ISSN 2522-9052


Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”


# Сучасні інформаційні системи

# Advanced Information Systems

**Том 2, № 1** **Volume 2, No. 1**

**Щоквартальний науково-технічний журнал**

**Заснований у березні 2017 року**

У журналі публікуються результати досліджень з експлуатації та розробки сучасних інформаційних систем у різних проблемних галузях. Журнал призначений для наукових працівників, викладачів, докторантів, аспірантів, а також студентів старших курсів відповідних спеціальностей.

**Засновник і видавець:**
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

Кафедра “Обчислювальна техніка та програмування”, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна

**Телефон:**
+38 (057) 707-61-65

**E-mail редколегії:**
kuchuk56@ukr.net

**Інформаційний сайт:**
http://ais.khpi.edu.ua

**Quarterly scientific and technical journal**

**Founded in March 2017**

The journal publishes the research study from the usage and development of advanced information systems in various problem areas. The journal is intended for researchers, lecturers, doctoral students, postgraduate students, and for senior students of the corresponding specialties.

**Founder and publisher:**
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Department of Computer Science and Programming, 61002, Ukraine, Kharkiv, Kyrpychova str., 2

**Phone:**
+38 (057) 707-61-65

**E-mail of the editorial board:**
kuchuk56@ukr.net

**Information site:**
http://ais.khpi.edu.ua

*Затверджений до друку Вченою Радою Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (протокол від 4 травня 2018 року № 4).*

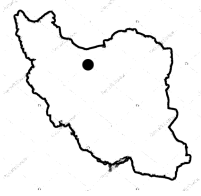
*Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.*

**Харків • 2018**

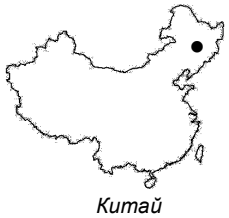
---

***Географія статей номера***

*Великобританія*
*Great Britain*



*Іран*
*Iran*



*Китай*
*China*

*Україна*
*Ukraine*

# ЗМІСТ

## МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ



## МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ



## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ



## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ



## МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ



# TABLE OF CONTENTS

## INFORMATION SYSTEMS MODELING



## METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS



## INFORMATION SYSTEMS RESEARCH



## INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS



## METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION

*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.*

*Включений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" (**технічні науки**) наказом Міністерства освіти і науки України від 04.04.2018 № 326 (додаток 9, п. 56)*

# Information systems modeling

UDC 681.51:351.814.33 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.01**

D. Grishmanov [1], H. Pukhalska [1], O. Yarokhowytch [1], O. Pysarchuk [2]

[1] Kirovohrad flight academy National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine
[2] National Aviation University, Kyiv, Ukraine

## APPLICATION OF THE STRUCTURAL-ALGORITHMIC ANALYSIS METHOD FOR MODELING WORK DUTY SHIFT AREA CONTROL CENTERS

Development and implementation new service ways in the air traffic services system are connected with the solution of complex tasks researching the features of familiar business models of duty shift and determination the direction of their development. **The purpose of the article** is to analyze the existing business model of area control centers of air traffic controllers and search areas for their improvements. It is shown that insufficiently addressed issues relating to the problems of interaction between the air traffic controllers among themselves and with automation tools. In this regard, the harmonization of the business models is needed in order to research, process information and training tasks, that takes into consideration the requirements of visibility and accessibility, while maintaining the possibility of analytical and experimental studies. To improve the business model of the area control center duty shift has been proposed to add other elements into the situation detection scheme and classify the initiating situations. **Conclusion.** The article shows that it is rational to complement existing methods of modeling activities of air traffic controllers by structurally-algorithmic analysis method and method of generalized network models activity in order to address the research, information and training tasks.

**Keywords:** air traffic controller; area control center; duty shift; business model; network models.

## Introduction

**Statement of a problem.** The problem of the development and implementation new service ways in the air traffic services system is connected with the solution of the complex tasks researching the features of known business models of duty shift, determination the direction of their development, verification models in the application and experience sharing.

**Analysis of the known publications.** Analysis of the literature [1 – 4], dedicated to modeling activities of area control centers of air traffic controllers and duty shift in general showed, that issues relating to the problems of interaction between the air traffic controllers and with automation tools has been insufficiently studied [5]. In this regard, it is needed the harmonization of the business models in order to conduct a research, information and training tasks, that takes into consideration the requirements of visibility and accessibility, while maintaining the possibility of analytical and experimental studies [6].

**Aim of the article.** The aim of the article is to analyze the existing business models of air traffic controllers of area control centers and the search areas for improvements.

## Base material

To determine the degree of compliance with the above requirements of the various combinations of methods for constructing models, the need to identify possible options for grouping methods, comparative analysis and identification of the best. These stages are characteristic for morphological analysis of systems. In known pattern of morphological analysis the issue of selection of the most successful combinations has not been not sufficiently developed, so this scheme should be supplemented with a multi-attribute utility evaluation strategy, detailed disclosure in the utility theory (linear, conjunctive, alternative and configuration). Since the desired combination of methods should best meet the requirements, which in the case of standardized models can be considered equivalent.

To select the best option the conjunctive strategy is applicable. According to this strategy, the result gains positive usefulness, if all the measured values exceed the limits.

As characteristics (morphological features) of alternative activity modeling methods combinations based on the tasks of the study were selected:

– the ability to model situation in the workstation ($X_1$);

– possibility of constructing and evaluating model characteristics with variable structure ($X_2$);

– the ability to automate storage processes, search and reproduction of information in the activities of area control centers of air traffic controllers ($X_3$);

– applicability during the educative process of area control centers duty shift ($X_4$).

