication capacity is defined as $\log_2 \frac{1}{\Delta x_i}$. The logarithmic measure (LM) of

communication capacity (amount of DP information) is defined as $\log_2 \frac{x_i}{\Delta x_i}$, where x_i is the value of PQ, Δx_i is

the sensitivity threshold. The measure of communication capacity is considered as a measure according to Lebesgue-Stieltjes [10].

Based on the Law №1 of the identical reflection DP of the property information and the Law №2 of the matching of the DP property information of the SI process, the model of the measuring parameter ("information" object y is a function of unrelated x) has the form

$$I(y) = \sum \log_2 \left(x_i \times \frac{1}{U(x_i)} \right), \quad U(x_i) \leq TI(x_i) = \Delta x_i, \quad (2)$$

if x is interconnected then the information model has the form

$$I(y) = \sum_{i=1}^n \log_2 \left(x_i \times \frac{1}{U(x_i)} \right) + \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{1}{(U(x_i) - U(x_{i+1}))^2},$$

$$U(x_i) \leq TI(x_i) = \Delta x_i,$$

the parameter, Δx is the sensitivity threshold, $TI(x)$ is the accuracy tolerance, $1/U(x)$ is the unit measure of the communication capability of the parameter, $U(x)$ is the expanded uncertainty, and (y) is the amount of DP information measuring parameter.

The SI approach allows you to establish quantitative relationships between the evaluation of the measurement result and the uncertainty of the parameter. Provided that the extended uncertainty is equal to or less than the accuracy tolerance of the parameter $U(x_i) \leq TI(x_i)$, equation (2) has the form

$$\begin{aligned} \log_2 \frac{y}{\Delta y(U_y)} &= \log_2 \frac{x_1}{U(x_1)} + \log_2 \frac{x_2}{U(x_2)} \dots + \log_2 \frac{x_n}{U(x_n)}, \\ \log_2 \frac{y}{\Delta y(TI_y)} &= \log_2 \frac{x_1}{TI(x_1)} + \log_2 \frac{x_2}{TI(x_2)} \dots + \log_2 \frac{x_n}{TI(x_n)}, \quad TI(x_n) \geq U(x_n), \quad p=1, \\ \frac{y}{\Delta y(TI_y)} &= \prod_{i=1}^n \frac{x_i}{TI(x_i)}, \quad y = \Delta y(TI_y) \times \prod_{i=1}^n \frac{x_i}{TI(x_i)}, \quad \Delta y(TI_y) = \frac{y}{\prod_{i=1}^n \frac{x_i}{TI(x_i)}}, \\ TI_y &= k_y \times \Delta y(TI_y), \quad k_y = \frac{\sum_{i=1}^n TI(x_i)}{\prod_{i=1}^n TI(x_i)}, \quad TI_y \geq U_y, \quad u_c = \frac{U_y}{K}. \end{aligned} \quad (3)$$

where: u_c – total uncertainty, K – coverage factor.

The presented system-information algorithm for estimating the value of the parameter and the total uncertainty takes into account both the values of the standard uncertainties of the components of the formula and the values of the partial derivatives of these components.

We formulate the SI rule for estimating extended uncertainty: extended uncertainty of a measured quantity takes into account both the sum of values of extended uncertainties of functionally independent quantities, which does not contradict the generally accepted provisions [11], and the influence of components x_1, x_2, x_n on change y .

System-information methodology for estimating parameters is based on the use of three consecutive analytical methods.

Method 1. Methodology of SI modeling of measuring parameter of processes and systems.

It consists in the fact that the tolerances of the accuracy of the parameters of the technological system are interconnected both physically and on the basis of DP

information. That is, in the manufacture of products, the output of one parameter of the technological system beyond the tolerance of accuracy ultimately leads to the tolerance of the parameters of the part associated with it directly or indirectly. In the operation of a technical-cybernetic system, the departure of one parameter beyond the tolerance ultimately leads to the tolerance beyond the tolerance of other parameters directly or indirectly related to it.

The SI model of the parameter is based on the number of possible states of the parameter (a measure of communication capacity) as a system (in the information equation). This is the principle of equality of the sum of DP information of arguments and functions and is formalized as the logarithm of the ratio of the nominal value of the parameter to the uncertainty. For statistical DP, the PQ information is the logarithm of the ratio of the mathematical expectation to the standard deviation. The relative uncertainty is equal to the modulus of the inverse of the measure of communication capacity

$$\begin{aligned} \log_2 \frac{y}{\Delta y(U_y)} &= \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{x_i}{U(x_i)}, \quad \delta(x_i) = \left| \frac{U(x_i)}{x_i} \right|, \quad \delta(y) = \left| \frac{\Delta y(U_y)}{y} \right|, \\ \log_2 \frac{1}{\delta(y)} &= \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{1}{\delta(x_i)}, \quad \delta(y) = \prod_{i=1}^n \delta(x_i), \quad U_y = k_y \times y \times \prod_{i=1}^n \delta(x_i). \end{aligned} \quad (4)$$

This method uses the paradigm of relative errors because we study a technological system with constant values of tolerances on the accuracy provided by the technological process, and the uncertainty is within the tolerance of the accuracy of the nominal parameter.

$$\delta(a+b) = \frac{\delta a + \delta b}{|a+b|} = \frac{|a|}{|a+b|} \delta a + \frac{|b|}{|a+b|} \delta b, \quad \delta(a-b) = \frac{\delta a + \delta b}{|a-b|} = \frac{|a|}{|a-b|} \delta a + \frac{|b|}{|a-b|} \delta b, \quad (5)$$

$$\delta(a \times b) = \delta \frac{a}{b} = \delta a + \delta b, \quad \delta(a^k) = k \delta a.$$

Method 3. SI method for estimating the required and sufficient parameter accuracy.

The calculation method combines the use of two principles:

1) information modeling and 2) the method of estimating absolute and relative errors.

$$\log_2 \frac{y}{\Delta y(TI_y)} = \log_2 \frac{x_1}{TI(x_1)} + \log_2 \frac{x_2}{TI(x_2)} + \dots + \log_2 \frac{x_n}{TI(x_n)},$$

$$\log_2 \frac{1}{\delta(y)} = \log_2 \frac{1}{\delta(x_1)} + \log_2 \frac{1}{\delta(x_2)} + \dots + \log_2 \frac{1}{\delta(x_n)}, \quad \delta(x_i) = \frac{TI(x_i)}{x}, \quad \delta(y) = \frac{\Delta y(TI_y)}{y},$$

$$\frac{\Delta y(TI_y)}{y} = \prod_{i=1}^n \delta(x_i), \quad TI_y = y \times \prod_{i=1}^n \delta(x_i) \times k_y, \quad k_y = \frac{\sum_{i=1}^n \delta(x_i)}{\prod_{i=1}^n \delta(x_i)}. \quad (6)$$

Thus, in the generalized variant for $TI(y) \geq U(y)$ (6) there is an estimate of the necessary and sufficient accuracy of the parameter y due to the relative errors of the components within which there are relative extended uncertainties $U(x)$ regardless of the distribution law.

Equation (6) is an estimate of the extended uncertainty of the quantities due to the relative error for the known values of the uncertainties of the related quantities based on the DP information. If the values of the uncertainties of the related quantities are unknown, multiple measurements of the i -th parameter are used after each j -th cycle of the technological operation. To determine the i -th unknowns of the expanded uncertainty of the parameters, a matrix with the i -th rank is constructed. A relative scale is used to evaluate the result of the calculation of the unknown matrix. The choice of accuracy of the measuring instrument is provided by 10% of the interval of the calculated accuracy of the parameter.

Based on the equations of the SI approach, the following values are determined:

1) SI estimate of the value of the nominal parameter y_n without error;

$$\log_2 y_n = \log_2 x_1 + \log_2 x_2 + \dots + \log_2 x_n$$

$$y_n = 2^{\sum_{i=1}^n I(x_i)}, \quad (7)$$

2) SI estimate of the tolerance of $TI(y_n)$ at the given DP information x_i and the value of the nominal parameter y_n

Method 2. Methods for estimating relative errors.

If the relative error has a mathematical expression, then the principle based on the mathematical provisions of the relative error is used

If the interval of extended uncertainty $U(y)$ with the confidence level $p(y) = 1$ and is equal to the accuracy tolerance $TI(y)$, then we write SI equation (2) due to the relative error $\delta(y)$

$$\log_2 \frac{y_n}{\Delta y_n(TI_y)} = \log_2 \frac{x_1}{TI(x_1)} + \log_2 \frac{x_2}{TI(x_2)} + \dots + \log_2 \frac{x_n}{TI(x_n)}$$

$$\Delta y_n(TI_y) = \frac{y_n}{\sum_{i=1}^n I(x_i)}, \quad TI_y = \Delta y_n \times k_y, \quad k_y = \frac{\sum_{i=1}^n TI(x_n)}{\prod_{i=1}^n TI(x_n)} \quad (8)$$

3) SI estimate of the parameter Δy_n at the given tolerance of accuracy of $TI(y_n)$ and DP information x_i ;

$$\log_2 \frac{y_n}{\Delta y_n} = \log_2 \frac{x_1}{TI(x_1)} + \log_2 \frac{x_2}{TI(x_2)} + \dots + \log_2 \frac{x_n}{TI(x_n)},$$

$$I(x_i) = \log_2 \frac{x_i}{TI(x_i)}, \quad \frac{y_n}{\Delta y_n} = 2^{\sum_{i=1}^n I(x_i)}, \quad \Delta y_n = TI_y \times \frac{\prod_{i=1}^n TI(x_n)}{\sum_{i=1}^n TI(x_n)} \times y \quad (9)$$

Implementation of SI methodology for estimating the accuracy of measured values is based on the principles of DP information communication of process parameters and solves the following problems:

1) determines the accuracy with which it is necessary to measure the nominal parameter of the technological process to ensure maximum informativeness and quality of the result;

2) the analysis of the DP value of the information of the measurement result of the parameter, which provides indirect control of the associated parameters of the technological process for compliance with the uncertainty within the tolerances.

The use of the methodology of system-information approach to assessing the accuracy of measuring the parameters of the technological process and system ensures production efficiency, economical use of resources, identification and implementation of best practices, new equipment and production technology, prevention of unnecessary costs.

System-information methods and algorithms for effective use of discrete-probabilistic information in production.

System-information methods and algorithms for effective use of DP information are based on the scientific basis of the developed system-information approach as information technology, which from the standpoint of information principles provides accurate and timely, cost-effective assessment of controlled parameters and their required accuracy.

System-information approach as information technology is based on the developed scientific SI bases: method, method, means and process:

1) *method* – the theory of system-information approach to processes and systems;

2) *means* of application of the method - methodology of system-information modeling of processes and systems;

3) *means* of implementation of the method and method - information technology algorithms based on the logarithmic measure of the communication capacity of the controlled parameters;

4) the *processes* of collection, processing and use of discrete-probabilistic information of controlled parameters at the stages of the product life cycle.

The developed SI technology of effective use of discrete-probabilistic information of parameters formulates scientific positions of dependence between DP information of model of the controlled parameters of technological process and system, and production indicators.

1. Any method of production is displayed through the DP system of information of controlled parameters of production facilities.

2. The properties of the production object have the final numerical value DP of the information of the parameters that are the most objective characteristics of production.

3. The amount of DP information of the controlled parameters of the design documentation (DD), functionally related to the quantitative indicators of material, labor and energy resources for the production of the product. The object of the product is more economical in production, the smaller the numerical value of DP information of the parameters it has, which provide its official purpose –

$$\text{Costs (material, labor, energy)} = f(I_{DD}; I_S; I_{TP}).$$

4. Excess and loss of DP information of the controlled parameters of the product, technological system (TS), technological process (TP) are functionally related to the indicators of production quality in the system of information connections of the properties of production facilities -

$$\text{Quality} = f(I_{pr}, I_{TS}, I_{TP}, \Delta I_{exc}, \Delta I_{loss}).$$

5. The values of DP information of quantitative, qualitative and value evaluation of the manufactured product are functionally related to the indicators of production efficiency in the information communication system of production facilities involved in the technological process –

$$\text{Effect} = f(I_{val}, I_{qual}, I_{price}).$$

The algorithms for the effective use of technical and economic information of production are based on the proposed system of DP information controlled parameters relations which are presented in table 1.

The above algorithms are an element of the result of the corresponding measurements intended for use in the calculation formula KTI- (ISO 22400-2014).

Table 1. Methods of effective use of DP information

| Indicators | Explanation |
|--|--|
| <p>1. Absolute (ALI), DP bit</p> $ALI_{DD} = \sum_{i=1}^k \log_2 \frac{x_i}{TI_i} = \log_2 \frac{1}{\delta(x_i)}, \quad ALI_{TP} = \sum_{i=1}^m \log_2 \frac{\mu_i}{S(x_i)} = \sum_{i=1}^m \log_2 \frac{1}{\delta S(x_i)}$ <p>where, x_i – the value of the measured value, TI_i – size tolerance, $TI_i \geq 3\sigma$, μ – mathematical expectation, δS – relative mean quadratic deviation.</p> | The amount of DP information of product parameters according to the documentation (DD), technological process (TP) and technological equipment (TE) |
| <p>2. Relative % (RLI)</p> $RLI_{DD} = \frac{ALI_{DD}}{ALI_{TP}}$ | The ratio of absolute indicators of design documentation to the absolute indicators of the technological process shows the degree of excess or lack of resources expended |
| <p>3. Equivalent (ELI), DP bit, UAH</p> $ELI_{DD} = \sum_{i=1}^k \log_2 \frac{x_i}{TI_{x_i}} \div x_{pi} \times k(e_p / x_{pi}), \quad ELI_{TP} = \sum_{i=1}^n \log_2 \frac{\mu_{x_i}}{U_{x_i}} \div x_{pi} \times k_i(e_p / x_{pi}),$ <p>where – $k(e/x)$ – the coefficient of coordination of the controlled parameter to the energy E based on PL units, x_{pi} – PL unit</p> | The equivalent of the absolute energy consumption of the product based on the DP value of the information of the product parameters is equivalently recalculated using the coefficients of agreement on the DP value of the information of the unit of energy. |
| <p>4. Mixed (MLI), UAH/bit</p> $MLI_{DD}^o = \frac{KTI_o}{ALI_{DD}^o}, \quad KTI_n = MLI_{DD}^o \times ALI_{DD}^n$ <p>where, KTI – key technical and economic indicators, n – a new product, o – old product</p> | The equivalent recalculation of DP information is based on the use of "PL units". |

2. Method of calculation of SI production indicators on the basis of acceptance statistical control.

2.1. The arithmetic mean value of the controlled product parameter

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (10)$$

where n is a number of products.

2.2. The scope of scattering the qualitative characteristics

$$R_j = x_{\max} - x_{\min}. \quad (11)$$

2.3. Absolute actual logarithmic index of ALI_f

$$ALI_f = \log_2 \frac{\bar{x}}{R_j}. \quad (12)$$

2.4. Mixed actual logarithmic index MLI_f

$$MLI_f = \frac{KTI}{ALI_f}. \quad (13)$$

3. The parameter of production control (PC) is a change of processing process, change of processing methods, change of route, change of technological equipment

$$PC = \log_2 \frac{\bar{x}}{R_j} - \log_2 \frac{x_i}{TI_i} \rightarrow 0. \quad (14)$$

Development of methods using the methodology of SI evaluation of production characteristics in information measuring systems based on DP information allows us to contribute to the effective achievement of production management goals.

1. The method of calculating the absolute logarithmic index (ALI) of production is based on DP information of controlled parameters in the technical documentation and DP information of controlled parameters of receiving statistical control, which are used to control the level of process equipment for processing.

2. The method of calculating the relative logarithmic index (RLI) is used to control the parameters at the level of the technological process. The smaller the value of DP information of the parameters of the manufactured product with the same quality characteristics, the more perfect the processing technology. RLI indicators reflect the quality of the technological process.

3. The method of calculating the equivalent logarithmic index (ELI) is used to calculate the value of one discrete probable (DP) bit of the product, which is the most objective indicator with the same performance characteristics of the product. This ELI is used in the marketing, planning and accounting services of the company to assess the competitiveness of the product, as well as departments of R & D and product design. ELI indicators reflect the cost-effectiveness of technological resources for the product.

4. The method of calculating the mixed logarithmic index MLI is used to manage production at the enterprise

level. It allows you to compare the efficiency of different production units in terms of resource costs per discrete probable (DP) bit of the product on the CD. MLI indicators reflect the characteristics of the technological process used to predict the CRI of a new product in the technological preparation of new production.

When setting up a new product, the use of DP product parameter information allows in the early stages of the life cycle to predict the main technical, economic and production indicators required for technological preparation for the production of a new product, based on MLI production of the old product. This significantly reduces the time for technological preparation for the production of a new product and, as a consequence, improves the technical and economic performance of the enterprise.

On the basis of the presented methods of effective use of DP information methods of the decision of the following problems are developed.

1. Method of forecasting resource costs.

Provides KTI forecast of production in the early stages of the life cycle to optimize resource costs for technological preparation of production and production on the basis of LM product parameters according to the design documentation (DD) and technological documentation (TD) of production. Type of forecasting without development of technological processes: time of production of a product; energy and material waste for the manufacture of the product; labor-intensive manufacturing of the product; the level of automation of processes of this production; the level of quality of production processes; the level of optimization of technological processes of this or new production.