In this case, in the analysis type of value characteristics matrix can be used [7]:

$$R = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{ij} & \cdots & r_{2n} \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

where $i$ – the index of the method;

$j$ – index of morphological characters;

$n$ – number of accounted characteristics;

$m$ – number of considered methods;

$$r_{ij} = \begin{cases} \text{is 1 if } i\text{-th feature obtained by } j\text{-th method,} \\ \text{otherwise is 0.} \end{cases}$$

Possible options of the methods combinations are defined by grouping the rows of the matrix $R$ by one, by two, by three, and so on up to $m$ and characteristics of the options - by selecting the maximum feature value in the considered group of methods. The total number of alternatives $V$ is contained in proportion:

$$V = \sum_{k=1}^{m} \frac{m!}{k!(m-k)!}, \; k = \overline{(1,m)}. \qquad (2)$$

This morphological analysis scheme has been used to study the following well-known methods of modeling activities of Air Traffic Controllers:

– semigraphical ( $M_1$ );

– structural-algorithmic ( $M_2$ );

– method of network business models ( $M_3$ );

– method of reference operator ( $M_4$ ).

Characteristic values obtained for this combination of the methods shown in Table 1.

Analysis of the table shows that, except for the trivial variants $M_1M_2M_3M_4$ , the dominant variants are $M_1M_2M_3$ and $M_1M_3M_4$ .

But option $M_1M_3M_4$ suggests the presence of obviously trained air traffic controllers or the fullness of reference materials on the duty shift area control center in various situations, which is quite difficult to provide in the context of a twenty-four-hour air traffic control.

For analytical methods, the rational is to supplement the existing techniques by structural-algorithmic analysis and method of network business models – option $M_1M_2M_3$ .

*Table 1.* **Characteristics of possible area control center methods of duty shift modeling and work combination options**

| No. of version | Combination of methods | Rankings of the options | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ |
| 1 | $M_1$ | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | $M_2$ | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | $M_3$ | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | $M_4$ | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | $M_1M_2$ | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 6 | $M_1M_3$ | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 7 | $M_1M_4$ | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 8 | $M_2M_3$ | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | $M_2M_4$ | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 10 | $M_3M_4$ | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 11 | $M_1M_2M_3$ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 12 | $M_2M_3M_4$ | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 13 | $M_1M_3M_4$ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 14 | $M_1M_2M_4$ | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 15 | $M_1M_2M_3M_4$ | 1 | 1 | 1 | 1 |

**Application of the structurally-algorithmic analysis method for modeling work duty shift area control centers.** In order to enhance the capabilities of existing working model building methods for air traffic controllers it is desirable to supplement it with structural-algorithmic work analysis method.

The method is based on the use of algorithms activity, representing a set of interrelated operational and decisive elements. Each operation member corresponds to the group of operations performed successively in the implementation of the algorithm (entering information into the automated management system, command issuing, receiving reports, etc.). Each decisive element corresponds to a choice of one of the two or more further actions (analysis of visual and verbal information, registration conditions, decision-making, etc.). For systems with parallel processes are additionally used expectations elements. The method of structurally-algorithmic analysis allows describing not only the physical action of the controller, but also his mental activity, which makes it possible to deal with the distribution of functions in the system and the design of the activity structure. The advantages of the method include the fact that if the characteristics of elementary operations are known, similar characteristics of algorithm in general can be found, and if it is necessary to change the structure of the algorithm by changing the composition and interrelations operations. As for disadvantages of the model, it should be noted the lack of consideration interactions between air traffic controllers and in this regard, its applicability it mainly describes the performance of individual air traffic controllers. Suppose that in terms of structurally-algorithmic analysis defined generalized *m* (typical) situations that may occur during operation *k*-th controller with a certain probability, and the corresponding activity algorithms. The presence of the decisive elements in the algorithm involves multivariate

operations air traffic controller act in its implementation, the total number of variants of the algorithm $n$ can be determined from the proportion:

$$n = \sum_{q=1}^{R} V_q U_q - \Delta(G), \quad (3)$$

where $R$ – number of types of the decisive elements;

$U_q$ – number of $q$ *-type* decisive elements;

$V_q$ – number of *q-type* decisive element alternateves;

$\Delta(G)$ – reducing the number of outcomes due to the structure of the activity algorithm.

Selection of the $j$ -th option of the algorithm of activity ( $j = 1,2,\ldots,n$ ) in the $i$ -th situation ( $i = 1,2,\ldots,m$ ) is performed by air traffic controller depending on the current operating conditions (the current situation), which also can arise with a certain probability. Thus, the problem is solved by the air traffic controller according to the probabilistic algorithm; every $j$ -th embodiment is implemented with a probability of $P_{ij}$ and represents the deterministic finite sequence of some elementary operations. Then, encoding operations of the $k$ - th air traffic controllers in the $i$ -th situation in some alphabet of symbols, you can build a general directed graph, whose vertices correspond to the operations and arrows between nodes – interrelation between operations. With such digraph is isomorphic adjacency matrix $A_{ik}$ , number of rows and columns of which is equal to the number of operations and elements of the matrix $a_{pq}$ characterized repetition rate operation immediately after the operation ( $a_{pq} = 0,1,2,\ldots$ ). Due to the fact that a change in current conditions also changes the number of required operations and connections there between, each $j$ -th option of the activity algorithm will match private digraph and private matrix $A_{ijk}$ , whose number of rows and columns depend on the specified current situations.

For the construction of the structurally-algorithmic models of activity duty shift area control center (ACC), as a whole is invited to take a set of matrices $A_{ijk}$ and isomorphic to them graphs $G_{ijk}(A,\Gamma)$ , which should be compiled into a matrix $D_{ij}$ or a graph $G_{ij}(A,\Gamma)$ describing the activities of all the controllers on duty shift. In this case we use the association operation of graphs:

$$G_{ij}(A,\Gamma) = G_{ij1}(A_1,\Gamma_1) \cup \cup G_{ij2}(A_2,\Gamma_2) \cup \ldots G_{ijl}(A_l,\Gamma_l). \quad (4)$$

Now the vertices of the $G_{ij}(A,\Gamma)$ graph shows the combinations of air traffic controllers operations, involved in the $j$ -th variant of activity algorithm:

$$A = A_1 \cup A_2 \cup \ldots \cup A_l. \quad (5)$$

Mapping for each vertex of the graph $G_{ij}(A,\Gamma)$ is obtained by the same vertex mappings combination for the initial graphs

$$G_{ij1}(A_1,\Gamma_1), G_{ij2}(A_2,\Gamma_2),\ldots, G_{ijl}(A_l,\Gamma_l).$$

When analyzing the business models of the area control center duty shift, issues require special attention – to identify the role of interactions in solving problems in the automated control system (ACS) of air traffic controllers group. In the known sources these issues not been insufficiently studied. In particular, considered only a part of the communication network (interaction between air traffic controllers), and features of communication systems. At the same time, the presence of interaction is mainly associated with loss of time as a result of expectation commands or messages and the interaction of the organization largely depends on the total time of solving problems in the ACS. Given that the interaction of controllers in these systems differ from other operations and are mainly in the implementation of the agreed between the controllers and the work of KSA pair of operations (such as "team - the reception team," "Message - receiving messages", etc.), it is proposed to allocate interaction operations in general adjacency matrix. For this role in a matrix $A_{ij}$ must be grouped operations of each $K$ - th air traffic controller in the order of their execution. The matrix elements analysis shows that the interaction must satisfy the following conditions:

$$\begin{gathered} a_{pq} \neq 0,\ p_k < p < p_{k+1},\ q_k < q < q_{k+1}, \\ p \neq 1,\ q \neq 1,\ p \neq p_l,\ q \neq q_l,\ k = \overline{(1,l)}, \end{gathered} \quad (6)$$

where $p_k, q_k$ – the number of operations to be performed $k$ -th air traffic controller.

The task of improving the algorithm of activity can be associated with the identification of interactions, minimizing their number and, respectively, with the reduction of the number of wait elements. It is also not fully considered in the method of structurally-algorithmic analysis the issues of input events classification and their recognition, although the type of situation depends largely on the nature of the operators' activities and the time required for solution of the problem.

Considering the situation in the air traffic controllers workplaces as a set of conditions, the processes of development and consequences of their classification, can be used certain features that characterize the environment - dynamism, complexity and uncertainty.

In systems engineering familiar with the procedure of recognition of the situation, which includes the following steps (Fig. 1):

– extracting information about the situation (atmosphere of the process and its development) from the information stream (block 1);

– analysis of this data, dividing it into parts, relating to different conditions and characteristics of the process (block 2);

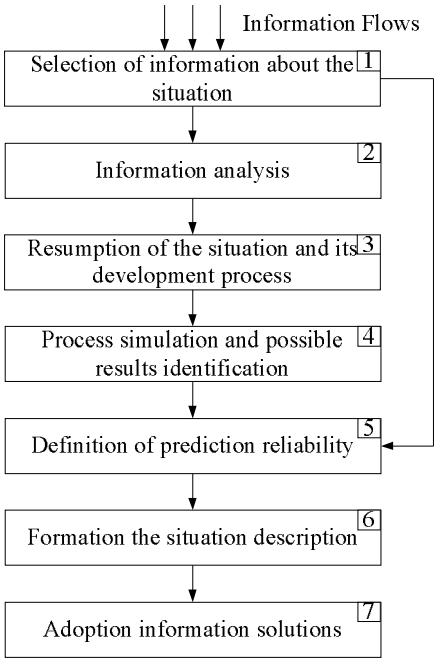



**Fig. 1.** known situations recognition scheme

– determining signs, i.e. recovery situation and its development process based on the received information (block 3);

– process prediction, the determination of possible outcomes (block 4);

– determining the degree of the forecast reliability (block 5);

– drawing describing the situation (block 6);

– adoption of information solutions (block 7).

In the procedure does not take into account this feature of the air traffic controllers activities, as the possibility of creativity in identifying the situation and development of the required algorithm performance. To overcome this drawback is proposed to include in the situation detection scheme a number of additional elements associated with comparing the signs of the situation with signs of known situations and identifying new situations (Fig. 2).

This addition allows us to pose the problem of finding previously unknown situations and activity algorithms and their inclusion in the future in a special software ACS, i.e. the task of forming a tunable external memory.