2. The method of optimizing resources in the preparation of production.

Provides optimization of resources of technological processes of manufacturing of a product and a choice of methods and parameters of management of technological process (TP) on the basis of DP of information of parameters of a product on DD and technological system (TS) of production.

3. Method of optimizing production management.

Provides control of product manufacturing parameters and optimization of control parameters of technological equipment in real time on the basis of DP information of product parameters on DD and TS of production.

4. Method of production efficiency control.

Provides analysis of DP values of information of controlled parameters of TP of production and DP of information of controlled parameters of finished products for identification of technological reserves of production resource.

An important principle of improving KTI production is the use of software in system-information measuring systems to solve problems of economic analysis at the levels of the shop, shop and production.

1. Perspective (forecast, preliminary) analysis of technical and economic indicators is used when launching a new product into production in the early stages of the

life cycle and is based on algorithms of absolute and mixed DP information of controlled parameters.

$$\frac{KTI_o}{ALI_{DD}^o} \times ALI_{DD}^n = KTI_n, \quad (10)$$

where o is a product that was manufactured earlier, and n is a new product.

2. Operational analysis is based on the use of data of statistical acceptance control of the product. This allows in real time the production time to calculate the change in the basic time of formation on the necessary parameters of the processing process to reduce the coefficient of technological margin of accuracy $CTMA = X \text{ const}/H_{\text{techn}}$ tends to one. Reducing the basic time for the operation in general in production increases productivity, reduces labor intensity and cost of the product.

3. The current analysis of the results of activities for a given period is used to identify technological reserves and is based on the comparison of actual production mixed indicators MLI, production with the values calculated on the basis of energy consumption for production on the technical documentation.

System-information principles and approaches to uncertainty based on "Planck units."

"Planck units" (PL units) are very far from the ranges used in practice and are not reproduced with the help of real physical objects, they define the limits of application of modern physical theories. Therefore, they are not used in metrology [12]. But the numerical values of "PL units" can be used in system-information analysis of process parameters and systems as the threshold of sensitivity (space-lp, time-tr, mass-mr, energy-Er, and so on) PQ. They are composed, calculated and interconnected through physical fundamental constants C (speed of light, m/s); \hbar (Dirac constant, J c); G (gravitational constant, m³/kg-1c-2) [13] and can be expressed one by one

$$l_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{C^3}} \approx 1,616255(18) \times 10^{-35} \text{ m};$$

$$t_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{C^5}} \approx 5,391246(60) \times 10^{-44} \text{ s};$$

$$m_p = \sqrt{\frac{C\hbar}{G}} \approx 2,176434(24) \times 10^{-8} \text{ kg};$$

$$E_p = \sqrt{\frac{\hbar C^5}{G}} \approx 1,9561 \times 10^9 \text{ J};$$

$$l_p = t_p C = \frac{\hbar}{m_p C}.$$

The rationale for the application of PQ "PL units" as a sensitivity threshold is that they are interconnected linearly with each other and with the FFC and their accuracy. In nature, the sensitivity threshold of PQ is the interval within which PQ does not change its DP information. The values of FFC and their relative accuracy were agreed by KODATA in 2002 [14] and are taken as constant values. From this point of view, the "PL units" of

PQ and their uncertainty are also constant values, and their DP information is constant over time. Therefore, the uncertainty of the "PL unit" can be used as a universal uncertainty PQ.

This approach makes it possible to calculate the equivalent values of "PL units" of PQ to each other.

We write the system-information equations for "PL units" l_p - space, t_p - time, m_p - mass, E_p -energy [15] to determine the extended uncertainty $U(l_p)$, $U(t_p)$, $U(m_p)$, $U(E_p)$ on the basis of SI provisions of the law No. 2.

For the logarithmic measure of PL length

$$l_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{C^3}},$$

$$\log_2 \frac{P(l_p)}{U(l)} = \frac{1}{2} (\log_2 \frac{P(G)}{U(G)} + \log_2 \frac{P(\hbar)}{U(\hbar)} - 3 \log_2 \frac{P(C)}{U(C)}), \quad (11)$$

$$U(l) = \frac{l_p}{2^{\frac{1}{2}(\log_2 \frac{P(G)}{U(G)} + \log_2 \frac{P(\hbar)}{U(\hbar)} - 3 \log_2 \frac{P(C)}{U(C)})}}, \quad U(l_p) = U(l) \times k_p,$$

$$k_p = \frac{(U(\hbar) + U(C) + U(G))}{(U(\hbar) \times U(C) \times U(G))}.$$

For the logarithmic measure of PL time

$$t_p = \sqrt{\frac{G\hbar}{C^5}},$$

$$\log_2 \frac{t_p}{U(t)} = \frac{1}{2} (\log_2 \frac{G}{U(G)} + \log_2 \frac{\hbar}{U(\hbar)} - 5 \log_2 \frac{C}{U(C)}), \quad (12)$$

$$U(t) = \frac{t_p}{2^{\frac{1}{2}(\log_2 \frac{G}{U(G)} + \log_2 \frac{\hbar}{U(\hbar)} - 5 \log_2 \frac{C}{U(C)})}}, \quad U(t_p) = U(t) \times k_p.$$

For the logarithmic measure of PL mass

$$m_p = \sqrt{\frac{C\hbar}{G}},$$

$$\log_2 \frac{m_p}{U(m)} = \frac{1}{2} (\log_2 \frac{C}{U(C)} + \log_2 \frac{\hbar}{U(\hbar)} - \log_2 \frac{G}{U(G)}), \quad (13)$$

$$U(m) = \frac{m_p}{2^{\frac{1}{2}(\log_2 \frac{C}{U(C)} + \log_2 \frac{\hbar}{U(\hbar)} - \log_2 \frac{G}{U(G)})}}, \quad U(m_p) = U(m) \times k_p.$$

For the logarithmic measure of PL energy

$$E_p = m_p C^2 = \frac{\hbar}{t_p} = \sqrt{\frac{\hbar C^5}{G}},$$

$$\log_2 \frac{E_p}{U(e)} = \frac{1}{2} (\log_2 \frac{\hbar}{U(\hbar)} + 5 \log_2 \frac{C}{U(C)} - \log_2 \frac{G}{U(G)}), \quad (14)$$

$$U(e) = \frac{E_p}{2^{\frac{1}{2}(\log_2 \frac{\hbar}{U(\hbar)} + 5 \log_2 \frac{C}{U(C)} - \log_2 \frac{G}{U(G)})}}, \quad U(e_p) = U(e) \times k_p.$$

Let's calculate the numerical values of the logarithmic unit measure "PL units" for l_p - space, t_p - time, m_p - mass, E_p -energy and the order of absolute error, table 2.

Based on the calculated values of the logarithmic unit measure (LUM) of the basic units of the SI system, we calculate some values of the LUM for the derived units. Let's calculate the coefficients of adjustment Cad_j

(Er / PQp) as the ratio of Er PL energy to PQp PL physical quantity and enter them in table 3.

Table 2. Logarithmic unit measure of "PL units" (PQp)

| Units of measurement PQ | Logarithmic unit measure PQp (LUMp) [DPbit] | The absolute error of the logarithmic unit measure PQp |
|-------------------------|---|--|
| Space (l) [1m] | $\log_2 \frac{1}{1,616 \cdot 10^{-35}} \approx 115,589$ | $\Delta \approx 0,0097 \text{ m}$ |
| Time (t) [1c] | $\log_2 \frac{1}{5,391 \cdot 10^{-44}} \approx 143,734$ | $\Delta \approx 0,002 \text{ c}$ |
| Substance (m) [1kg] | $\log_2 \frac{1}{2,176 \cdot 10^{-8}} \approx 25,454$ | $\Delta \approx 0,0002 \text{ kg}$ |
| Energy (E) [1J] | $\log_2 \frac{1}{1,956 \cdot 10^9} \approx -30,836$ | $\Delta \approx 0,0002 \text{ J}$ |

Table 3. Logarithmic unit measure of PL units

| No. | SI system units | Dimensionality | Logarithmic unit measure PQp [DP bit] | Coefficient of adjustment Cadj (Er / PQp) |
|-----|-------------------------|--|---------------------------------------|---|
| 1 | Energy (Ep) | J = kg × m ² / s ² | -30,836 | 1 |
| 2 | Substance (mp) | kg | 25,454 | -1,211 |
| 3 | Space (Lp) | m | 115,589 | -0,267 |
| 4 | Time (tp) | with | 143,734 | -0,215 |
| 5 | Power (Rp) | kg × m ² / s ³ | -174,57 | 0,177 |
| 6 | Work (Ap) | kg × m ² / s ² | -30,836 | 1.0 |
| 7 | The amount of heat (Qp) | 4.1868J | -129,104 | 0,239 |
| 8 | Pressure (pp-pascal) | kg / s ² × m | -377,603 | 0,082 |
| 9 | Heat of combustion (Hp) | m ² / s ² | -236,56 | 0,13 |
| 10 | Area (Sp) | m ² | 231,178 | -0,534 |

Example: Determine the equivalent value of power P to energy E in the system SI through PL units

$$\begin{aligned}
 E_p &= \sqrt{\frac{\hbar C^5}{G}}, \quad LUM(E_p) = \log_2\left(\frac{1}{E_p}\right), \quad LUM(P_p) = \log_2\left(\frac{1}{P_p}\right), \\
 P &[\text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{c}^3}], \quad \log_2(P) = \log_2(m) + 2\log_2(l) - 3\log_2(t), \\
 \log_2\left(\frac{1}{P_p}\right) &= \log_2\left(\frac{1}{m_p}\right) + 2\log_2\left(\frac{1}{l_p}\right) - 3\log_2\left(\frac{1}{t_p}\right), \\
 P_p &= \frac{1}{2^{(\log_2(\frac{1}{m_p}) + 2\log_2(\frac{1}{l_p}) - 3\log_2(\frac{1}{t_p}))}}, \quad C_{adj}(E_p / P_p) = \frac{LUM(E_p)}{LUM(P_p)}, \\
 \log_2 \frac{E_p^{eq}}{E_p} &= C_{adj}(E_p / P_p) \times \log_2 \frac{P}{P_p}; \quad E_p^{eq} = E_p \times 2^{(C_{adj}(E_p / P_p) \times \log_2 \frac{P}{P_p})}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

where LUM(x_p) – logarithmic unit measure, E_p [J] – PL unit of energy, P_p – PL unit of power, E_p^{eq} [J] – PL energy equivalent to power in the system of units SI, C_{adj}(E_p/P_p) – coefficient of adjustment, P – power in the SI system.

Based on the Law №3. Affiditivity of information parameters of properties" of physical quantities and Cadj presented in table 3 you can calculate the amount of equivalent energy from the parameters that reflect the technical characteristics of the objects according to the formula

$$\begin{aligned}
 I &= \log_2 \frac{E_{xi}^{eq}}{e_p} = \sum_{i=1}^n \left\{ \log_2 \frac{x_i}{x_{ip}} \times C_{i(adj)}(E_p / x_{ip}) \right\} [DPbit] \\
 E_{xi}^{eq} &= e_p \times 2^{\sum_{i=1}^n \left\{ \log_2 \frac{x_i}{x_{ip}} \times C_{i(adj)}(E_p / x_{ip}) \right\}}, \\
 \sum_{i=1}^n E_{xi}^{eq} (techdoc) &= Ef_{prod} \cdot \sum_{i=1}^n E_{xi}^{eq} (techproc)
 \end{aligned} \tag{16}$$

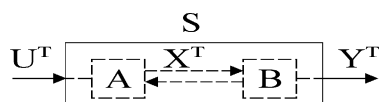
where $E_{\text{req}} [J]$ – PL equivalent of the parameter x_i to energy, x_i – parameters, x_{pi} – PL unit of the parameter, e_p – PL unit of energy, $C_{i(\text{adj})} (E_p / x_{ip})$ – coefficient of adjustment, $E_{f_{\text{prod}}}$ – effectiveness of production.

If we take into account (theoretically) all the properties of the object, or the performance of the product, the equivalent energy from the parameters of the object will be the most objective characteristic of its value. And given the cost of energy on the market at the moment, the price of the object will be tied to time. The ratio of energy

equivalent from the parameters of the product according to the design documentation to the equivalent energy from the parameters of the product as a result of the technological process, we obtain the efficiency of manufacturing the product. The system-information model of production formulates the principle of optimality which coincides with Pareto optimality: optimality is a state of some system in which the value of each particular indicator that characterizes the system cannot be improved without deteriorating others [16].

Use of system-information modeling in various scientific directions.

System-information modeling in systems theory.



- straightforward information process

$$S = U^T \sigma X^{T+1} \eta Y^{T+1}$$

$$\sigma: \{[T \times (T+1)] \times X^T \times U^T\} \rightarrow X^{T+1}$$

$$\eta: \{[(T+1)] \times X^{T+1}\} \rightarrow Y^{T+1}$$

U – enter

X – system status

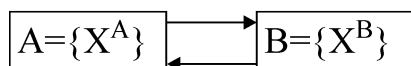
Y – exit

σ – transitive reflection

η – initial reflection

T – time

- cyclic information process



$$f: U^A(Y^B) \rightarrow X^A \rightarrow Y^A(U^B) \rightarrow X^B \rightarrow Y^B(U^A)$$

$$F(A, B) = U^A \sigma^A X^A \eta^A Y^A \theta U^B \sigma^B X^B \eta^B Y^B \nu U^A$$

$$X^A = \{X_i^A\}; X^B = \{X_j^B\}$$

$$\sigma^A, \sigma^B, \eta^A, \eta^B$$

ν, θ

$$U^A, U^B, Y^A, Y^B$$

$$\Omega = \sigma^A \eta^A \sigma^B \eta^B \theta \nu$$

- the set of system states

- reflection of initial and transitive systems A, B

- reflection of connectivity

- input and output of A and B systems

- total reflection of the system SAB

$$I[F(A)]: I(U^A \sigma^A X^A \eta^A) \rightarrow I(Y^A); I[F(B)]: I(U^B \sigma^B X^B \eta^B) \rightarrow I(Y^B);$$

$$I[F(A, B)]: I(Y^{A_T}) \rightarrow I(Y^{B_T}) \rightarrow I(Y^{A_{T+1}}); I(Y^A) = \{a_i\}; I(Y^B) = \{b_i\}$$

a_i, b_i – properties of the system S_A, B , T – time

System-information models of object dynamics.

$$1) F(y, \dot{y}, \ddot{y}, u, \dot{u}) + f = 0,$$

$$a_0 \ddot{y} + a_1 \dot{y} + a_2 y - b_0 \dot{u} - b_1 u - c_0 f = 0,$$

$$\Delta y = y - y^*, \Delta \dot{y} = \dot{y} - \dot{y}^*, \Delta \ddot{y} = \ddot{y} - \ddot{y}^*, \Delta u = u - u^*, \Delta \dot{u} = \dot{u} - \dot{u}^*, \Delta f = f - f^*$$

$y, \dot{y}, \ddot{y}, u, \dot{u}, f$ – expected values

$y^*, \dot{y}^*, \ddot{y}^*, u^*, \dot{u}^*, f^*$ – real values, Δy – interval,

$$a_0 \frac{\ddot{y}}{\Delta \ddot{y}} + a_1 \frac{\dot{y}}{\Delta \dot{y}} + a_2 \frac{y}{\Delta y} - b_0 \frac{\dot{u}}{\Delta \dot{u}} - b_1 \frac{u}{\Delta u} - c_0 \frac{f}{\Delta f} = 0,$$

$$2) \frac{\ddot{y}}{\Delta \ddot{y}} = S^{\ddot{y}}, \frac{\dot{y}}{\Delta \dot{y}} = S^{\dot{y}}, \frac{y}{\Delta y} = S^y, \frac{\dot{u}}{\Delta \dot{u}} = S^{\dot{u}}, \frac{u}{\Delta u} = S^u, \frac{f}{\Delta f} = S^f,$$

$S^{\ddot{y}}, S^{\dot{y}}, S^y, S^{\dot{u}}, S^u, S^f$ – communication capacity of quantities.