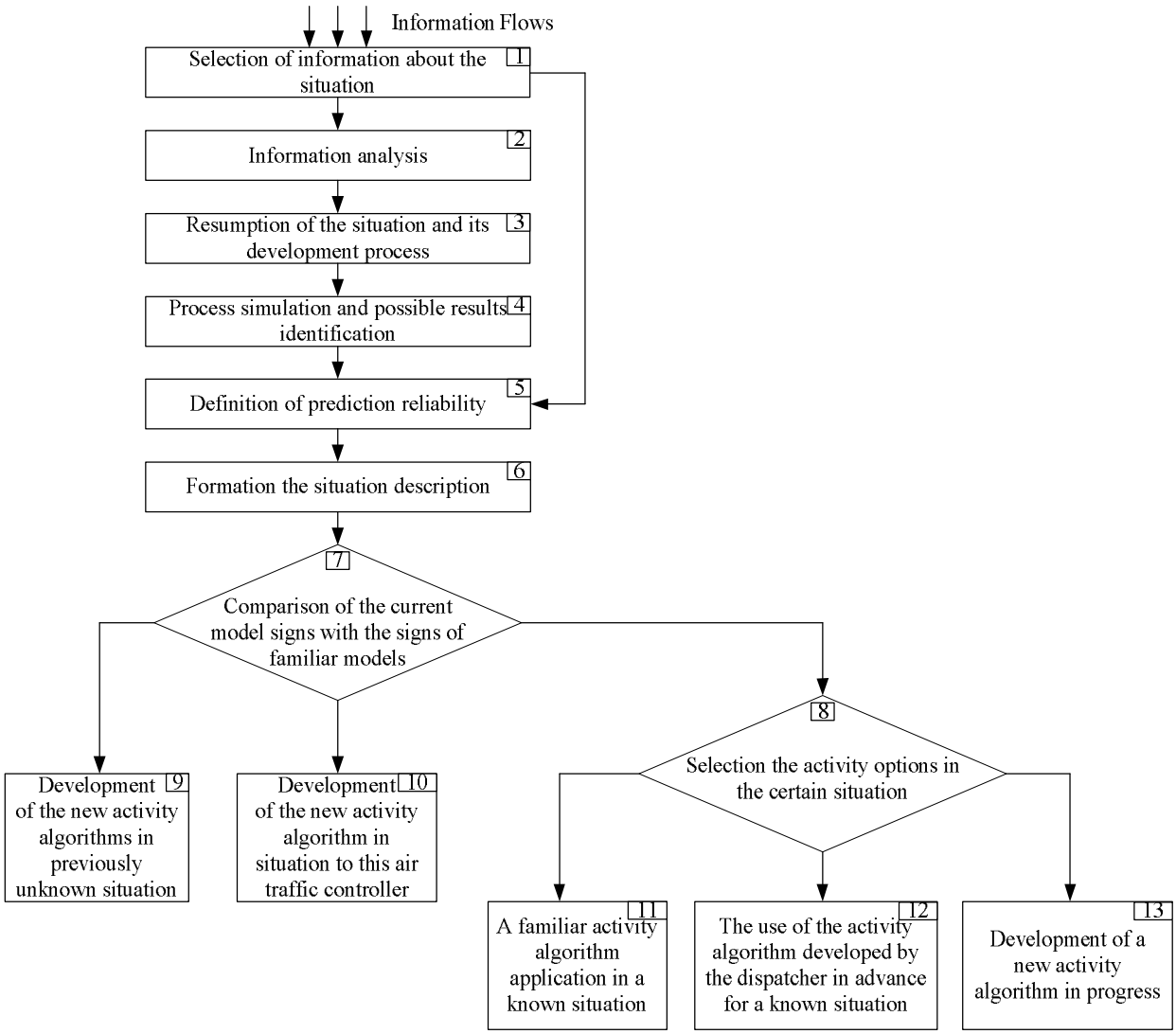



**Fig. 2.** Additional elements proposed for inclusion in a situation recognition circuit

In the classification of initiating situations for working models, standardized solutions for research, information and tasks of training, in addition to the degree of novelty it is advisable to consider the sources of the situation, management techniques, possible in this situation and the degree of development of the situation recognition process by the area control center duty shift (Fig. 3).

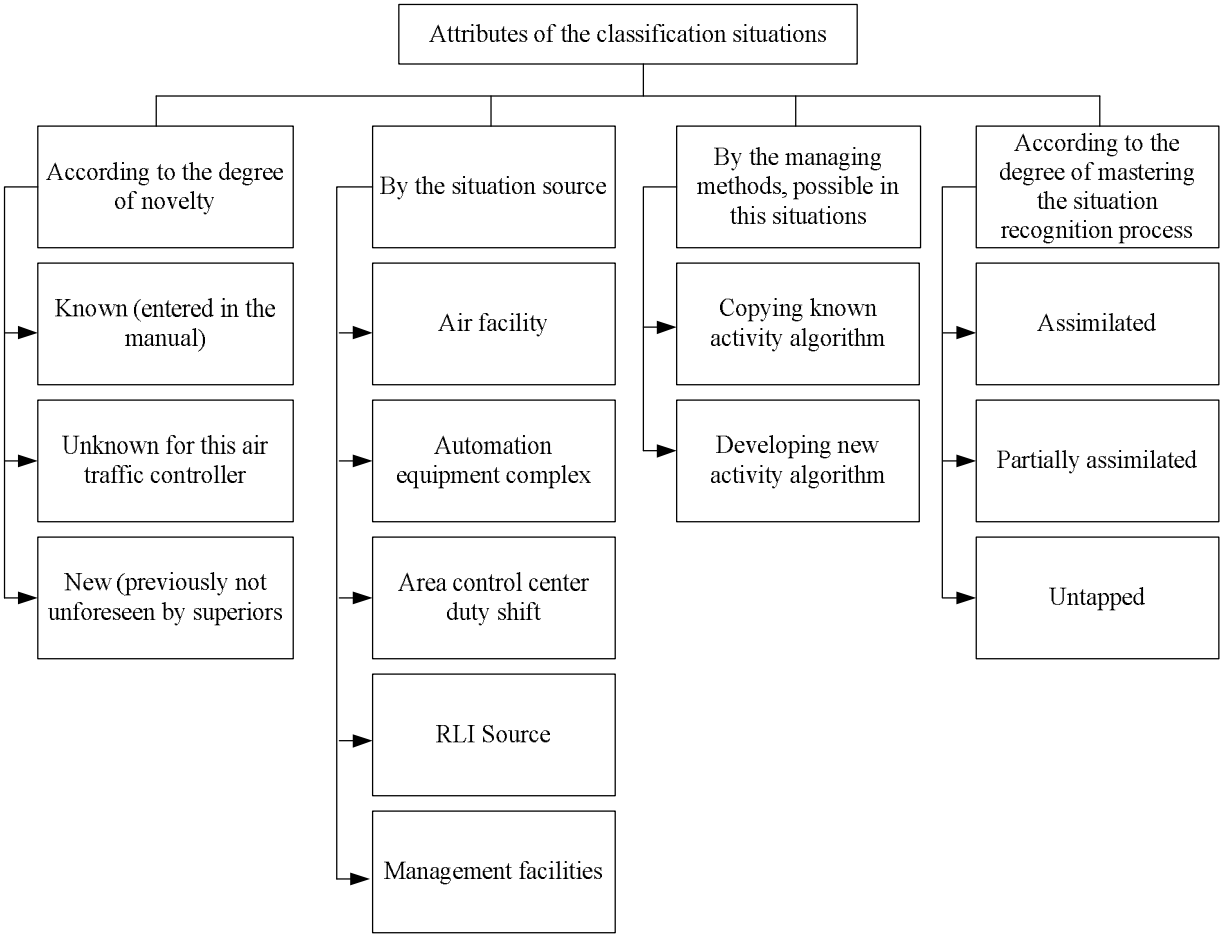



**Fig. 3.** Options for the classification of the situation in the air traffic controllers workplace at duty shift area control center

## Conclusions

On the basis of morphological analysis of different area control center duty shift operation modeling methods combination variants, shows that in order to address the research, information and tasks of training, it is rational to complement existing methods of modeling activities of air traffic controllers and the duty shift ACC by structurally-algorithmic analysis and method of generalized network models activity.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Беляев Ю. Б. Моделирование принимающего решения оператора авиационной эргатической системы в особых случаях полета / Ю. Б. Беляев, Т. Ф. Шмелева, Ю. В. Сикирда // Автоматизация производственных процессов. – 2003. – № 2 (17). – С. 17-23.
2. Горбунов А. Л. Инновационный подход к созданию авиадиспетчерских тренажёров на базе технологии комбинированной реальности: необходимость и возможность / А. Л. Горбунов, Б. П. Елисеев, Е. Е. Нечаев // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – М.: МГТУ, 2010. – № 161. – С. 5-14.
3. Джума Л. Н. Моделирование потока воздушных судов в зоне ответственности диспетчера Tower / Л. Н. Джума, О. Н. Филипенок // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – К., 2015. – № 5 (39). – С. 93-97.
4. Обидин Д.М. Процессы управления интеллектуализацией математических моделей, управляемые объектом на основе нечетких семантических сетей / О.В. Барабаш, А.П. Мусиенко, Д.М. Обидин // Научные записки Украинского научно-исследовательского института связи. – К., 2014. – №3 (31). – С. 5-9.
5. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.Ф. Тарасенко. – М.: Наука, 1989. – 367 с.
6. Залежність функціональних станів оператора від комплексу зовнішніх та внутрішніх факторів при роботі з АСУ / М. А. Павленко, О. А. Черток, Є. А. Толкаченко, В. П. Ясинецький // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2017. – № 4. – С. 111-114.

7. Математические основы эргономических исследований: монография / П. Г. Бердник, Г. А. Кучук, Н. Г. Кучук, Д. Н. Обидин, М. А. Павленко, А. В. Петров, В. Н. Руденко, О. И. Тимочко. – Кропивницкий : КЛА НАУ, 2016. – 248 с.

REFERENCES

1. Belyaev, Y.B., Shmelyova, T.F. and Sikirda, Y.V. (2003), "Modeling of decision-making aviation ergatic system operator in special cases of flight", *Automation of production processes*, No. 2 (17), pp. 17-23.
2. Horbunov, A.L., Eliseev, B.P. and Nechaev, E.E. (2010), "An innovative approach to the creation of air traffic control simulators based on a combination of technologies a reality: the necessity and possibility", *Scientific herald of Moscow State Technical University of Civil Aviation*, MGTU, Moscow, No. 161, pp. 5-14.
3. Dzuma, L.N. and Pilipyonok, O.N. (2015), "Modeling the flow of aircraft in the zone of responsibility of the tower controller", *Scientific Notes of the Ukrainian Research Institute of Communications*, Ukrainian Research Institute of Communication, Kyiv, No. 5 (39), pp. 93-97.
4. Barabash, O.V., Musienko, A.P. and Obidin, D.M. (2014), "Mathematical model intellectualization management processes driven by an object on the basis of blurred semantic networks", *Scientific notes Ukrainian Research Institute of Communications*, Ukrainian NDI Communications, Kyiv, No. 3 (31), pp. 5-9.
5. Peregudov, F.I. and Tarasenko, F.P. (1989), *Introduction to system analysis*, Academics, Moscow, 367 p.
6. Pavlenko, M.A., Chertok, O.A., Tolkachenko, E.A. and Yasinetskiy, V.P. (2017), "The dependence of the functional states of the operator of the complex internal and external factors at work with an automated control system", *Collection of scientific works of the Kharkov National University of the Air Force*, 4, pp. 111-114.
7. Berdnik, P.G., Kuchuk, G.A., Kuchuk, N.G., Obidin, D.N., Pavlenko, M.A., Petrov, A.V., Rudenko, V.N. and Timochko, O.I. (2016), *Mathematical Foundations of ergonomic research*, National Aviation University Kirovograd Flight Academy, Kropyvnitskiy, 248 p.

Received (Надійшла) 22.02.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.04.2018

**Застосування методу структурно-алгоритмічних аналізу для побудови моделей роботи чергової зміни районного диспетчерського центру**

Д. Є. Гришманов, Г. А. Пухальська, О. І. Ярохович, О. О. Писарчук

Розробка і впровадження в систему обслуговування повітряного руху нових способів обслуговування пов'язані з вирішенням комплексу завдань з дослідження особливостей відомих моделей діяльності чергової зміни, визначення напрямів їх вдосконалення. **Метою статті** є проведення аналізу існуючих моделей діяльності авіаційних диспетчерів районних диспетчерських центрів і пошук напрямків щодо їх вдосконалення. Показано, що недостатньо повно вирішені питання, що стосуються проблем взаємодії диспетчерів між собою та з засобами автоматизації. У зв'язку з цим необхідна уніфікація моделей діяльності з метою вирішення дослідницьких, інформаційних та тренажних завдань, що передбачає врахування вимог наочності та доступності при збереженні можливості проведення аналітичних і експериментальних досліджень. Для вдосконалення моделей діяльності чергової зміни районного диспетчерського центру пропонується внести додаткові елементи в схему розпізнавання ситуації і класифікувати ініціюючі ситуації. **Висновок.** У статті показано, що для комплексного вирішення дослідницьких, інформаційних та тренажних завдань раціональним є доповнення існуючої методики моделювання діяльності авіаційних диспетчерів методом структурно-алгоритмічного аналізу та методом узагальнених мережевих моделей діяльності.

**Ключові слова:** авіаційний диспетчер; районний диспетчерський центр; чергова зміна; модель діяльності; мережеві моделі.