3) system-information equation of dynamics

$$\log_2(a_0 S^{\ddot{y}} + a_1 S^{\dot{y}} + a_2 S^y) = \log_2(b_0 S^{\dot{u}} + b_1 S^u + c_0 S^f) = 0.$$

$I(y, \dot{y}, \ddot{y}, u, \dot{u}, f)$ – the amount of information carried by the equation of dynamics;

4) DP information of differentiation of sum, product and share

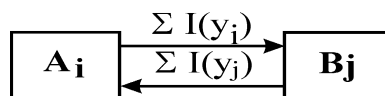
$$a) I\left(\frac{u}{\Delta u} + \frac{v}{\Delta v}\right)' = \log_2 \left(\frac{u'\Delta u - u\Delta u'}{\Delta u^2} + \frac{v'\Delta v - v\Delta v'}{\Delta v^2} \right),$$

$$b) I\left(C \frac{u}{\Delta u}\right)' = \log_2 \left(C \times \frac{u'\Delta u - u\Delta u'}{\Delta u^2} \right),$$

$$c) I\left(\frac{u}{\Delta u} \times \frac{v}{\Delta v}\right)' = \log_2 \left\{ \left(\frac{u}{\Delta u}\right)' \frac{v}{\Delta v} + \frac{u}{\Delta u} \left(\frac{v}{\Delta v}\right)' \right\} = \log_2 \left\{ \left(\frac{u'\Delta u - u\Delta u'}{\Delta u^2} \times \frac{v}{\Delta v}\right) + \left(\frac{v'\Delta v - v\Delta v'}{\Delta v^2} \times \frac{u}{\Delta u}\right) \right\},$$

$$d) I\left(\frac{u}{\Delta u} \times \frac{\Delta v}{v}\right)' = \log_2 \left\{ \left(\frac{u}{\Delta u}\right)' \frac{\Delta v}{v} + \frac{u}{\Delta u} \left(\frac{\Delta v}{v}\right)' \right\} = \log_2 \left\{ \left(\frac{u'\Delta u - u\Delta u'}{u^2} \times \frac{\Delta v}{v}\right) + \left(\frac{v'\Delta v - v\Delta v'}{v^2} \times \frac{\Delta u}{u}\right) \right\}.$$

System-information models of object management tasks.



$$\sum_{i=1}^n I(A_i) = f\left(\sum_{i=1}^n (I_{ni}; I_{yi}; I_{mi}; I_{R_i^n}; I(z_A))\right), \quad \sum_{j=1}^m I(B_j) = f\left(\sum_{j=1}^m (I_{mj}; I_{yj}; I_{mj}; I_{R_j^m}; I(z_B))\right)$$

$I(A_i), I(B_j)$ – system A, B status;

$I_{n,m}, I_{y_i,y_j}, I_{T_i,j}, I_{R_i,j}, I_z$ – properties (n, m), value (y), time (T), place (Rn), environment (z),

$$1. \sum_{i=1}^n I(A_i) = \sum_{j=1}^m I(B_j) \quad - \text{SI principle of management without loss of information.}$$

$$2. \sum_{i=1}^n I(A_i) - \sum_{j=1}^m I(B_j) = \sum_{i=1}^n \Delta I(B_j), \quad \sum_{i=1}^n \Delta I(B_j) \rightarrow 0 \quad - \text{SI regulation A} \rightarrow \text{B.}$$

$$3. \sum_{i=1}^n I(A_i) - \sum_{j=1}^m I(B_j) = \sum_{i=1}^n \Delta I(A_i), \quad \sum_{i=1}^n \Delta I(A_i) \rightarrow 0 \quad - \text{SI adaptation A.}$$

$$4. \left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \Delta I(A_i) \rightarrow \min(0) \\ \sum_{j=1}^m \Delta I(B_j) \rightarrow \min(0) \end{array} \right\} - \text{SI stabilization.}$$

$$5. \left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n Q_i(A_i): \sum_{i=1}^n \Delta I(A_i) \rightarrow \min \sum_{i=1}^n \Delta I(A_i) \\ \sum_{j=1}^m Q_j(B_j): \sum_{j=1}^m \Delta I(B_j) \rightarrow \min \sum_{j=1}^m \Delta I(B_j) \end{array} \right\} - \text{SI self-organization.}$$

$Q_i(A), Q_j(B)$ – self-organization operators

$$6. \sum_{i=1}^n \Omega_{ij} \left(\sum_{i=1}^n I(A_i), \sum_{j=1}^m \Delta I(B_j) \right): \sum_{i=1}^n \Delta I(A_i) \rightarrow \sum_{i=1}^n I(A_i) \Bigg|_{\sum_{j=1}^m \Delta I(B_j) \rightarrow 0},$$

$$\sum_{i=1}^n \Omega_{ij} \left(\sum_{i=1}^n I(A_i), \sum_{j=1}^m \Delta I(B_j) \right): \sum_{i=1}^n \Delta I(A_i) \rightarrow \sum_{i=1}^n I(A_i) \Bigg|_{\sum_{j=1}^m \Delta I(B_j) \rightarrow 0}; \quad \Omega_{ij} \text{ operator (self) learning}$$

Discussion of results

Discussion of the results of this article should address several issues: 1) how the system-information approach corresponds to the principle of conformity in science?; 2) to what extent is the use of PL units in the

system-information approach as thresholds of PQ sensitivity justified?; 3) what principles of system-information approach can be used in different scientific directions.

The system-information approach is based on the concept of communication capacity. The value of

communication capacity quantitatively characterizes the ability of the quantity of information aggregation by quanta with other quantities. From the point of view of mathematics in the information equation the number of quantum quantities on the left side of the equation is equal to the number of quantum quantities on the right side of the equation. Communication capacity is quantified as the ratio of the value of a quantity to the interval of extended uncertainty of that quantity. If the interval of extended uncertainty is represented as the absolute error of the nominal value, then the value of such a modulo ratio is a quantitative characteristic of accuracy. This characteristic is used in engineering technology [17, p. 6].

1. System-information approach states that information has not only probable but also deterministic characteristics. All properties of the elements of the universe have DP information. The main properties of DP information in the system include the following:

- 1) the element that has DP information in the system is the value;
- 2) DP information of quantity, quality, value is the information characteristic of the state of the system;
- 3) the value of the interval of extended uncertainty of the elements within the system is a regular value;
- 4) in a balanced closed system with independent elements, the total DP information has a finite value and does not change over time;
- 5) in a closed system, increasing the interval of extended uncertainty of some elements leads to a decrease in the intervals of extended uncertainty of other elements of the system;
- 6) the amount of DP information in a closed system increases with the increase of interconnected elements of the system.

From the analysis of the properties of DP information in the system we can conclude that DP information behaves in the system as a Shannon negentropy. Its value is interrelated with the value of the interconnected elements, which are based on the sensitivity threshold of the system elements to each other. The value of DP negentropy is minimal for independent elements of the system and maximum for the overall interconnectedness of all elements.

Thus, DP information is a function of the value of the interval of extended uncertainty of the elements and the degree of their interconnectedness in the system. In a balanced closed system with independent elements of increasing DP information in one place, the system automatically reduces DP information in another place (analogous to the Pareto principle), as they obey the law of conservation of DP information as well as energy. The DP property of information self-organization of systems is based on this principle.

2. The use of PL units as sensitivity thresholds in determining the PQ equivalent to each other and to energy in units of the SI system is based on the same values of the amount of DP information possessed by PL units of mass, time and length. Since certain PQs, including energy, are derived from PL units of mass, time, and length, we calculated the matching coefficients on this basis and used them to calculate the PL equivalent of PQ to energy. It is

important that the PL units as the sensitivity threshold PQ can be considered as constant values due to the agreed values of the relative errors of the physical constants (KODATA in 2002).

3. Here are examples of the concept of using a system-information approach.

In cosmology: The universe is a multilayered, hierarchical DP information interconnected system in which the stabilization of elementary deviations of categorical attributes in time occurs on the principles of self-organization.

Self-organization of systems.

1) Self-organization of the system is one of the forms of organization which at the bifurcation point is independently structured (self-organized) without the involvement of external DP information resources.

2) In the process of self-organization, the structure of the system tends to a state of minimum DP information potential (the amount of DP information of the state of the system), which does not change its target functions.

3) The process of self-organization of systems is based on the principle of DP information coordination of uncertainty in the structuring (self-organization) of system elements.

The scientific provisions of the methodology of system-information approach explain a number of processes in various fields of scientific and economic activity.

In sociology: the level of development of society is estimated by the value of reaction time to changes in the uncertainty of the categorical attributes of the surrounding space in the self-organization of DP information links in society.

In economics: the level of economic development is estimated by the growth of DP information capacity of economic relations.

In the technosphere: technology is evolving in the direction of increasing the DP information capacity of products, and technology is evolving towards the growth of time-derived DP information capacity of manufactured products.

What are the prospects for the development of a system-information approach? We see in the development of DP-based models of computer technology to solve a variety of scientific and applied problems, especially software, which would replace experimental field tests of processes and systems with computer, by analogy with the scientific field of computer chemistry - computer physics, mechanics, engineering technology, etc.

What are the advantages of the proposed approach to modeling processes and systems of the technosphere?

1) DP models of processes and systems integrate elements of the product life cycle - due to the invariance in time of the information connection between them.

2) Simplifies mathematical methods of optimization in solving problems of analysis and synthesis of processes and systems - just choose a system with a minimum amount of DP information.

3) Reduces the cost of resources (similar to existing ones) in solving scientific and applied problems - computer, software, time, financial, etc.

Conclusions

The system-information approach to the uncertainty of the processes and systems of the technosphere makes it possible from a system-information point of view to look

at the patterns of development of the surrounding world and the laws of conservation. The methodology of its use provides an opportunity for non-traditional solutions to problems that have arisen in new areas of science and technology.

References

1. Samorodov, N. V. (2009), "Chance for survival, or Engineering ecology and management of the technosphere", *Biology*, No. 21.
2. Lutskiy, S. V. (2008), Theoretical foundations of the system-information approach to technological processes and systems : Monograph, 238 p.
3. Ruzhentsev, I. V., Lutskiy, S. V. (2016), "The world of discrete-іmovirnoy information during the previous processes of systems", *Metrology and Priladi*, P. 43–46.
4. Gustav, O., Dzhanguindo P. (2001), *Digital Automation and Control Systems*, St. Petersburg, 557 p.
5. Hartley, R. L. (1959), *Information Transmission: Information Theory and Its Applications*, 325 p.
6. Shannon, K. (1963), *Works on information theory and cybernetics*, 830 p.
7. Lutskiy, S. V. (2016), "Evidence about the restoration of copyright for TV", *System-informatsionnyy pidhid to the processes of that systems*, State Service of Intellectual Power of Ukraine, No. 63746, Issue on January 22.
8. Finkelstein, L. (1982), *Theory and Philosophy of Measurement* : HendBook of measurement Science. Vol. 1, Edited By P. H. Sydenham, 412 p.
9. Zakharov, I. P., Kukush, V. D. (2002), *Measurement uncertainty theory* : Textbook, Manual, 256 p.
10. Kolmogorov, A. N., Fomin, S. V. (1989), *Elements of the theory of functions and functional analysis* : Textbook for universities 6th ed. rev., 624 p.
11. Tsidelko, V. D., Yaremchuk, N. A. (2002), *Processing of the data and giving the result to the result* : Monograph, 176 p.
12. Pavlenko, Y. F., Kondrashov, S. I., Nezhmakov, P. I., Maslova, N. M. (2013), *Introduction to Quantum Metrology* : Navch. posib / for ed. Pavlenka Yu. F., 148 p.
13. Planck, M. (1990), *Permanent observer of the Prussian Academy of Sciences -1899*, P. 440 annealing of Phzsik, Vol. 1, P. 69.
14. Kononogov, S. A. (2008), *Metrology and fundamental physical constants*, 269 p.
15. Tomilin, K. A. (2002), "Planck quantities – 100 years of quantum theory. History. Physics. Philosophy", *Proceedings of the International Conference, NIA-Priroda*, P. 105–113.
16. Nogin, V. D. (2020), *Set and the Pareto principle*, SPb : Publishing and Printing Association of Higher Educational Institutions, 100 p.
17. Ed. Kosilova, A. G., Meshcheryakova, R. K. (1985), *Handbook of a technologist of a mechanical engineer*, In 2 volumes C74 T1, 4th bridge, rev. and add., 656 p.

Received 20.07.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Луцький Сергій Володимирович – кандидат технічних наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри метрології та технічної експертизи, Харків, Україна; email: lutsk.sv6@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5327-6591>.

Луцкий Сергей Владимирович – кандидат технических наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший преподаватель кафедры метрологии и технической экспертизы, Харьков, Украина.

Lutskyy Sergey – PhD (Engineering Sciences), Kharkiv National University of Radio Electronics, Senior Lecturer of the Department of Metrology and Technical Expertise, Kharkiv.

СИСТЕМНО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ ТЕХНОСФЕРИ

Предметом дослідження в статті є системно-інформаційний підхід до невизначеності параметрів процесів і систем техносфери як один із наукових напрямків використання теорії інформації в метрології та інших наукових напрямків. В основі системно-інформаційного підходу лежить визначення поняття терміна "інформація" властивостей системи, її зміст і значення. Вирішення базового в метрології завдання отримання "інформації" кількісної характеристики істинного значення властивостей об'єктів і явищ, які розкривають закономірності навколишнього середовища, є складною науковою проблемою. Інструментом для отримання інформації про властивості системи є процес вимірювання. Один із напрямків розвитку теорії вимірювань є концепція невизначеності. **Мета** роботи – дослідження нетрадиційних рішень завдань техніко-кібернетичних систем на основі системно-інформаційного підходу до невизначеності параметрів процесів і систем техносфери. В статті вирішуються наступні **завдання**: провести аналіз оцінювання параметрів технологічних процесів та систем на основі системно-інформаційного підходу; розробити системно-інформаційні методи і алгоритми ефективного використання дискретно-імовірнісної інформації в техніко-кібернетичних системах; розробити принципи та підходи використання системно-інформаційної оцінки

невизначеності планківських одиниць, використання системно-інформаційного моделювання в різних наукових напрямках. Використовуються такі **методи**: системно-інформаційний підхід до процесів і систем, методологія системно-інформаційного моделювання вимірюваної величини; системно-інформаційна методологія оцінювання вимірюваної величини і невизначеності. Отримано наступні **результати**: розроблено системно-інформаційну методику визначення точності вимірювання номінального параметру, яка забезпечує максимальну інформативність непрямого контролю за пов'язаними з ним незалежними параметрами; розроблені системно-інформаційні алгоритми ефективного використання дискретно-імовірнісної інформації в техніко-кібернетичних системах; розроблено системно-інформаційну методику розрахунку планківського енергетичного еквіваленту технічних показників виробу; сформульований принцип розрахунку ефективності виготовлення виробу на основі планківського енергетичного еквіваленту фізичних величин. **Висновки**: Вирішення поставлених завдань дає можливість з інформаційного куту зору дослідити закономірності етапів життєвого циклу техніко-кібернетичних систем і закони перетворення і збереження.

Ключові слова: системно-інформаційний підхід; дискретно-імовірнісна інформація; невизначеність; планківські одиниці.

СИСТЕМНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ ТЕХНОСФЕРЫ

Предметом исследования в статье является системно-информационный подход к неопределенности параметров процессов и систем техносферы как один из научных направлений использования теории информации в метрологии и других научных направлениях. В основе системно-информационного подхода лежит определение понятия термина "информация" свойств системы, ее содержание и значение. Решение базовой в метрологии задачи получение "информации" количественной характеристики истинного значения свойств объектов и явлений, которые раскрывают закономерности окружающей среды, является сложной научной проблемой. Инструментом для получения информации о свойствах системы является процесс измерения. Одно из направлений развития теории измерений является концепция неопределенности. **Цель работы** - исследование нетрадиционных решений задач технико-кибернетических систем на основе системно-информационного подхода к неопределенности параметров процессов и систем техносферы. В статье решаются следующие **задачи**: провести анализ оценки параметров технологических процессов и систем на основе системно-информационного подхода; разработать системно-информационные методы и алгоритмы эффективного использования дискретно-вероятностной информации в технико-кибернетических системах; разработать принципы и подходы использования системно-информационной оценки неопределенности планковских единиц, использование системно-информационного моделирования в различных научных направлениях. Используются следующие **методы**: системно-информационный подход к процессам и системам, методологія системно-информационного моделирования измеряемой величины; системно-информационная методологія оценки измеряемой величины и неопределенности. Получены следующие **результаты**: разработана системно-информационная методика определения точности измерения номинального параметра, которая обеспечивает максимальную информативность и качество результата измерения; разработаны системно-информационные алгоритмы эффективного использования дискретно-вероятностной информации в технико-кибернетических системах; разработана системно-информационная методика расчета планковского энергетического эквивалента технических показателей изделия; сформулирован принцип расчета эффективности производства изделия на основе планковского энергетического эквивалента физических величин. **Выводы**: Решение поставленных задач на основе системно-информационного подхода к неопределенности параметров процессов и систем дает возможность с системно-информационной точки зрения исследовать закономерности этапов жизненного цикла технико-кибернетических систем и законы сохранения.

Ключевые слова: системно-информационный подход; дискретно-вероятностная информация; неопределенность; планковских единицы.