**Применение метода структурно-алгоритмического анализа для построения моделей работы дежурной смены районного диспетчерского центра**

Д. Е. Гришманов, Г. А. Пухальская, А. И. Ярохович, А. А. Писарчук

Разработка и внедрение в систему обслуживания воздушного движения новых способов обслуживания связаны с решением комплекса задач по исследованию особенностей известных моделей деятельности дежурной смены, определению направлений их совершенствования. **Целью статьи** является проведение анализа существующих моделей деятельности авиационных диспетчеров районных диспетчерских центров и поиск направлений по их совершенствованию. Показано, что недостаточно полно решены вопросы, касающиеся проблем взаимодействия диспетчеров между собой и с средствами автоматизации. В связи с этим необходима унификация моделей деятельности в целях решения исследовательских, информационных и тренажных задач, что предполагает учет требований наглядности и доступности при сохранении возможности проведения аналитических и экспериментальных исследований. Для совершенствования моделей деятельности дежурной смены районного диспетчерского центра предлагается внести дополнительные элементы в схему распознавания ситуации и классифицировать инициирующие ситуации. **Вывод.** В статье показано, что для комплексного решения исследовательских, информационных и тренажных задач рациональным является дополнение существующей методики моделирования деятельности авиационных диспетчеров методом структурно-алгоритмического анализа и методом обобщённых сетевых моделей деятельности.

**Ключевые слова:** авиационный диспетчер; районный диспетчерский центр; дежурная смена; модель деятельности; сетевые модели.

УДК 004.89 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.02**

Я. Рахими

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

# РАЗРАБОТКА СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТАВОК СУХОФРУКТОВ В РЕЖИМЕ «JUST-IN-TIME»

**Цель статьи.** Разработка комплексной информационной модели полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину. **Результаты**. Рассмотрены вопросы, связанные с моделированием процессов создания, развертывания и поддержки функционирования полной логистической цепи поставок сухофруктов (ЦПС) в Украину. Проведен анализ бизнес процессов, имеющих место в ЦПС, который показал, что по сравнению с другими системами класса SCM, создание ЦПС порождает ряд специфических проблем, поскольку такие цепи представляют собой сложные социо-технико-экономические системы, состоящую из множества поставщиков сырья (свежих фруктов), предприятий-изготовителей конечной продукции (сушка, упаковка), складских терминалов, дистрибьюторов, 3PL и 4PL-провайдеров (розничных торговцев). В ходе анализа показано также, что управление ЦПС невозможно без проведения их анализа на различных уровнях – стратегическом, тактическом и оперативном; для проведения такого анализа предложено использовать сетевую модель, включающую объекты двух типов – центральное звено, отражающее деятельность фокусной компании по переработке исходного сырья (сухофруктов), и ряд подсетей, моделирующих деятельность поставщиков сырья и реализаторов готовой продукции. Рассмотрена модель полной ЦПС в форме сети Петри (СП) и предложена интерпретация бизнес процессов в цепи элементами СП. Перечислены особенности, отличающие модель ЦПС от классической сетевой модели. Приведена содержательная и формальная постановки задачи минимизации логистических издержек при функционировании ЦПС. Сделан вывод о необходимости расширения временем сетевой модели ЦПС для соблюдения принципа ‘just-in-time’ при моделировании бизнес процессов.

**Ключевые слова:** поставки сухофруктов; логистическая система; цепи поставок; моделирование бизнес процессов; сеть Петри; минимизация логистических издержек.

## Введение

В современных условиях экономика Украины ориентирована, преимущественно, на увеличение объема импорта и развитие розничной торговли. Это обстоятельство определяет необходимость совершенствования логистических методов управления, в том числе моделирования и анализа цепей поставок в системах SCM поставок продуктов питания.

Типичным объектом рассматриваемого типа является цепь поставок сухофруктов в Украину (ЦПС), которая представляет собой сложную социо-технико-экономическую систему, состоящую из множества поставщиков сырья (свежих фруктов), предприятий-изготовителей конечной продукции (сушка, упаковка), складских терминалов, дистрибьюторов, 3PL и 4PL-провайдеров (розничных торговцев), которые обладают определенными ресурсами. Взаимодействие участников бизнес процессов в ЦПС отражается множеством материальных, финансовых и информационных потоков, а также потоков услуг от источников исходного сырья до конечного потребителя. Многообразие регионов мира, из которых осуществляются поставки в Украину сухофруктов, широкая номенклатура поставляемой продукции, урожайность, колебание курсов валют, сезонность являются причинами возникновения высокого уровня неопределенности в процессах формирования и принятия решений участниками ЦПС.

Для моделирования и анализа функционирования ЦПС к настоящему времени разработано множество различных моделей и методов, выбор конкретных средств зависит от факторов, описывающих динамичность функционирования конкретного варианта реализации цепи [1].

Концепция SCM [2] предполагает комплексное представление процессов, начиная от производства сырья (свежих фруктов) и охватывающих всех поставщиков товаров, услуг и информации, добавляющих ценность для потребителей и других заинтересованных лиц.

Таким образом, эффективное функционирование ЦПС предполагает интеграцию ключевых бизнес-процессов: управления взаимоотношениями с потребителями; обслуживания потребителей; анализа спроса; управления выполнением заказов; обеспечения производственных процессов; управления снабжением.

При этом основным механизмом повышения эффективности функционирования ЦПС являются минимизация совокупных логистических издержек, достижение максимальной прибыли или минимальных затрат отдельных звеньев при соблюдении принципа ‘just-in-time’ [3].

**Цель статьи** состоит в разработке комплексной информационной модели, в форме сети, полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину, для решения на ее основе задач оптимизации функционирования ЦПС в режиме ‘just-in-time’. Применение такой модели при создании прикладной информационной технологии поддержки функционирования ЦПС даст возможность повысить эффективность бизнес процессов в цепи за счет снижения финансовых и временных затрат, в частности, обеспечения своевременной доставки сухофруктов для реализации украинским потребителям.

## Основная часть

Управление цепями поставок невозможно без проведения их анализа на различных уровнях – стратегическом, тактическом и оперативном.

На стратегическом уровне решаются задачи проектирования ЦПС и определение размеров объектов обслуживания с учетом международных, национальных и региональных особенностей развития транспортных систем. В составе ЦПС определяются основные терминалы, распределительные центры, консолидационные склады, между которыми осуществляются регулярные перевозки сырья и готовой продукции (главные маршруты). Другие объекты в ЦПС обслуживаются с помощью различных, подчиненных, маршрутов перевозок.

На основе прогнозирования спроса решаются задачи приобретения и распределения на сети обслуживания с учетом срочности поставок, номенклатуры поставляемого сырья и распределения готовой продукции, сезонности производства и сбыта товаров пищевой промышленности, уровня транспортных расходов в цепях поставок. На основе последних решается задача определения тарифов на транспортные услуги с учетом соотношения «цена/качество» и динамики использования подвижного состава.

На тактическом уровне транспортно-логистического обслуживания осуществляется корректировка планов перевозок грузов с учетом Bullwhip-эффекта, неравномерности спроса, наличия подвижного состава в узлах цепей поставок. На данном этапе на основе выбранной стратегии распределения продукции по каналам сбыта производится календарное планирование доставки продукции сухофруктов основными и подчиненными маршрутами с учетом периодичности обслуживания, вместимости складов и терминалов, совместимости перевозимой продукции.

Дополнительно определяется политика терминального и складского обслуживания, направленная на повышение эффективности данных процессов, а именно сокращения времени хранения на складе и погрузки на транспорт (разгрузки с транспорта), использования кросс-докинга, совмещение транспортно-складских операций. На этом же уровне решается комплекс задач, связанных с прогнозированием возможного изменения спроса, расширения рынка сбыта и т.п.

На оперативном уровне решаются задачи на очередные сутки, связанные с назначением экипажей водителей для выполнения перевозок грузов с учетом продолжительности рейса, использованием транспортных средств различной грузоподъемности с целью доставки продукции пищевой промышленности различной массы, формы с максимальной сохранностью, оперативностью и минимальной стоимостью перевозок.

На основе выбранной структуры подвижного состава для организации перевозок грузов в рамках ЦПС разрабатываются маршруты и графики работы транспортных средств, учитывающие ограничения в проезде в городских условиях, требуемое время доставки, срочность и периодичность поставок, необходимость доставки продукции от нескольких поставщиков и т.д.

На завершающем этапе формирования ЦПС производится выбор способов взаимодействия транспортных средств в узлах цепи, динамическое распределение ресурсов, корректировка маршрутов, графиков, способов взаимодействия в режиме реального времени с учетом изменений внешней среды, динамики обработки данных, выбора приоритетов обслуживания и интересов участников ЦПС.

При построении моделей цепей поставок могут быть использованы методы сетевого управления [4, 5].

На рис. 1 представлена структура типичной ЦПС. В ней центральным элементом является так называемая фокусная компания.

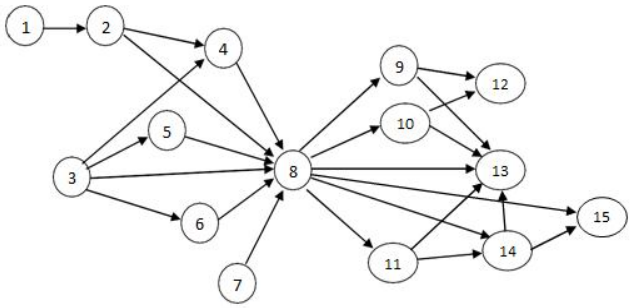



**Рис. 1.** Сетевая модель типичной ЦПС

В приведенной гипотетической цепи фокусная компания (узел №8) получает материальные ресурсы от трех поставщиков (узлы № 1, 3, 7). Причем первый поставщик работает через посредников, третий поставщик работает через посредников и напрямую, седьмой поставщик осуществляет прямые поставки. Для сбыта сухофруктов фокусная компания (узел № 8) использует как прямой, так и косвенные каналы. Узлы №№ 9, 10, 11 и 14 отражают сбытовых посредников, а узлы № 12, 13 и 15 – розничных продавцов.

При анализе функционирования цепей поставок с помощью сетевых моделей базовыми являются понятия «центральное звено» сети и «подсеть». *Центральное звено сети* – это фокусная компания. *Подсеть* – часть сети, совокупность связанных звеньев. Выделим в сети левую и правую подсети. Левую подсеть образуют центральное звено и все звенья, которые участвуют в поставках сырья (в первую очередь, свежих фруктов) фокусной компании. Правую подсеть образуют центральное звено, сбытовые посредники и розничные продавцы.

В отличие от классической сетевой модели управления, сетевая модель ЦПС имеет ряд особенностей:

– основными элементами цепи поставок являются звенья и материальные потоки;

– цели подсетей в составе ЦПС различаются;

– в сетевой модели ЦПС всегда присутствует центральное звено и подсети;

– для сетевой модели ЦПС отсутствует понятие «критический путь»;

– поставки одной подсети рамках одной ЦПС относительно независимы от поставок другой подсети.

Представленная сетевая модель ЦПС является по своей сути дескриптивной, исходя из этого, представляется целесообразным применение для анализа функционирования ЦПС ее описание в форме сети Петри.

В общем случае сеть Петри (СП) [6] представляет собой двудольный ориентированный мультиграф

$$S=(P, T, M_0, A^i, A^o),$$

где $P$ – множество вершин типа «Позиция»;

$T$ – множество вершин типа «Переход»;

$M_0$ – вектор начального маркирования;

$A^i$, $A^o$ – матрицы инцидентности, задающие, соответственно, входы и выходы дуг из вершин СП.

Наиболее часто при разработке моделей реальных объектов в форме СП, вершины типа «Позиция» интерпретируются как условия начала либо окончания какого-либо бизнес-процесса, о наличии таких условий свидетельствует маркер в позиции; позиции же типа «Переход» интерпретируются как те или иные бизнес-процессы. Динамика функционирования цепи поставок отражается перемещением маркеров по СП. На рис. 2 представлены результаты моделирования процесса формирования подсети ЦПС «Поставки свежих фруктов на переработку» в виде одной и той же СП, отражающей готовность к поставкам свежих фруктов на переработку, в первом случае (1а), первым и четвертым поставщиками, о чем свидетельствует наличие маркеров в позициях P1 и P4, в во втором случае (1б) – третьим и четвертым поставщиками. При этом переходы T1 – T4 интерпретируются как процессы перевозки сырья (свежих фруктов) на склад одного из двух перерабатывающих предприятий, а переходы T5 и T6 отражают процессы складирования. Таким образом, с помощью начальной маркировки СП имеется возможность моделировать процессы формирования маршрутов доставки и других бизнес-процессов ЦПС.