Бібліографічні опису / Bibliographic descriptions

Луцький С. В. Системно-інформаційний підхід до невизначеності параметрів процесів і систем техносфери. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 91–105. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.091>

Lutsky, S. (2021), "System-information approach to uncertainty of process and system parameters", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 91–105. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.091>

І. Ш. НЕВЛЮДОВ, В. В. ЄВСЄЄВ, Н. П. ДЕМСЬКА, М. Г. СТАРОДУБЦЕВ

ВИРІШЕННЯ ПИТАННЯ МОДЕРНІЗАЦІЇ ВИРОБНИЧОГО ОБЛАДНАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КІБЕР-ФІЗИЧНИХ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Постійне вдосконалення парку технологічного обладнання, в умовах існуючого виробництва, є складним завданням, при вирішенні якого необхідно враховувати багато параметрів, таких як механізація, автоматизація і застосування нових технологій в рамках концепції Industry 4.0. Одним з ефективних методів підвищення техніко-економічних показників та надійності виробництва є модернізація існуючого технологічного оснащення, яка ґрунтується на необхідності використання сучасних методів розробки і впровадження інформаційних технологій, таких як Industrial Internet of Things, кібер-фізичних виробничих систем. **Предметом** даного дослідження є апробація методів розробки адитивного кібер-дизайну для автоматизації складного промислового обладнання. **Метою** даної статті є розробка кібер-фізичної виробничої системи керування, для модернізації преса гідравлічного ДА2238Б. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**: провести аналіз технічних характеристик і системи керування преса гідравлічного ДА2238Б; провести дослідження схеми гідравлічної принципової на базі якої обрати датчики і виконавчі механізми, а також режими роботи; розробити схему включення гідро обладнання; розробити автоматизовану систему керування на базі сучасного одноплатного комп'ютера і розробити інтуїтивно зрозумілий адитивний кібер-дизайн інтерфейсу оператора; провести експериментальні дослідження. **Висновки**: в результаті досліджень було розроблено структурну схему та реалізовано автоматизовану систему керування на базі LattePanda. Обрані датчики тиску і температури для контролю процесів пресування, що дозволило забезпечити точне дотримання вимог технологічного процесу. Розроблено автоматизоване робоче місце оператора, в якому реалізовано сенсорне управління на базі адитивного кібер-дизайну. Розроблена система керування забезпечує: збір та аналіз виробничих даних, на базі яких можна вдосконалити технологію виробництва і забезпечити прогнозування досягнення "Lean Manufacturing".

Ключові слова: Industry 4.0; Smart Manufacturing; кібер-фізичні виробничі системи; адитивний кібер-дизайн; модернізація.

Вступ

Однією з основних умов, що забезпечує високі темпи зростання продуктивності праці в промисловості, є постійне вдосконалення парку технологічного обладнання. Це досягається насамперед заміною застарілого обладнання новим, сучасним. Однак не завжди така заміна буде економічно виправданою. Нерідко, застарілому обладнанню можуть бути забезпечені підвищені техніко-експлуатаційні якості, шляхом конструктивних змін окремих систем і агрегатів [1] чи додавання деяких систем, що не потребує великих витрат, що дозволяє використовувати його з не меншим виробничим ефектом ніж нове. Такого роду удосконалення обладнання, зване модернізацією [2], в кінцевому рахунку переслідує ту ж мету, що і ремонт, – збільшити термін ефективного використання, діючого обладнання.

У порівнянні з обладнанням, яке випускалося раніше, сучасні моделі мають, як правило, більш високу продуктивність і точність, більшу надійність і довговічність, їх обслуговування є менш трудомістким і більш безпечним, вимагає менших експлуатаційних витрат. Такі ж результати повинні досягатися і модернізацією. Це визначає наступні її основні напрямки: підвищення швидкохідності, потужності, жорсткості, вібростійкості і точності, скорочення допоміжного часу, автоматизації робочого циклу, концентрації операцій, поліпшення експлуатаційних якостей. Можливість забезпечення значного підвищення ефективності чинного парку обладнання, з невеликими витратами і швидкою окупністю, за рахунок модернізації, є причинами

досить великої уваги, яка приділяється таким роботам на виробництві.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найбільш ефективна комплексна модернізація, в результаті якої всі техніко-економічні та експлуатаційні показники модернізованої машини наближаються до сучасного рівня [3].

Однак, коли для вирішення конкретних виробничих завдань потрібно поліпшення лише окремих параметрів обладнання, часто обмежуються частковою його модернізацією.

Модернізуючи застаріле обладнання для виконання конкретних функцій за модульним принципом, замінюючи окремі системи і агрегати обладнання, можна привести виробництво до сучасних стандартів без величезних капітальних витрат [4-6]. До робіт з модернізації відносять також конструктивні переробки обладнання, що мають на меті розширення технологічних можливостей або зміну технологічного призначення обладнання [7-9]. Ці конструктивні зміни також дозволяють продовжити термін ефективного використання обладнання, а в деяких випадках, навіть значно збільшити його продуктивність.

Таким чином, актуальним стає завдання модернізації при мінімальних фінансових і часових витратах. Можливим її рішенням є модернізація обладнання за допомогою синтезу технологій ІоТ і сучасних одноплатних комп'ютерів і сучасних сенсорів.

Даний симбіоз дозволяє здійснити часткову модернізацію застарілого обладнання, при цьому

забезпечити контроль параметрів виробничого процесу, для подальшого аналізу. Одним із сучасних підходів до автоматизації виробництва, є впровадження кібер-фізичних виробничих систем (CPPS) [10, 11], тобто інтеграції в одній екосистемі фізичних та інформаційних потоків даних [12, 13].

Мета роботи. Розробка кібер-фізичної виробничої системи керування, для модернізації преса гідравлічного ДА2238Б.

1. Аналіз параметрів преса гідравлічного ДА2238Б

Загальний вигляд преса ДА2238Б до модернізації представлений на рис. 1. Прес є універсальним обладнанням, основне призначення якого – пресування виробів з пластмас в закритих прес-формах. Може бути використаним для виконання операцій неглибокої витяжки, гнуття і рихтування металевих виробів. Технічні характеристики преса гідравлічного ДА2238Б наведено в табл. 1.

Система управління преса гідравлічного ДА2238Б представлена на рис. 2. Як можна бачити з рисунків 1 і 2 прес керувався тільки в ручному режимі, контроль за технологічними параметрами виготовлення виробів проводиться оператором у візуальному режимі. Відповідно це не дозволяє контролювати параметри та режими роботи преса гідравлічного ДА2238Б, який в залежності від переходу від одного типу деталей на інший, вимагає тривалого настроювання, що призводить до



Рис. 1. Загальний вигляд преса ДА2238Б до модернізації

Тому для вирішення поставленого завдання модернізації преса гідравлічного ДА2238Б, відповідно до запропонованих у [10, 14] методів і моделей, було проведено декомпозицію мети на наступні підцілі:

- дослідити схему гідравлічну принципову (фрагмент представлений на рис. 3);

збільшення часу простою обладнання, а отже знижує ритмічність виробництва і збільшує вартість виробів [14].

Таблиця 1. Технічні характеристики преса гідравлічного ДА2238Б

| | |
|---|----------------|
| Розмір столу, мм | |
| зліва направо | 1400 |
| спереду назад | 1250 |
| Хід повзуна, мм | 800 |
| Номінальне зусилля преса, кН | 6300 |
| Номінальне зусилля нижнього поршня, кН | 1000 |
| Хід нижнього поршня, мм | 450 |
| Швидкість холостого ходу повзуна, мм/с | 125 |
| Швидкість робочого ходу повзуна, мм/с | 3,5 |
| Швидкість поворотного ходу повзуна, мм/с | 65 |
| Швидкість робочого ходу нижнього поршня, мм/с | 15 |
| Відстань між столом і повзуном, мм | 1600 |
| Потужність двигуна головного руху, кВт | 30,75 |
| Габарити верстата Д×Ш×В, мм | 4100×2330×5580 |
| Система управління | оператор |
| Маса, кг | 33500 |
| Рік випуску: | 1982 |



Рис. 2. Ручна система управління преса гідравлічного ДА2238Б

- розробити таблицю включень електроапаратів в напівавтоматичному режимі і параметрів гідроустаткування на етапах роботи "Виштовхувач", "Пресування", "Підпресовка";

- реалізувати 3 режими роботи преса: "Автоматичний", "Напівавтоматичний" і "Ручний";

- реалізувати 3 режими роботи за швидкістю: "Швидкий режим", "Повільний" і "Режим захисту";
- реалізувати сенсорне управління пресом з контролем наступних параметрів: мнемосхема (призначена для відображення інформації про роботу преса, настройки і налагодження) і панель оператора

(призначена для відображення: тиску пресування, температуру масла, поточний час, положення верхнього повзуна по датчику переміщення, вихідну позицію повзуна, швидкість опускання, номер деталі зі збереженими настройками ТП).

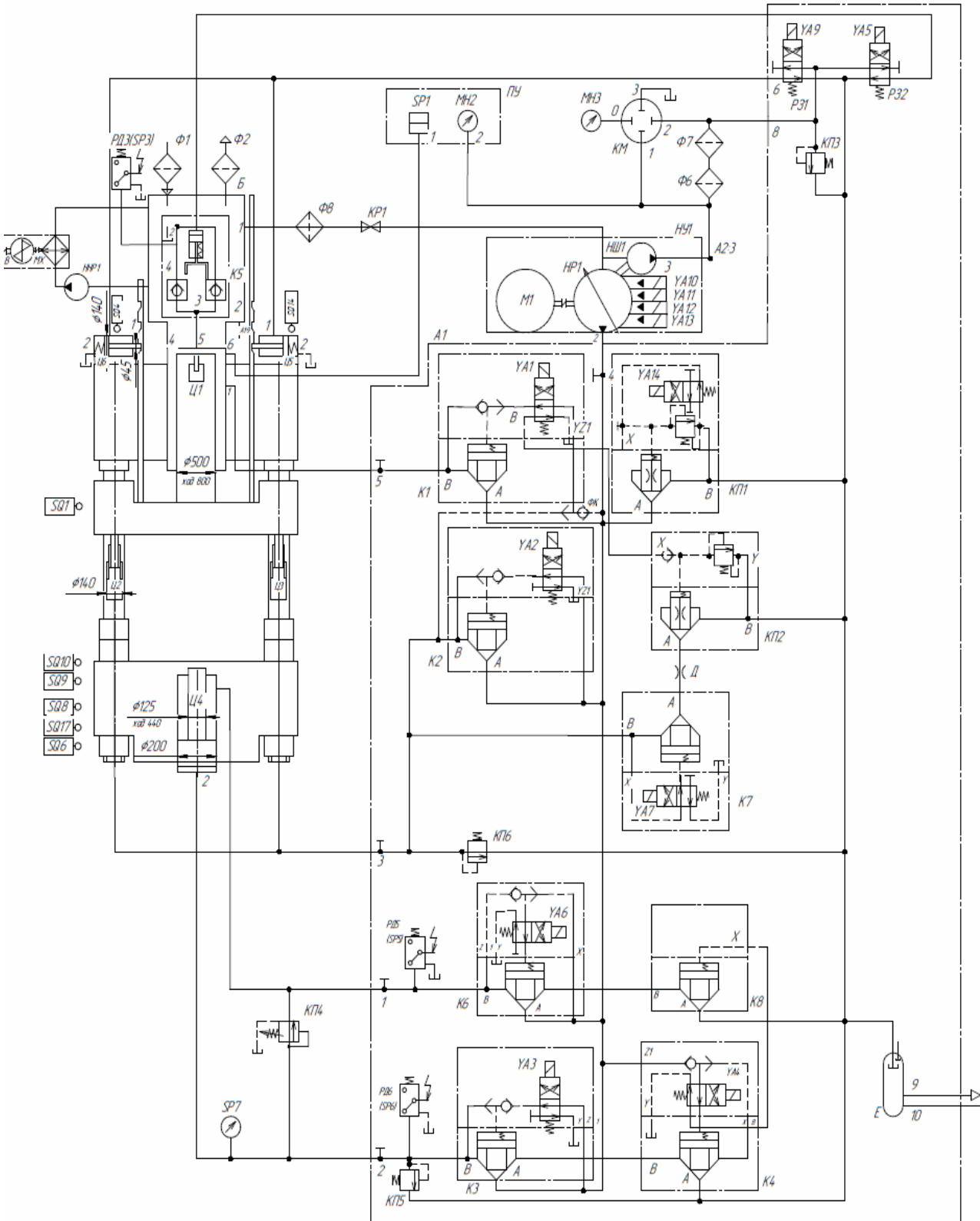


Рис. 3. Схема гідравлічна принципова преса ДА2238Б

Відповідно до поставлених підцелей реалізації автоматизації управління преса ДА2238Б необхідно розробити таблицю включень електроапаратів в напівавтоматичному режимі і параметрів

гідроустаткування на етапах роботи "Виштовхувач", "Пресування", "Підпресовки". Фрагмент таблиці представлений на рис. 4.

| Наименование операции | Электромагниты (У А) | | | | | | | | | | | | | | | | Эл. Двигатель | | Командоапараты | | Давление МПа |
|-------------------------------------|--|----------------|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------------|-------------------|----------------|-------|--------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 16 | М1 | М3 | Начало операции | Конец операции | | | |
| Исходное положение Отбой фиксаторов | | | | | | | | | | | | | | | X | | SQ1, SQ2 | | | | |
| Ускоренное смыкание прессы | | | | | X | | X | X | | | | | | | X | | SQ4, SQ14, SP3 | SQ2,2 | 2,5 | | |
| Подпрессовка | Замедленное смыкание прессы и подъем давления до 10МПа | X | | X | | X | X | X | | | | | X | | X | | SQ2,2 | SP11 | до 10 | | |
| | Подъем давления свыше 10МПа | X | | X | | X | X | X | | X | | | X | | X | | SP11 | SP13 | св 10 | | |
| | Выдержка | | | | | | X | X | | | | | | | X | | SP13 | KT1 | св 10 | | |
| | Подпитка | X | | X | | X | X | | | X | | X | | | X | | SP12 | SP13 | св 10 | | |
| | Сброс давления | | | | | X | | X | | | | | | | X | | KT1 | SP3 | 1 | | |
| | Размыкание замедленное | X | | X | | | | X | | X | | X | | | X | | SP3 | SQ2,3 | 2,6 | | |
| | Выдержка разомкнутого прессы | | | | | | | X | | | | | | | X | | SQ2,3 | KT2 | 2,6 | | |
| Прессование | Замедленное смыкание прессы и подъем давления до 10МПа | X | | X | | X | X | X | | | | | X | | X | | KT2, KC | SP11 | до 10 | | |
| | Подъем давления свыше 10МПа фиксация ползунка | X | | X | | X | X | X | | X | | | X | | X | | SP11 | SP15, SP16*, SP7* | 10,32 | | |
| | Выдержка | | | | | | X | | | | | | | | | | SP15 | KT3 | до 32 | | |
| | Подпитка | X | | X | | X | X | | | X | | X | | | X | | SP14 | SP15 | до 32 | | |
| | Пресс1 | Сброс давления | | | | | X | | | | | | | | | X | | KT3 | SP3 | 1 | |
| | | Сброс давления | | | | | | | | | | | | | X | X | | KT3 | SP13 | до 10 | |
| | Пресс2 | Выдержка | | | | | | X | | | | | | | | X | | SP13 | KT4 | св 10 | |
| | | Подпитка | X | | X | | X | | | | X | | X | | | X | | SP12 | SP13 | св 10 | |
| | | Сброс давления | | | | | X | | | | | | | | | X | | KT4 | SP3 | 1 | |
| | Размыкание замедленное | X | | X | | | | | | | X | | X | | | X | | SP3 | KT8 | 2,6 | |
| Размыкание ускоренное | X | | X | | | | | X | | | | X | | | X | | KT8 | SQ2,1 | 2,6 | | |

Рис. 4. Фрагмент таблиці включень електроапаратів в напівавтоматичному режимі і параметрів гідроустаткування преса ДА2238Б

2. Розробка АРМ оператора преса гідралічного ДА2238Б

За розробленими схемою гідравлічного принциповою (рис. 3) і таблицею включень електроапаратів в напівавтоматичному режимі і параметрів гідроустаткування преса ДА2238Б (рис. 4), було запропоновано наступне компонування автоматизованого робочого місця (АРМ) оператора

управління преса ДА2238Б, яка представлена на рис. 5 [14].

АРМ оператора управління преса ДА2238Б складається з чотирьох основних компонентів: 1 – манометр; 2 – дисплей індикації та мнемосхеми преса; 3 – сенсорна панель оператора; 4 – перемикачі та кнопки управління.



Рис. 5. АРМ оператора керування преса ДА2238Б

Манометр 1 (рис. 5) відображає робочий тиск управління гідроклапанами. Дисплей індикації та мнемосхеми преса 2 відображає уявну схему преса, індикацію роботи електророзподільних клапанів, кінцевих вимикачів, поточний стан верхнього повзуна і поршня, кінцевиків дверей, представлений на рисунку 6. Сенсорна панель оператора 3 призначена для відображення інформації про роботу преса, настройки і налагодження якої розроблялись з використанням програмного забезпечення "Система розробки кібернетичної складової для автоматизації процесів курування організаційно-технічним виробничим об'єктом", 4 панель перемикачів і кнопок управління пресом ДА2238Б в "Ручному" і "Напівавтоматичному" режимах.

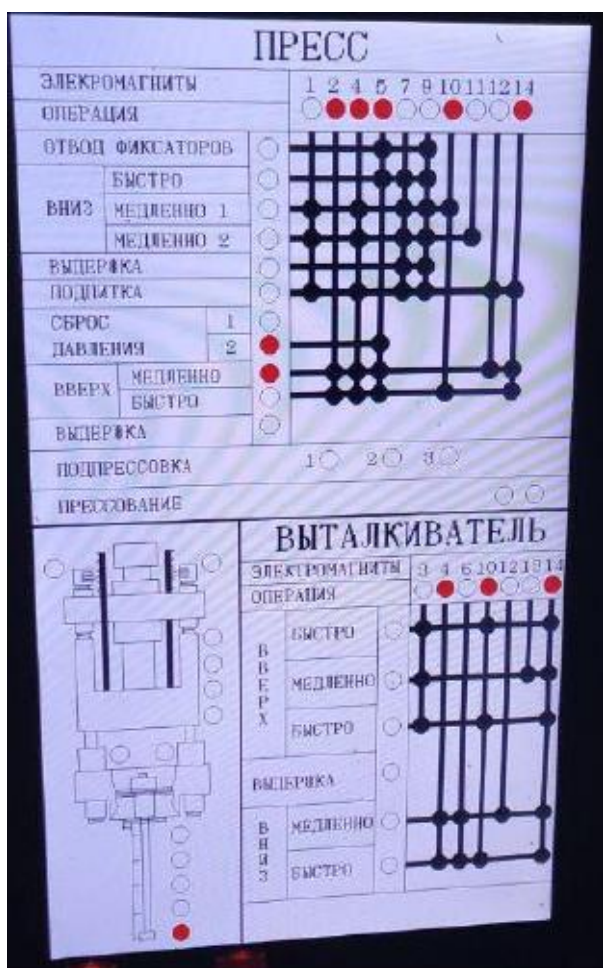


Рис. 6. Мнемосхема преса ДА2238Б

Відповідно до поставлених підцілей і завдань модернізації преса ДА2238Б, було запропоновано реалізувати сенсорне вікно оператора у вигляді 4 програмних форм ($Form_{PO}^{master}$, $Form_{tuning}^{slave}$, $Form_{param_de}^{slave}$ і $Form_{adjustment}^{slave}$), ґрунтуючись на запропонованому застосуванні інформації з сигнально-кодовою конструкцією [14].

На наступному етапі розробки сенсорної панелі оператора управління пресом ДА2238Б необхідно визначити розміщення GUI елементів. Для повного уявлення про обсяги необхідної і достатньої

інформації оператору, на головній формі $Form_{PO}^{master}$, було прийнято рішення відобразити наступну технологічну інформацію:

- тиск пресування;
- температура масла;
- поточний час і дата;
- положення верхнього повзуна по датчику преміщення;
- вихідну позицію повзуна;
- швидкість опускання повзуна;
- № деталі;
- кнопку переходу в настройки.

3. Розробка НМІ панелі оператора

Розробка НМІ панелі оператора проводилась відповідно розроблених моделей і методів в [10, 14]. Варто зауважити, що система управління пресом ДА2238Б реалізована на базі одноплатного комп'ютера LattePanda 4 GB / 64 GB, який підтримує Arduino-сумісний співпроцесор ATmega32u4, GPIO контакти для чипу Intel X-Z8300 і ATmega32u4, методи передачі інформації, як провідні 100 Mbps Ethernet так і бездротові Wi-Fi, Bluetooth 4.0. Структура модернізованого преса ДА2238Б на базі LattePanda 4/64 Gb представлена на рисунку 7.

Як можна бачити з рисунка 7 для модернізації системи управління пресом ДА2238Б, необхідно забезпечити контроль таких параметрів: тиск пресування (бар); час пресування (с); температура масла (0С); вихідна позиція повзуна (мм); час затримки фіксації повзуна (мс); тиск переходу повзуна на робочий хід (бар); максимальний тиск повзуна (бар); крайнє положення повзуна при пробиванні (мм); час витримки утримання (с); тиск підпресовки (бар); час підпресовки (с); час витримки поршня вгорі (с); мінімальний тиск підпресовки (бар); контроль розкриття повзуна (мм); час розмикання повзуна (мс). Для забезпечення роботи преса ДА2238Б використовуються 14 електромагнітних клапани, схема підключення, яких представлена на рис. 3, а таблиця включення режимів: "Виштовхувач", "Пресування", "Підпресовка" представлена на рис. 4.

Для контролю технологічних параметрів, в даному дослідженні були використані датчики:

- датчик температури TER8, який відповідає суворим вимогам гігієнічних стандартів, всі контактуючі частини захищені РЕЕК-конусом. Точність датчиків TER8 на рівні $<0,25$ °С. Компактне виконання корпусу під вузькі труби;

- датчик тиску MBS 3207, який підтримує інтерфейс CAN open, середовищ з температурою від 0°С до 125°С, що повністю відповідає вимогам до температурних режимів роботи преса ДА2238Б, з допустимою температурної компенсацією в діапазоні від 0 до 100 °С і діапазон вимірювань від 0 до 600 бар;

- лінійний датчик положення WDS-MP/MPW. Серія MPW (водонепроникна) передбачена спеціально для використання у важких умовах навколишнього середовища. Точність $+ \setminus - 0,5$ мм.

Для розробки кібернетичної складової системи управління пресом ДА2238Б був обраний

одноплатний комп'ютер LattePanda 4/64Gb на базі OS Windows 10. Обґрунтуванням цього вибору послужило те, що LattePanda 4/64 Gb реалізований на 4-х ядерному процесорі Intel Cherry Trail Z8350 з частотою 1,44 ГГц. Об'єм оперативної пам'яті 4 Gb DDR3L і з зовнішньою eMMC пам'яттю 64 Gb. Так само LattePanda 4/64 Gb повністю підтримує:

бездротовий інтерфейс Wi-Fi 802.11n 2.4G; Bluetooth 4.0 і Ethernet 100 Mbps. На платі реалізовані GPIO входи/виходи, які підтримують: GPIO процесора Intel x 6, GPIO контролера ATmega32U4 x 20, інтерфейсні роз'єми x 6, при цьому розмір плати 88 мм × 70 мм і вага 55 г.

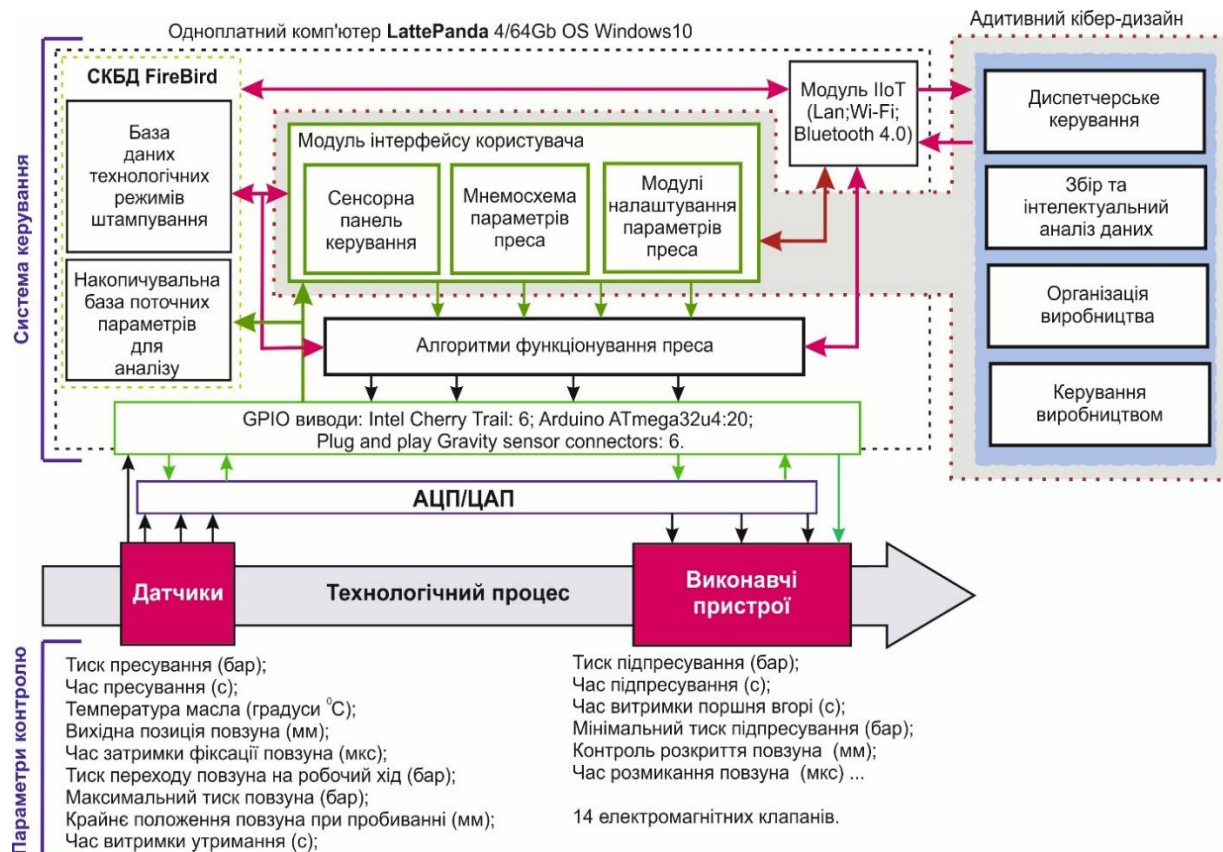


Рис. 7. Структура модернізованого преса DA2238B на базі LattePanda 4/64 Gb

Розроблений модуль перетворення АЦП/ЦАП дозволив підключити датчики до шини GPIO контролера ATmega32U4 на LattePanda 4/64Gb. На OS Windows 10 було розгорнуто сервер на базі СКБД FireBird, який містить дві бази даних: базу даних технологічних режимів штампування і накопичувальну базу даних поточних параметрів для аналізу, яка дозволяє проводити моніторинг і прогнозування зносу штампа.

Кібернетична система управління пресом DA2238B реалізована у вигляді клієнт-серверної архітектури з адитивним кібер-дизайном. На пульті керування пресом DA2238B виведені: сенсорна панель управління; мнемосхема параметрів преса і модулів налаштування. Віддалений доступ до управління і моніторингу здійснюється за допомогою реалізації віддаленого підключення до LattePanda 4/64 Gb через Wi-Fi мережу із зовнішнім виходом в мережу Internet. При цьому для віддаленого управління і моніторингу параметрами преса DA2238B використовується адитивний кібер-дизайн [15].

На базі запропонованих досліджень був розроблений гнучкий НМІ, який дозволив реалізувати доступ в режимі реального часу доступ для: диспетчерського

управління, збору та інтелектуального аналізу даних, організації виробництва і управління виробництвом, при цьому відповідність поточної технологічної інформації не має спотворення і достовірна для всіх зарезервованих користувачів. Дане рішення дозволяє адекватно представляти інформацію про стан обладнання і протікання технологічного процесу, оперативного втручання і коригування відхилення і похибок, розрахунок продуктивності і зносу штампа, що дає можливість забезпечити мінімальний простій обладнання при плановому ремонті. Провівши опис структури, на базі запропонованої в 5 розділі мови, були отримані наступні інтерфейси оператора: на рисунку 8 представлена конструкція головного вікна управління ($Form_{PO}^{master}$), на рис. 9 представлена конструкція вікна настройки ($Form_{tuning}^{slave}$) [10, 15].

Вікно ($Form_{tuning}^{slave}$) керування пресом DA2238B (рис. 9) призначене для налаштування основних параметрів преса. Тут можна змінювати і задати такі технологічні параметри:

- тиск пресування SP1.5, в барах;
- вихідну позицію повзуна SQ2.1 (вибір з чотирьох можливих варіантів);



Рис. 8. Конструкция главного окна управления ($Form_{PO}^{master}$) пресом DA2238B

- перехід на уповільнений хід SQ2.2, в міліметрах (при досягненні даного параметра повзун переходить на уповільнене опускання);
- висоту поршня SA5 (задається вибір від першого до четвертого кінцевого вимикача, при спрацьовуванні якого виштовхувач зупиниться);
- затримку фіксації кінцевих вимикачів поршня, в мілісекундах;
- дату і час;
- вибір номера деталі;
- режим введення параметрів деталі;
- кнопки повернення до "Основного вікна" і переходу в "Налагодження".

$Form_{param_de}^{slave}$ призначена для налагодження параметрів преса DA2238B. Для захисту від несанкціонованого доступу замовнику запропонований метод ідентифікації користувача за рахунок установки пароля. Вкладкою можуть користуватися лише сервісні інженери або налагодчики з боку замовника.

Конструкція вікна $Form_{param_de}^{slave}$ (рис. 10) містить GUI елементи для реалізації наступних функцій управління параметрами налагодження [15]:

- тиск переходу повзуна на робочий хід SP1.1, в барах (при досягненні зазначеного тиску – повзун з режиму тиску переходить на робочий хід);
- максимальний тиск повзуна SP1.6, в барах (при досягненні заданого значення – залишковий тиск повзуна буде скидатися);

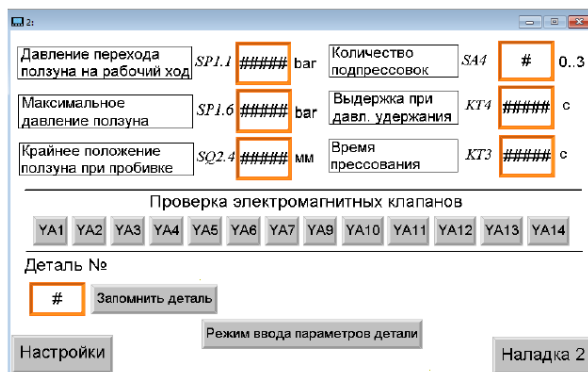


Рис. 10. Конструкция окна наладки ($Form_{param_de}^{slave}$)

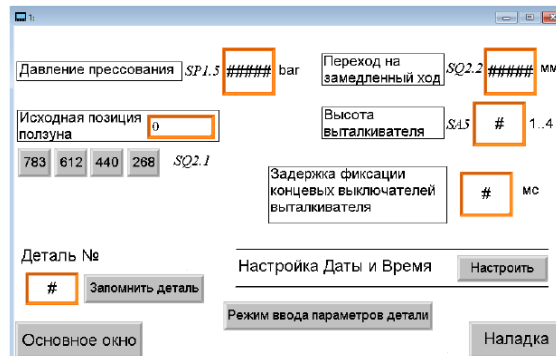


Рис. 9. Конструкция окна настройки ($Form_{tuning}^{slave}$)

- крайне положения повзуна при пробивании SQ2.4, в миллиметрах;
- количество подпрессовок SA4, від нуля до трьох;
- витримка при тиску утримання KT4, в секундах;
- час пресування KT3, в секундах;
- перевірка електромагнітних клапанів (дає можливість перевірити гідророзподільник кожного клапана окремо. При натисканні клапан спрацьовує, при повторному натисканні – вимикається);
- вибір деталі;
- режим введення параметрів деталі;
- кнопка "Налаштування" для повернення в попереднє вікно.

$Form_{adjustment}^{slave}$ призначена для настройки технологічних параметрів підпресовки і реалізує управління наступними параметрами:

- тиск підпресування SP1.3, в барах;
- час підпресування KT1, в секундах;
- час паузи підпресування KT2, в секундах;
- час витримки поршня вгору KT5, в секундах;
- прискорений хід поршня KT6, в секундах;
- мінімальний тиск підпресування SP1.2, в барах;
- мінімальний тиск пресування SP1.4, в барах;
- контроль розкриття SQ2.3, в міліметрах;
- опускання вниз поршня SA6;
- швидкість розмикання.

Розміщення GUI елементів на НМІ формі $Form_{adjustment}^{slave}$ представлено на рисунку 11.

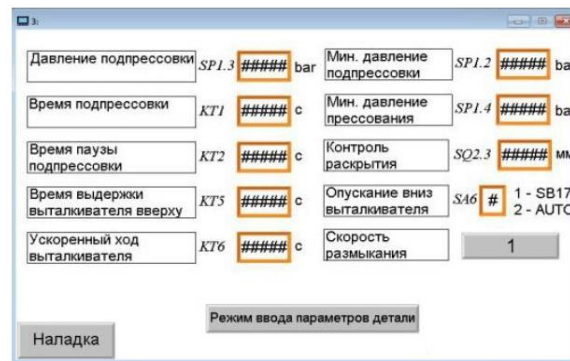


Рис. 11. Конструкция окна наладки $Form_{adjustment}^{slave}$

Отримані конструкції розроблених форм, на базі "Система розробки кібернетичної складової для автоматизації процесів курування організаційно-технічним виробничим об'єктом" [10], були впровадженні для управління преса ДА2238Б і представлені на рис. 8-11.

Результати дослідження та їх обговорення

Проводячи аналіз отриманих тимчасових тайменгів виконання поставленого завдання з модернізації гідравлічного преса ДА2238Б, на базі

розроблених моделей і методів і стандартних підходів (експериментальна розробка системи управління проводилась паралельно), були отримані наступні результати, представлені на рисунку 12.

Для зручності візуалізації отриманих даних [10], весь процес модернізації гідравлічного преса ДА2238Б згрупований в 4 етапи:

- постановка цілей і завдань;
- розробка фізичної складової;
- розробка кібернетичної складової;
- впровадження.

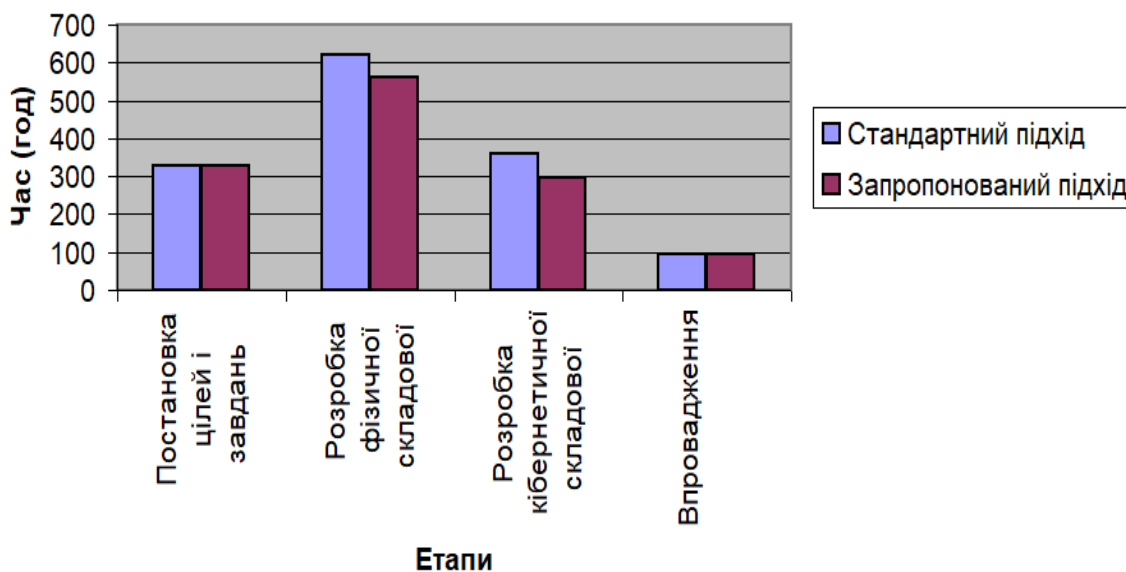


Рис. 12. Графік витрат часу на модернізацію гідравлічного преса ДА2238Б

з графіку (рис. 12) можна помітити, що застосування розроблених методів і моделей управління організаційно-технічним виробничим об'єктом на базі кібер-фізичних систем, дозволив скоротити витрати часу на етапі розробки фізичної складової, у порівнянні зі стандартним підходом, на 10,71 % і на 17,78 % на етапі розробки кібернетичної складової.

Варто зауважити, що результати кібернетичного етапу і частково фізичного, які були реалізовані на базі "Система розробки кібернетичної складової для автоматизації процесів керування організаційно-технічним виробничим об'єктом", були впроваджені у виробництво, що підтверджується відповідним актом впровадження ТОВ "НВП УКРІНТЕХ" від 23.10.2019 р.

Результати впровадження довели, що запропоновані методи та моделі, дозволили удосконалити процес керування та дозволили підвищити продуктивність на 1,2 % та ритмічність 1,8 % за місяць.

Висновки

У даній статті розглядаються питання модернізації застарілого обладнання. В ході досліджень автори провели аналіз публікацій в даному напрямку, який показав що модернізація є складним і трудомістким процесом, при цьому більш економічно вигідним на відміну від покупки нового обладнання. Для вирішення поставлених завдань з модернізації гідравлічного преса ДА2238Б, було прийнято рішення використовувати нові методи розробки інтерфейсу оператора на базі адитивного кібер-дизайну, в рамках кібер-фізичних виробничих систем. Для досягнення мети було запропоновано ряд рішень з розробки структури системи керування та інтерфейсу користувача. Правильність прийнятих рішень з модернізації обладнання доведено експериментально. Результати показали, що використання розробленої системи керування дозволило підвищити продуктивність на 1,2 % та ритмічність 1,8 % за місяць. Це підтверджує підвищення економічної ефективності виробництва.

Список літератури

1. Ляшук О. Л., Гевко Р. Б., Дзюра В. О. та ін. Створення та модернізація транспортно-технологічних механізмів машин і обладнання [Електронний ресурс] : монографія. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 167 с. ISBN 978-617-7331-96-3

2. Gnidenko, A., Sobolevsky, V., Potriasaev, S., Sokolov, B. (2019), "Methodology and integrated modeling technologies for synthesis of cyber-physical production systems modernization programs and plans", *IFAC-PapersOnLine*, No. 52 (13), P. 642–647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.305>
3. Zhilevski, M., Mikhov, M. (2018), "Performance Improvement of a Type of Turning Machines", *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*, Vol. 3, Issue 8, P. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejers.2018.3.8.871>
4. Platonov, V. V., Platonova, E. V. and Maizel, I. G. (2017), "Modernization of numerically controlled machine tools on modular principles", *Russian Engineering Research*, No. 37, pp. 140–143. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X17020150>
5. Mikhov, M., Zhilevski, M. (2021), "Study and Analysis of the Drive System for a Type of Milling Machines Aiming at Performance Improvement", *New Ideas Concerning Science and Technology*, Vol. 7, P. 31–43. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.9734/bpi/niest/v7/7254D>
6. Radu, R., Marian, B., Alexandru, H., Bogdan T. (2020), "Contributions to the modernization of fluid power field by integration of intelligent equipment", *Instytut Techniki Górniczej KOMAG*, Vol. 4, P. 39–47. DOI: <https://doi.org/doi.org/10.32056/KOMAG2020.4.5>
7. Frolov, A. V. (2021), "The Experience of the Portal Machine Control System Modernizing for Automatic Arc Welding and Surfacing in a Shielded Gas", *Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies*, No. 7, P. 622–631. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_66
8. Yakovenko, I., Permyakov, A., Naboka, O., Prihodko, O., Havryliuk, Y. (2020), "Parametric Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools", *DSMIE 2020: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*, Vol. 1, P. 85–93. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_9
9. Waśik, M., Lis, K., Lehigh, K. and Mucha, Ł. (2018), "Model-Based Dynamic Structural Modification of Machine Tools", *Shock and Vibration*, Vol. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3469171>
10. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Demska, N., Novoselov, S. (2020), "Development of a software module for operational dispatch control of production based on cyber-physical control systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 155–168. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.155>
11. Osadchy, S., Demska, N., Oleksandrov, Y., Nevliudova, V. (2021), "Research of DIKW and 5C architectural models for creation of cyber-physical production systems within the concept of Industry 4.0", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.132>
12. Zakoldaev, D. A., Shukalov, A. V., Zharinov, I. O., Zharinov, O. O. (2019), "Modernization stages of the Industry 3.0 company and projection route for the Industry 4.0 virtual factory", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 537, Issue 3, P. 538–541. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032005>
13. Pančík, J., Beneš, V. (2019), "IoT Challenge: Older Test Machines Modernization in an Automotive Plant", *Smart Technology Trends in Industrial and Business Management*, P. 85–100. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-76998-1_7
14. Євсєєв В. В. Методи та моделі кібер-фізичного керування процесами в організаційно-технічних виробничих об'єктах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 "Автоматизація процесів керування"; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2021. 45 с. URL: <https://openarchive.nure.ua/handle/document/16097>
15. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Ahmad, M. A. (2021), "GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development", *Advances in Dynamical Systems and Applications*, No. 16 (2), P. 441–455. URL: <https://www.ripublication.com/adsa21/v16n2p04.pdf>

References

1. Liashuk, O. L., Hevko, R. B., Dziura, V. O. (2019), *The development and modernization of transport and technological mechanisms of machines and possession [Stvorennia ta modernizatsiia transportno-tekhnologichnykh mekhanizmiv mashyn i obladannia]*: Monograph, Ternopil, TNTU, 167 p. ISBN 978-617-7331-96-3
2. Gnidenko, A., Sobolevsky, V., Potriasaev, S., Sokolov, B. (2019), "Methodology and integrated modeling technologies for synthesis of cyber-physical production systems modernization programs and plans", *IFAC-PapersOnLine*, No. 52 (13), P. 642–647. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.305>
3. Zhilevski, M., Mikhov, M. (2018), "Performance Improvement of a Type of Turning Machines", *EJERS, European Journal of Engineering Research and Science*, Vol. 3, Issue 8, P. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.24018/ejers.2018.3.8.871>
4. Platonov, V. V., Platonova, E. V., Maizel, I. G. (2017), "Modernization of numerically controlled machine tools on modular principles", *Russian Engineering Research*, No. 37, P. 140–143. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X17020150>
5. Mikhov, M., Zhilevski, M. (2021), "Study and Analysis of the Drive System for a Type of Milling Machines Aiming at Performance Improvement", *New Ideas Concerning Science and Technology*, Vol. 7, P. 31–43. DOI: <https://doi.org/10.9734/bpi/niest/v7/7254D>
6. Radu, R., Marian, B., Alexandru, H., Bogdan, T. (2020), "Contributions to the modernization of fluid power field by integration of intelligent equipment", *Instytut Techniki Górniczej KOMAG*, Vol. 4, P. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.32056/KOMAG2020.4.5>
7. Frolov, A. V. (2021), "The Experience of the Portal Machine Control System Modernizing for Automatic Arc Welding and Surfacing in a Shielded Gas", *Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies*, No. 7, P. 622–631. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0_66

8. Yakovenko, I., Permyakov, A., Naboka, O., Prihodko, O., Havryliuk, Y. (2020), "Parametric Optimization of Technological Layout of Modular Machine Tools", *DSMIE 2020: Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*, Vol. 1, P. 85–93. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-50794-7_9
9. Wąsik, M., Lis, K., Lehrich, K., Mucha, Ł. (2018), "Model-Based Dynamic Structural Modification of Machine Tools", *Shock and Vibration*, Vol. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3469171>
10. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Demaska, N., Novoselov, S. (2020), "Development of a software module for operational dispatch control of production based on cyber-physical control systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (14), P. 155–168. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.155>
11. Osadchy, S., Demaska, N., Oleksandrov, Y., Nevliudova, V. (2021), "Research of DIKW and 5C architectural models for creation of cyber-physical production systems within the concept of Industry 4.0", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 1 (15), P. 132–140. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.132>
12. Zakoldaev, D. A., Shukalov, A. V., Zharinov, I. O., Zharinov, O. O. (2019), "Modernization stages of the Industry 3.0 company and projection route for the Industry 4.0 virtual factory", *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 537, Issue 3, P. 538–541. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032005>
13. Pančík, J., Beneš, V. (2019), "IoT Challenge: Older Test Machines Modernization in an Automotive Plant", *Smart Technology Trends in Industrial and Business Management*, P. 85–100. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-76998-1_7
14. Yevsieiev, V. V. (2021), "Methods and models of cyber-physical process control in organizational and technical production facilities" ["Metody ta modeli kiber-fizychnoho keruvannya protsesamy v orhanizatsiino-tekhnichnykh vyrobnychkykh ob'ektakh"]: avtoref. dis. ... Dr. Tech. Sciences, Kharkiv, NURE, 45 p., available at : <https://openarchive.nure.ua/handle/document/16097>
15. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Ahmad, M. A. (2021), "GUI Elements and Windows Form Formalization Parameters and Events Method to Automate the Process of Additive Cyber-Design CPPS Development", *Advances in Dynamical Systems and Applications*, No. 16 (2), P. 441–455, available at : <https://www.ripublication.com/adsa21/v16n2p04.pdf>

Надійшла (Received) 28.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Невлиудов Ігор Шакирович – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: igor.nevliudov@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>.

Невлиудов Игорь Шакирович – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Nevliudov Igor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Head of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Євссєєв Владислав В'ячеславович – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: vladyslav.yevsieiev@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2590-7085>.

Евсеев Владислав Вячеславович – доктор технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Yevsieiev Vladyslav – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Демська Наталія Павлівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: demaska.nataliia@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9931-9964>.

Демская Наталья Павловна – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Demaska Nataliia – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

Стародубцев Микола Григорович – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки, Харків, Україна; email: nikolaj.starodubcev@nure.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7856-5771>.

Стародубцев Николай Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры компьютерно-интегрированных технологий, автоматизации и мехатроники, Харьков, Украина.

Starodubcev Nikolaj – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, Kharkiv National University of Radio Electronics, Associate Professor of the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Mechatronics, Kharkiv, Ukraine.

РЕШЕНИЕ ВОПРОСА МОДЕРНИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Постоянное совершенствование парка технологического оборудования, в условиях существующего производства, является сложной задачей, при решении которой необходимо учитывать много параметров, таких как механизация, автоматизация и применение новых технологий в рамках концепции Industry 4.0. Одним из эффективных методов повышения технико-экономических показателей и надежности производства является модернизация существующего технологического оснащения, которая основывается на необходимости использования современных методов разработки и внедрения информационных технологий, таких как Industrial Internet of Things, кибер-физических производственных систем. **Предметом** данного исследования является апробация методов разработки аддитивного кибер-дизайна для автоматизации сложного промышленного оборудования. **Целью** данной статьи является разработка кибер-физической производственной системы управления, для модернизации прессы гидравлического DA2238B. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**: провести анализ технических характеристик и системы управления прессы гидравлического DA2238B; провести исследование схемы гидравлической принципиальной на базе которой выбрать датчики и исполнительные механизмы, а также режимы работы; разработать схему включения гидро-оборудования; разработать автоматизированную систему управления на базе современного одноплатного компьютера и разработать интуитивно понятный аддитивный кибер-дизайн интерфейса оператора; провести экспериментальные исследования. **Выводы**: в результате исследований была разработана структурная схема и реализована автоматизированная система управления на базе LattePanda. Выбраны датчики давления и температуры для контроля процессов прессования, что позволило обеспечить точное соответствие требованиям технологического процесса. Разработано автоматизированное рабочее место оператора, в котором реализовано сенсорное управление на базе аддитивного кибер-дизайна. Разработанная система управления обеспечивает: сбор и анализ производственных данных, на базе которых можно усовершенствовать технологию производства и обеспечить прогнозирование достижения "Lean Manufacturing".

Ключевые слова: Industry 4.0; Smart Manufacturing; кибер-физические производственные системы; аддитивный кибер-дизайн; модернизация.

SOLVING THE ISSUE OF MODERNIZATION OF PRODUCTION EQUIPMENT USING CYBER-PHYSICAL MANUFACTURING CONTROL SYSTEMS

Continuous improvement of the fleet of technological equipment, in the conditions of existing production, is a difficult task, the solution of which must take into account many parameters, such as mechanization, automation and application of new technologies within the concept of Industry 4.0. One of the effective methods of improving the technical and economic indicators and reliability of production is the modernization of existing technological equipment, which is based on the need to use modern methods of development and implementation of information technology, such as Industrial Internet of Things, cyber-physical production systems. The **subject** of this study is the testing of methods for developing additive cyber design for automation of complex industrial equipment. The **goal** of this article is to develop a cyber-physical production control system for the modernization of the DA2238B hydraulic press. To achieve this goal it is necessary to solve the following **tasks**: to analyze the technical characteristics and control system of the hydraulic press DA2238B; to carry out research of the scheme of hydraulic basic and, taking it into account, to choose sensors and executive mechanisms, and also operating modes; to develop the scheme of inclusion of the hydro equipment; to develop an automated control system based on a modern single-board computer and to develop an intuitive additive cyber-design of the operator interface; to conduct experimental research. **Conclusions**: as a result of research, a block diagram was developed and an automated control system based on LattePanda was implemented. Selected pressure and temperature sensors for control of pressing processes, which allowed to ensure accurate compliance with the requirements of the technological process. An automated operator's workplace has been developed, in which touch control based on additive cyber-design has been implemented. The developed control system provides: collection and analysis of production data on the basis of which it is possible to improve production technology and to provide forecasting of achievement "Lean Manufacturing".

Keywords: Industry 4.0; Smart Manufacturing; cyber-physical production systems; additive cyber design; modernization.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Невлюдов І. Ш., Євсєєв В. В., Демська Н. П., Стародубцев М. Г. Вирішення питання модернізації виробничого обладнання з використанням кібер-фізичних виробничих системи керування. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 106–116. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.106>

Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Demska, N., Starodubcev, N. (2021), "Solving the issue of modernization of production equipment using cyber-physical manufacturing control systems", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 106–116. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.106>

A. SAVRANSKA, O. DENISENKO

CONSTRUCTION OF STABILITY AREAS FOR CONTROLLED SYSTEMS WITH PARAMETRIC AND DYNAMIC UNCERTAINTY

The **subject** of research in the article is singularly perturbed controllable systems of differential equations containing terms with a small parameters on the right-hand side, which are not completely known, but only satisfy some constraints. The **aim** of the work is to expand the study of the behavior of solutions of singularly perturbed systems of differential equations to the case when the system is influenced not only by dynamic (small factor at the derivative) but also parametric (small factor at the right side of equations) uncertainties and to determine conditions under which such systems will be asymptotically resistant to any perturbations, estimate the upper limit of the small parameter, so that for all values of this parameter less than the obtained estimate, the undisturbed solution of the system was asymptotically stable. The following **problems** are solved in the article: singularly perturbed systems of differential equations with regular perturbations in the form of terms with a small parameter in the right-hand sides, which are not fully known, are investigated; an estimate is made of the areas of asymptotic stability of the unperturbed solution of such systems, that is, the class of systems that can be investigated for stability is expanded, the formulas obtained that allow one to analyze the asymptotic stability of solutions to systems even under conditions of incomplete information about the perturbations acting on them. The following **methods** are used: mathematical modeling of complex control systems; vector Lyapunov functions investigation of asymptotic stability of solutions of systems of differential equations. The following **results** were obtained: an estimate was made for the upper bound of a small parameter for singularly perturbed systems of differential equations with fully known parametric (fully known) and dynamic uncertainties, such that for all values of this parameter less than the obtained estimate, such an unperturbed solution is asymptotically stable; a theorem is proved in which sufficient conditions for the uniform asymptotic stability of such a system are formulated. **Conclusions:** the method of vector Lyapunov functions extends to the class of singularly perturbed systems of differential equations with a small factor in the right-hand sides, which are not completely known, but only satisfy certain constraints.

Keywords: asymptotic stability; Lyapunov vector functions; parametric uncertainty; small parameter.

Introduction

Most control systems are largely uncertain. Uncertainties significantly affect the performance of control systems and can lead to its loss. In this regard, a very important task in the study of the efficiency of control systems is the task of studying the stability of their movement. A control system is called coarse with respect to some of its properties, if sufficiently small deviations of parameters in the equations of motion of such a system do not lead to the loss of this property. In practice, the uncertainties (possible deviations of the parameters of the system under study) can be so large that it leads to a loss of stability.

When studying the properties of solutions of differential equations describing control systems, one of the most important tasks is to study different types of stability. First of all, this is due to the fact that in most technical problems, stable solutions are the most interesting. Second, when developing control systems, it is necessary to be aware of unstable solutions in order to avoid them. Third, the solutions can be quite sensitive to errors in the mathematical model of the control system.

In the classic setting of A.M. Lyapunov, problems with stability of motion are considered only perturbations of the initial conditions. However, practical problems lead to the need to study the dynamics of systems in the presence of perturbation of the right parts.

Most often, perturbations of the right parts (uncertainty) are formed in the form of a vector of uncertainty, which contains components due to uncertainties:

- coefficients of equations of motion,
- initial conditions,
- boundary conditions,

- undesirable for nonlinearity control systems,
- external influences.

In many cases, the influence of these factors (uncertainties), although they seem insignificant, can significantly change that information about the process. To avoid this, you need to develop an extended process model that takes into account those small factors that were not represented in the original model, and then explore the similarity of the solutions obtained from the simplified and extended models.

Analysis of the problem and existing methods

The problem of studying the stability of singularly perturbed equations is far from complete. Intensive development of the theory of singular perturbations began in the middle of the 20th century, thanks to the work of A.N. Tikhonov [1], which describes the formulation of the problem of the theory of singularly perturbed systems of differential equations. This theory was further developed in the works of Vasilieva A.B., Butuzova V.F. [2], Hoppensteadt F. [3], which investigates the behavior of solutions singularly of such systems. Methods of singular perturbations are widely studied in our time. In particular, in the works of Kachalov V.I. [4], [5] the method of obtaining solutions of singularly perturbed problems in the form of series that coincide in the usual sense by degrees of small parameter is presented. Works [6], [7] are devoted to the construction of an asymptotic schedule of singularly perturbed equations with singular points.

Singular perturbations are present in many classical and modern control systems based on low-order systems and those that ignore parasitic dynamics. This led to the development of methods of separation of movements. These methods have been found to be useful for high-gain

feedback analysis and low-order models. These methods are used to model and control dynamic systems and certain classes of large-scale systems. In the works of Binning H.S., Goodell D.P. [8], Kodra K.; Gajic Z. [9] and Y. Li, Y.Y. Wang, D. Y. Yao [10] consider singularly perturbed control systems and investigate the behavior of their movements. The work of H. S. Liu, Y. Huang [11] is devoted to the study of the behavior of the trajectories of the manipulator robot, whose movements are described by means of singularly perturbed control systems. [12], [13] study the existing methods of the theory of singular perturbations extend to the class of controlled systems, on the right part of which parametric, not completely known perturbations additionally act.

[14], [15] are devoted to the study of the asymptotic stability of solutions of singularly perturbed systems of differential equations. The problems considered in these works are formulated for a class of singularly perturbed systems, which do not take into account external perturbations and uncertainties acting on the system. In addition, these works use special Lyapunov functions to study stability, which are suitable for studying the stability of solutions of equations of a particular class and usually cannot be applied to other types of equations. Meanwhile, the practice of automatic control requires the development of methods for studying the stability of motion for a wide class of control systems, which are described using nonlinear singularly perturbed systems of differential equations with incompletely known right-hand sides. In [16], [17], the study of the asymptotic stability of solutions of singularly perturbed systems of differential equations extends to the class of systems with parametric uncertainty.

When studying the behavior of control system solutions, it is important not only to investigate the stability of these solutions, but also to estimate the size of their areas of gravity, ie to conduct a large-scale study of stability. Due to the effects of perturbations on the control system in many cases it is impossible to ensure asymptotic stability of program movements. Therefore, the size of the program traffic around the state space, which is guaranteed to include solutions, is important.

The **aim** of this article is to estimate the region of gravity of solutions of singularly perturbed systems of differential equations with parametric (small factor in the right part of equations) and dynamic (small factor in the derivative) uncertainties, finding the upper limit of a small parameter such that for all values of this parameter than the obtained estimate, the undisturbed solution of a singularly perturbed system of differential equations is asymptotically stable. This problem is solved using Lyapunov vector functions. A theorem is proved in which sufficient conditions for uniform asymptotic stability of solutions of such a system are formulated.

The practical value is that the class of systems that can be tested for stability is expanding. Necessary researches are made and the formulas allowing to analyze stability of systems even at the conditions of the incomplete information on disturbances operating on them are received.

Task solving

Let's consider a system of differential equations

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, z, t) + \varepsilon f_1(x, z, t) \\ \varepsilon \dot{z} &= g(x, z, t) + \varepsilon g_1(x, z, t) \end{aligned} \quad (1)$$

where f and $f_1 - n$ -measurable vector functions, g and $g_1 - m$ -measurable vector functions, $\varepsilon -$ small parameter, $\varepsilon > 0$, f_1 and g_1 unknown and satisfy only some of the limitations discussed below. Members $\varepsilon f_1(x, z, t)$ and $\varepsilon g_1(x, z, t)$ make up *the parametric uncertainty* of the system, the second equation of the system (1) contains a small parameter when the derivative determines *the dynamic uncertainty*.

We set the initial conditions:

$$z(0, \varepsilon) = z^0, \quad (2)$$

$$x(0, \varepsilon) = x^0. \quad (3)$$

Let's explore the solution $(x(t, \varepsilon), z(t, \varepsilon))$ of tasks (1) - (3) on the interval $0 \leq t \leq T$. If we put in (1) $\varepsilon = 0$, we get the system

$$\dot{x}^s = f(x^s, z^s, t), \quad (4)$$

$$0 = g(x^s, z^s, t), \quad (5)$$

which in the terminology of A.N. Tikhonov is called a *degenerate system*?

The order of the system (4) - (5) is equal to n , ie is lower than the order of the original system. For the system (4) - (5) a smaller number of initial conditions is given, namely

$$x^s(0) = x^0. \quad (6)$$

Let's solve equation (5) with regard to $z^s(t)$, if such an operation is possible.

$$z^s = \phi(x^s, t). \quad (7)$$

Due to the nonlinearity of the function $g(x^s, z^s, t)$, this operation is ambiguous and the choice of solution arises.

Substitution (7) in (3) gives

$$\dot{x}^s = f(x^s, \phi(x^s, t), t), \quad (8)$$

$$x^s(0) = x^0, \quad (9)$$

$z^s = \phi(x^s, t)$, generally does not satisfy the initial condition (2) for z , that is, $z^s(0) \neq z^0$, and therefore, in some vicinity of the starting point $t = 0$, the solution $z^s(t)$ of the degenerate system will not be close to the solution $z(x, t)$ of the original system (1).

Let's enter a new variable

$$\eta = z - \phi(x, t). \quad (10)$$

Let the following conditions be met:

a) Functions $f(x, z, t)$ and $g(x, z, t)$ are continuous and satisfy the Lipschitz condition by x and z in some region G of the space of variables (x, z, t) , i.e. for some positive N_1, N_2, N_3, N_4 inequalities are performed

$$\|f(x, z, t) - f(\tilde{x}, z, t)\| \leq N_1 \|x - \tilde{x}\|, \quad (11)$$

$$\|f(x, z, t) - f(x, \tilde{z}, t)\| \leq N_2 \|z - \tilde{z}\|, \quad (12)$$

$$\|g(x, z, t) - g(\tilde{x}, z, t)\| \leq N_3 \|x - \tilde{x}\|, \quad (13)$$

$$\|g(x, z, t) - g(x, \tilde{z}, t)\| \leq N_4 \|z - \tilde{z}\|, \quad (14)$$

where $\|y\| = \sqrt{y_1^2 + y_2^2 + \dots + y_n^2}$ - Euclidean norm.

b) Solution (3.6) has in some closed area \bar{D} such properties:

- 1) $\phi(x^s, t)$ - continuous function in \bar{D} ,
- 2) $(x^s, \phi(x^s, t), t) \in G$ for all $(x^s, t) \in \bar{D}$.

3) The root $z^s = \phi(x^s, t)$ is isolated in \bar{D} , that is, there is $\lambda > 0$ such that $g(x^s, z^s, t) \neq 0$ when $\|z^s - \phi(x^s, t)\| < \lambda$, $(x^s, t) \in \bar{D}$.

c) The system (8), (9) has a single solution $x^s(t)$ on the interval $0 \leq t \leq T$, besides in this interval the point $(x^s, t) \in D$ where D is the set of inner points \bar{D} . In addition, suppose that $f(x^s, \phi(x^s, t), t)$ satisfies the Lipschitz condition at $x^s \in \bar{D}$.

That is, there is such a constant $L > 0$ that for any y_1 and y_2 , the inequality is performed

$$\|f(x, y_1, t) - f(x, y_2, t)\| \leq L \|y_1 - y_2\|.$$

Let's now introduce a connected system

$$\frac{d\tilde{z}}{d\tau} = g(x^s, \tilde{z}, t) \Big|_{t=\tau\epsilon}. \quad (15)$$

In which x^s and t are considered as parameters, $\tau = \epsilon^{-1}t$ (stretched time).

Obviously $\tau \geq 0$. According to condition b) 3, $\tilde{z}(\tau) = \phi(x^s, t)$ is an isolated resting point of the system (15) at $(x^s, t) \in \bar{D}$.

Also, let

d) The resting point $\tilde{z}(\tau) = \phi(x^s, t)$ of the system (15) is asymptotically stable according to Lyapunov even in regard to $(x^s, t) \in \bar{D}$. This means that $\forall \mu > 0$. $\exists \bar{\delta}(\mu) > 0$ (common to all $(x^s, t) \in \bar{D}$, such that for all solutions $\tilde{z}(\tau)$ of the equation (15) for which

$$\|\tilde{z}(\tau) - \phi(x^s, t)\| < \mu, \quad (x^s, t) \in \bar{D}.$$

At $\tau \geq 0$ i $\tilde{z}(\tau) \rightarrow \phi(x^s, t)$ when $\tau \rightarrow \infty$.

Let's consider a connected system (15) when $x^s = x^0$, $t = 0$:

$$\frac{d\tilde{z}}{d\tau} = g(x^0, \tilde{z}, t) \quad (16)$$

with the initial condition

$$\tilde{z}(0) = z^0. \quad (17)$$

Since the initial value z^0 , in general, is not close to the resting point $\phi(x^0, 0)$, the solution $\tilde{z}(\tau)$ of the task (16), (17) may not go to $\phi(x^0, 0)$ when $\tau \rightarrow \infty$.

Let

e) The solution $\tilde{z}(\tau)$ problems (16) with initial conditions (17) satisfies the conditions

1. $\lim_{n \rightarrow \infty} \tilde{z}(\tau) = \phi(x^0, 0)$,
2. point $(x^0, \tilde{z}(\tau), t) \notin G$, when $\tau \geq 0$.

f) Functions $f_1(x, z, t)$, $g_1(x, z, t)$ are continuous and satisfy the Lipschitz conditions by variables x and z , but there are summarized functions $M_1(t)$ and $M_2(t)$ with constants M_1^0 and M_2^0 such that in n area G there is inequality

$$\|f_1(x, z, t)\| \leq M_1, \quad \|g_1(x, z, t)\| \leq M_2, \quad (18)$$

$$\int_0^T M_1(t) dt \leq M_1^0 T, \quad \int_0^T M_2(t) dt \leq M_2^0 T. \quad (19)$$

Theorem. Let the following assumptions be fulfilled:

a) For systems (4) and (16) there are positively defined Lyapunov functions $V(x, t)$ and $W(x, z, t)$, accordingly, satisfying estimates that are peculiar to quadratic forms, such that

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(x^s, \phi(x^s, t), t) \leq -\alpha_1 \psi^2(x), \quad (20)$$

$$\frac{\partial W}{\partial z} g(x, \tilde{z}, t) \leq -\alpha_2 \theta^2(\eta), \quad (21)$$

where $\psi(x)$ and $\theta(\eta)$ - functions that are zero at point 0 and different from zero for other argument values.

b) Interconnection conditions $V(x, t)$ and $W(x, z, t)$ satisfy inequalities

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(x, z, t) \leq c \psi(x) \theta(\eta), \quad (22)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} (f(x, z, t) - f(x^s, \phi(x^s, t), t)) \leq \beta \psi(x) \theta(\eta), \quad (23)$$

$$\frac{\partial W}{\partial z} (g(x, z, t) - g(x, \tilde{z}, t)) \leq \varepsilon k \psi(x) \theta(\eta), \quad (24)$$

$$\frac{\partial V}{\partial x} f_1(x, z, t) \leq \gamma_1 \psi^2(x), \quad (25)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} f_1(x, z, t) \leq \gamma_2 \psi^2(x), \quad (26)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial z} g_1(x, z, t) \leq c \psi(x) \theta(\eta), \quad (27)$$

where $c, \beta, k, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – positive constants.

Then for any $0 < d < 1$ linear combination

$$U(x, z, t) = (1-d)V(x, t) + dW(x, z, t) \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \frac{dU(x, z, t)}{dt} = & (1-d) \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(x, z, t) + \frac{\partial V}{\partial x} \varepsilon f_1(x, z, t) \right) + \\ & + d \left(\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial x} f(x, z, t) + \frac{\partial W}{\partial x} \varepsilon f_1(x, z, t) + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial W}{\partial z} g(x, z, t) + \frac{\partial W}{\partial z} g_1(x, z, t) \right). \end{aligned}$$

Let's convert an expression to a view that allows to apply inequalities (20), (27):

From the above inequalities we get

$$\begin{aligned} \frac{dU(x, z, t)}{dt} = & (1-d) \left(\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} f(x^s, \phi(x^s, t), t) + \right. \\ & + \frac{\partial V}{\partial x} (f(x, z, t) - f(x^s, \phi(x^s, t), t)) + \frac{\partial V}{\partial x} \varepsilon f_1(x, z, t) \left. \right) + \\ & + d \left(\frac{\partial W}{\partial t} + \frac{\partial W}{\partial x} f(x, z, t) + \frac{\partial W}{\partial x} \varepsilon f_1(x, z, t) + \right. \\ & + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial W}{\partial z} (g(x, z, t) - g(x, \tilde{z}, t) + g(x, \tilde{z}, t)) + \frac{\partial W}{\partial z} g_1(x, z, t) \left. \right). \end{aligned} \quad (30)$$

From the above inequalities we get

$$\begin{aligned} \frac{dU(x, z, t)}{dt} \leq & -(1-d) \alpha_1 \psi^2(x) - \frac{d}{\varepsilon} \alpha_2 \theta^2(\eta) + d c \psi(x) \theta(\eta) + \\ & + (1-d) \beta \psi(x) \theta(\eta) + d k \psi(x) \theta(\eta) + \varepsilon (1-d) \gamma_1 \psi^2(x) + \\ & + \varepsilon d \gamma_2 \psi^2(x) + d \gamma_3 \psi(x) \theta(\eta) = \\ = & - \begin{pmatrix} \psi(x) \\ \theta(\eta) \end{pmatrix}^T T \begin{pmatrix} \psi(x) \\ \theta(\eta) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (31)$$

where

$$T = \begin{pmatrix} (1-d) \alpha_1 - \varepsilon (1-d) \gamma_1 - \varepsilon d \gamma_2 & -\frac{(1-d) \beta + d(c+k+\gamma_3)}{2} \\ -\frac{(1-d) \beta + d(c+k+\gamma_3)}{2} & \frac{d}{\varepsilon} \alpha_2 \end{pmatrix}. \quad (32)$$

For negative certainty \dot{U} , it is necessary that the matrix T be positively defined. We will demand that

$$(1-d) \alpha_1 - \varepsilon (1-d) \gamma_1 - \varepsilon d \gamma_2 > 0 \quad (33)$$

and

$$\det T > 0. \quad (34)$$

is a Lyapunov function of the system (1) and exists

$$\varepsilon^*(d) = \frac{\alpha_1}{\gamma_1 + \frac{d}{1-d} \gamma_2 + \frac{((1-d)\beta + d(c+k+\gamma_3))^2}{4d(1-d)\alpha_2}} \quad (29)$$

such that for all $\varepsilon < \varepsilon^*(d)$ the solution $x = x^s(t)$, $\eta = 0$ at the system (1) is resistant to constant disturbances.

Proof. The complete derivative of the function (28) in time along the trajectory is

From the inequality (33) it follows that

$$\varepsilon < \varepsilon_1(d) = \frac{\alpha_1}{\gamma_1 + \frac{d}{1-d} \gamma_2}. \quad (35)$$

From (35)

$$\varepsilon < \varepsilon_2(d) = \frac{\alpha_1}{\gamma_1 + \frac{d}{1-d} \gamma_2 + \frac{((1-d)\beta + d(c+k+\gamma_3))^2}{4d(1-d)\alpha_2}}. \quad (36)$$

Obviously, $\varepsilon_1 < \varepsilon_2 = \varepsilon^*(d)$. Thus, for all $\varepsilon < \varepsilon^*(d)$ matrix T positively defined, as a result of which the derivative $\dot{U}(x, z, t)$ is negatively defined. In addition,

$\dot{U}(x, z, t)$ contains a term with a factor $\frac{1}{\varepsilon}$:

$\frac{1}{\varepsilon} \frac{dW}{dz} g(x, \tilde{z}, t)$, which in force (21) increases unlimitedly

when $\varepsilon \rightarrow 0$, respectively negative derivative $\dot{U}(x, z, t)$ increases in absolute value. Hence the function $U(x, z, t)$, remaining negative, rapidly decreasing in magnitude and solving problems (4) and (16) in a short period of time approaching the origin, remaining in a small neighborhood of this point. This proves that an undrilled solution is resistant to perturbations that operate continuously.

Conclusions

In this work the following has been done:

- A method for studying the asymptotic stability of solutions of a singularly perturbed system of differential equations based on the use of Lyapunov vector functions that satisfy the estimates inherent in quadratic forms is considered;

- The above method is extended to the case when the systems are affected not only by dynamic (small factor in the derivative), but also parametric (small factor in the right part of the equations) uncertainties. In addition, the right parts are not fully defined, but only satisfy some restrictions. These uncertainties are due to the uncertainties of the coefficients of the equations of motion, the uncertainties of the initial and boundary conditions, undesirable for control systems of nonlinearities and external influences. Uncertainties are formed in the uncertainty vector with a small factor in the right part of the system of singularly perturbed differential equations.

- An estimate of the upper limit of a small parameter is made such that for all values of this parameter, smaller than the obtained estimate, the undisturbed solution of a singularly perturbed system of differential equations with dynamic and parametric uncertainties is asymptotically stable.

- A theorem is proved in which sufficient conditions for uniform asymptotic stability of solutions of such a system are formulated.

- The class of systems that can be tested for stability has been expanded. Necessary researches are made and the formulas allowing to analyze stability of systems even at the conditions of the incomplete information on disturbances operating on them are received.

References

1. Tikhonov, A. (1952), Systems of differential equations containing small parameters with derivatives [Sistemy differentsial'nykh uravnenij, soderzhashhie malye parametry pri proizvodnykh], *Mathematical collection*, Vol. 31 (73), No. 3, P. 575–586.
2. Vasilyeva, A., Butuzov, V. (1990), *Asymptotic methods in the theory of singular perturbations* [Asimptoticheskie metody v teorii singularnykh vozmushhenij], Higher school, Moscow, 352 p.
3. Hoppensteadt, F. (1971), "Property of solutions of ordinary differential equations with small parameters", *Commun. on pure and applied mathematics*, Vol. XXIV, P. 807–840.
4. Kachalov, V. (2017), "On holomorphic regularization of singularly perturbed systems of differential equations" ["O golomorfnoj reguljarnizacii singularno vozmushennykh sistem differentsial'nykh uravnenij"], *Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, Vol. 57, No. 4, P. 64–71.
5. Kachalov, V. (2018), "On a method for solving singularly perturbed systems of Tikhonov type" ["Ob odnom metode reshenija singularno vozmushennykh sistem tihonovskogo tipa"], *Proceedings of universities. Mathematics*, No. 6, P. 25–30.
6. Tursunov, D. A., Kozhobekov, K. G. (2017), "Asymptotics of the solution of singularly perturbed differential equations with a fractional turning point" ["Asimptotika resheniya singularno vozmushchennykh differentsial'nykh uravnenij s drobnnoj tochkoj povorota"], *Irkutsk State University Bulletin, Series : Mathematics*, Vol. 21, P. 108–121. DOI: 10.26516/1997-7670.2017.21.108
7. Butuzov, V. (2018), "On a certain singularly perturbed system of ordinary differential equations with a multiple root of the degenerate equation", *Nonlinear oscillations*, Vol. 21, No. 1, P. 6–28.
8. Binning, H. S., Goodall, D. P. (1997), "Output control for an undefined singularly perturbed system" ["Upravlenie po vyhodu neopredelennoj singularno vozmushhennoj sistemoj"], *Automation and telemekhanics*, No. 7, P. 81–97.
9. Kodra, K., Gajic, Z. (2017), "Optimal control for a new class of singularly perturbed linear systems", *Automatica*, Vol. 81, P. 203–208. DOI: 10.1016/j.automatica.2017.03.017
10. Li, Y., Wang, Y., Yao, D. (2018), "A sliding mode approach to stabilization of nonlinear Markovian jump singularly perturbed systems", *Automatica*, No. 97, P. 404–413. DOI: 10.1016/j.automatica.2018.03.066
11. Liu, H. S., Huang, Y. (2018), "Robust adaptive output feedback tracking control for flexible-joint robot manipulators based on singularly perturbed decoupling", *Robotica*, Vol. 36, P. 822–838.
12. Potapenko, E. M., Savranska, A. V. (1999), "Investigation of robust stability of a combined system with an unexpanded observer" ["Doslidzhennia robstnoji stijkosti kombinovanoi systemy z nerozshyrenym sposterihachem"], *Bulletin of Zaporizhia University*, No. 1, P. 108–113.
13. Potapenko, E. M., Savranska, A. V. (1999), "Advancement of the robustness of the control system with the help of the vector of non-value" ["Doslidzhennia robstnoji stijkosti sy`stemy` upravlinnya zi sposterigachem vektora nevy`znachennosti"], *Bulletin of Zaporizhia University*, No. 2, P. 108–111.
14. Martynyuk, A. (1986), "Uniform asymptotic stability of a singularly perturbed system based on a matrix, the Lyapunov function" ["Ravnomernaja asimptoticheskaja ustojchivost' singularno vozmushhennoj sistemy na osnove matricy - funkcii Ljapunova"], *Reports of the USSR Academy of Sciences*, Vol. 287, No. 4, P. 786–789.
15. Xingwen Liu, Yongbin Yu, Hao Chen (2017), "Stability of perturbed switched nonlinear systems with delays", *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, Vol. 25, P. 114–125. DOI: org/10.1016/j.nahs.2017.03.003
16. Potapenko, E., Savranskaya, A. (1998), "Generalization of Tikhonov's theorem for a singularly excited system" ["Uzagal`nennya teoremy` Ty`xonova dlya sy`ngulyarno-zbudzhenoyi sy`stemy`"], *Bulletin of Zaporizhia University*, No. 1, P. 61–65.
17. Potapenko, E., Savranskaya A. (1999), "Uniform asymptotic stability of a singularly excited system under constant excitations", ["Rivnomirna asy`mptoty`chna stijkist' sy`ngulyarno-zbudzhenoyi sy`stemy` pry` postjno diyuchy`x zbudzhenyax"], *Bulletin of the University of Kiev*, No. 4, P. 55–59.

Received 23.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Савранська Алла Володимирівна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний університет "Запорізька політехніка", доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; email: savranskaya-alla@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0193-8722>.

Савранская Алла Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный университет "Запорожская политехника", доцент кафедры системного анализа и вычислительной математики, Запорожье, Украина.

Savranska Alla – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, National University "Zaporizka Politechnika", Associate Professor of the Department of System Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhya, Ukraine.

Денісенко Олександр Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет "Запорізька політехніка", доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики, Запоріжжя, Україна; email: sav321@ukr.net.

Денисенко Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный университет "Запорожская политехника", доцент кафедры системного анализа и вычислительной математики, Запорожье, Украина.

Denisenko Oleksandr – PhD (Engineering Sciences), Associate Professor, National University "Zaporizka Politechnika", Associate Professor of the Department of System Analysis and Computational Mathematics, Zaporizhzhya, Ukraine.

ПОБУДОВА ОБЛАСТЕЙ СТІЙКОСТІ ДЛЯ КЕРОВАНИХ СИСТЕМ З ПАРАМЕТРИЧНОЮ ТА ДИНАМІЧНОЮ НЕВИЗНАЧЕНОСТЯМИ

Предметом дослідження в статті є сигулярно збудені керовані системи диференціальних рівнянь, що містять доданки з малим множником у правій частині, які не є повністю відомими, а лише задовольняють деяким обмеженням. **Мета** роботи — поширити дослідження поведінки розв'язків сигулярно збудених систем диференціальних рівнянь на випадок, коли на систему впливають не тільки динамічні (малий множник при похідній), а ще і параметричні (малий множник у правій частині рівнянь) невизначеності та визначити умови, за яких розв'язки таких систем будуть асимптотично стійкими до будь-яких збудень, оцінити верхню границю малого параметру, таким чином що для всіх значень цього параметру, менших ніж отримана оцінка, незбудений розв'язок системи є асимптотично стійким. В статті вирішуються наступні **завдання**: досліджуються сингулярно збудені системи диференціальних рівнянь, що мають регулярні збудення у вигляді доданків з малим множником у правих частинах, які не є повністю відомими; робиться оцінка областей асимптотичної стійкості незбуденого розв'язку таких систем, тобто розширюється клас систем, які можна досліджувати на стійкість, отримуються формули, що дозволяють аналізувати асимптотичну стійкість розв'язків систем навіть за умов неповної інформації про збудення, що діють на них. Використовуються такі **методи**: математичне моделювання складних систем керування; векторні функції Ляпунова дослідження асимптотичної стійкості розв'язків систем диференціальних рівнянь. Отримано наступні **результати**: зроблена оцінка верхньої границі малого параметра для сигулярно збудених систем диференціальних рівнянь параметричними (неповністю відомими) і динамічними невизначеностями, така що для всіх значень цього параметру, менших ніж отримана оцінка, незбудений розв'язок такої є асимптотично стійким; доведена теорема, в якій сформульовані достатні умови рівномірної асимптотичної стійкості такої системи. **Висновки**: метод векторних функцій Ляпунова може бути поширеним на клас сингулярно збудених систем диференціальних рівнянь з малим множником у правих частинах, які не є повністю відомими, а лише задовольняють деяким обмеженням.

Ключові слова: асимптотична стійкість; векторні функції Ляпунова; параметрична невизначеність; малий параметр.

ПОСТРОЕНИЕ ОБЛАСТЕЙ УСТОЙЧИВОСТИ ДЛЯ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ

Предметом исследования в статье является сигулярно возмущенные управляемые системы дифференциальных уравнений, содержащих слагаемые с малым множителем в правой части, которые не являются полностью известными, а лишь удовлетворяют некоторым ограничениям. **Цель** работы – расширить исследование поведения решений сигулярно возмущенных систем дифференциальных уравнений на случай, когда на систему влияют не только динамические (малый множитель при производной), но и параметрические (малый множитель в правой части уравнений) неопределенности и определить условия, при которых решения таких систем будут асимптотически устойчивыми к любым возмущениям, оценить верхнюю границу малого параметра, таким образом что для всех значений этого параметра, меньших чем полученная оценка, невозмущенное решение системы являлось асимптотически устойчивым. В статье решаются следующие **задачи**: исследуются сингулярно возмущенные системы дифференциальных уравнений, имеющих регулярные возмущения в виде слагаемых с малым множителем в правых частях, которые не являются полностью известными; делается оценка областей асимптотической устойчивости невозмущенного решения таких систем, то есть расширяется класс систем, которые можно исследовать на устойчивость, получены формулы, позволяющие анализировать асимптотической устойчивости решений систем даже в условиях неполной информации о возмущениях, действующих на них. Используются такие **методы**: математическое моделирование сложных систем управления; векторные функции Ляпунова исследования асимптотической устойчивости решений систем дифференциальных уравнений. Получены следующие **результаты**: сделана оценка верхней границы малого параметра для сигулярно возмущенных систем дифференциальных уравнений с параметрическими (не полностью известными) и динамическими неопределенностями, такая что для всех значений этого параметра, меньших чем полученная оценка, невозмущенное решение такой является асимптотически устойчивым; доказана теорема, в которой сформулированы достаточные условия равномерной асимптотической устойчивости такой системы. **Выводы**: метод векторных функций Ляпунова может быть расширен на класс сингулярно возмущенных систем дифференциальных уравнений с малым множителем в правых частях, которые не являются полностью известными, а лишь удовлетворяют некоторым ограничениям.

Ключевые слова: асимптотическая устойчивость; векторные функции Ляпунова; параметрическая неопределенность; малый параметр.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Савранська А. В., Денісенко О. І. Побудова областей стійкості для керованих систем з параметричною та динамічною невизначеностями. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2021. № 3 (17). С. 117–122. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.117>

Savranska, A., Denisenko, O. (2021), "Construction of stability areas for controlled systems with parametric and dynamic uncertainty", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (17), P. 117–122. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.17.117>

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

| | |
|----------------------------------|-----|
| Аль-Фахор Ескндер Суліаман Салти | 78 |
| Босько В. В. | 23 |
| Верясова Г. М. | 78 |
| Воробйов Ю. А. | 5 |
| Демська Н. П. | 106 |
| Денісенко О. І. | 117 |
| Дюжев В. Г. | 78 |
| Євсєєв В. В. | 106 |
| Золотарьов Д. О. | 13 |
| Зубаньов О. Є. | 5 |
| Корсун Р. О. | 62 |
| Крамаренко В. І. | 32 |
| Кривова С. Г. | 5 |
| Курденко О. В. | 78 |
| Луцький С.В. | 91 |
| Мелешко Є.В. | 23 |
| Невлюдов І. Ш. | 106 |
| Новожилова М. В. | 32 |
| Порошин С. М. | 41 |
| Раскін Л. Г. | 62 |
| Рудницький В. М. | 69 |
| Савранська А. В. | 117 |
| Сіра О. В. | 62 |
| Соколова Л. В. | 78 |
| Стародубцев М. Г. | 106 |
| Сухомлин Л. В. | 62 |
| Усик В. В. | 41 |
| Хаді Аміне | 69 |
| Чуб О. І. | 32 |
| Шостак І. В. | 5 |
| Якименко М. С. | 23 |

ALPHABETICAL INDEX

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Al-Fakhore Esknder Suliaman Salty | 78 |
| Bosko Viktor | 23 |
| Veriasova Ganna | 78 |
| Vorobyov Yuriy | 5 |
| Demska Nataliia | 106 |
| Denisenko Oleksandr | 117 |
| Dyuzhev Viktor | 78 |
| Yevsieiev Vladyslav | 106 |
| Zolotariov Denis | 13 |
| Zubanyov Alexander | 5 |
| Korsun Roman | 62 |
| Kramarenko Vladyslav | 32 |
| Kryvova Svetlana | 5 |
| Kurdenko Oleksandr | 78 |
| Lutsky Sergey | 91 |
| Meleshko Yelyzaveta | 23 |
| Nevliudov Igor | 106 |
| Novozhylova Maryna | 32 |
| Poroshin Sergei | 41 |
| Raskin Lev | 62 |
| Rudnytskyi Volodymyr | 69 |
| Savranska Alla | 117 |
| Sira Oksana | 62 |
| Sokolova Liudmyla | 78 |
| Starodubcev Nikolaj | 106 |
| Sukhomlyn Larysa | 62 |
| Usik Victoriya | 41 |
| Hadi Amineh | 69 |
| Chub Olga | 32 |
| Shostak Igor | 5 |
| Yakymenko Mykola | 23 |

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА
ТЕХНОЛОГІЙ В ПРОМИСЛОВОСТІ**

Щоквартальний науковий журнал

№ 3 (17), 2021

Відповідальний секретар журналу *І. Г. Перова*
Відповідальний за випуск *А. А. Коваленко*
Комп'ютерна верстка *О. Ю. Персіянова*

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 61166, м. Харків, проспект Науки, 14

Тел.: +38 (057) 704-10-51

Веб-сайт: <http://itssi-journal.com>

E-mail: journal.itssi@gmail.com

Формат 60×84/8. Умов. друк. арк. 13,95. Тираж 150 прим.

Відруковано з готових оригінал-макетів в типографії ФОП Андреев К.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис №24800170000045020 від 30.05.2003.

61166, Харків, вул. Серпова, 4, тел. 063-993-62-73
e-mail: ep.zakaz@gmail.com