Главным недостатком аппарата СП как модели формирования цепей поставок является изначально низкая мощность представления классических, «безопасных» СП (Safety Petri Nets) при максимальной мощности разрешения. Под мощностью представления здесь понимается наличие средств отражения базовых (пространство, время и причинность) и производных от них категорий окружающего мира. Мощность разрешения свидетельствует о возможностях анализа СП как графовых структур на наличие в них активности, достижимости, покрываемости, а также тупиков и зацикливаний (dead locks) [6].

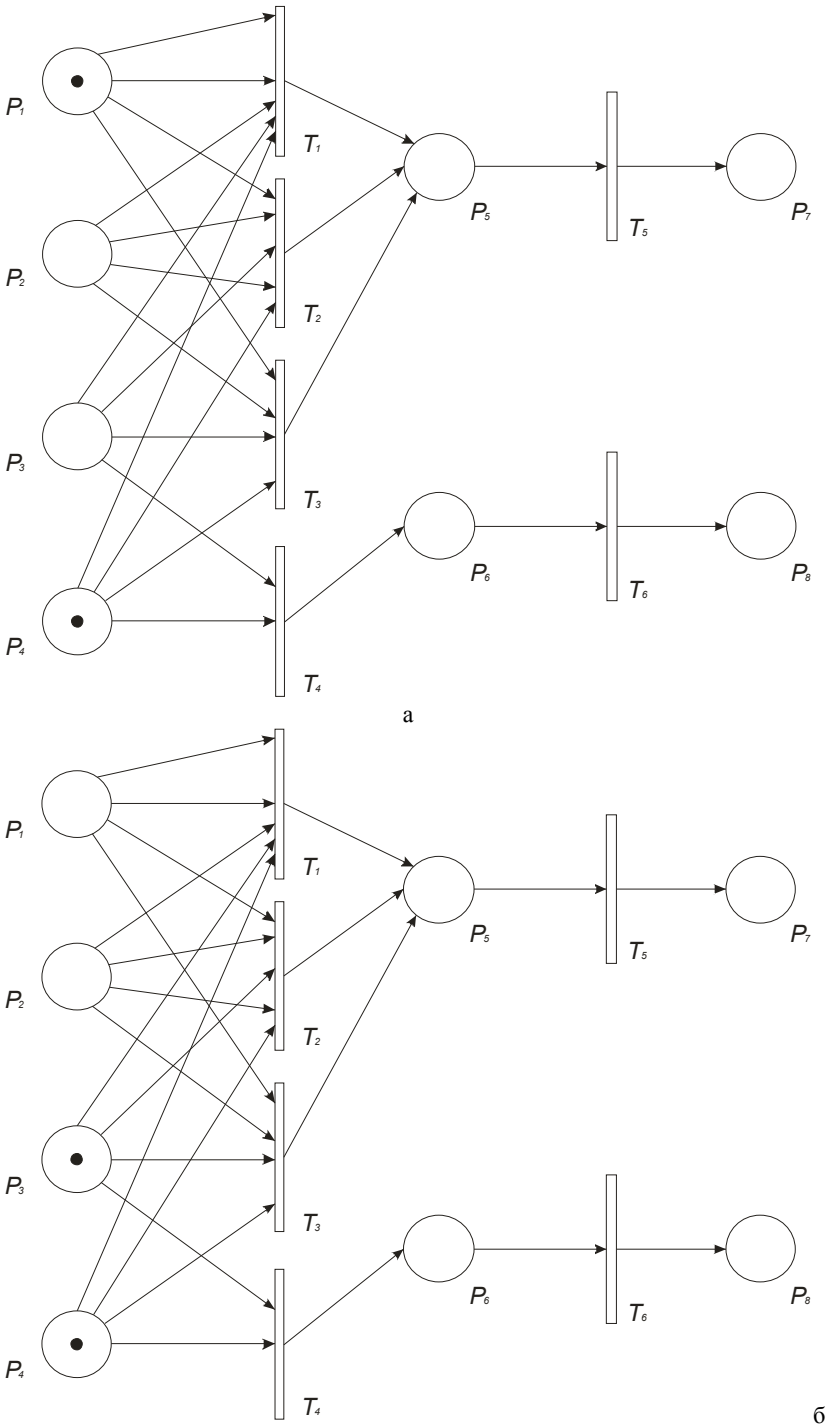



**Рис. 2.** СП, моделирующая подсеть ЦПС «Поставки свежих фруктов на переработку»

При моделировании сетью Петри процесса функционирования ЦПС, с соблюдением принципа «just-in-time», принципиальным моментом является отражение временных зависимостей между отдельными бизнес-процессами.

Однако на практике, повышение мощности представления сети Петри путем так называемого расширения (временные, раскрашенные, стохастические сети Петри) неизбежно ведет к снижению их мощности разрешения, а следовательно, и к ограничению возможностей по оценке качества бизнес-процессов в ЦПС на предмет их полноты и непротиворечивости.

Создание эффективной ЦПС предполагает решение комплекса задач, связанных с минимизацией логистических издержек как для фокусной компании, так и для других участников логистической цепи.

Для формализации рассматриваемой задачи отдельно рассмотрим плановые показатели закупок, продаж, издержек для левой и для правой подсетей цепи поставок. Величину производственной программы фокусной компании приравняем к плану реализации сухофруктов розничными продавцами. Допустим, что сырье (свежие фрукты) закупаются, а реализуемые товары (сухофрукты), продаются по стабильным ценам.

Плановая потребность фокусной компании в закупках сырья:

$$M_l = \sum_{i=1}^{m} \left( R_{li} \cdot Q_i \right),$$

где $R_{li}$ – норма расхода $l$-го вида сырья на производство $i$-го вида продукции;

$m$ – номенклатура продукции фокусной компании, перемещаемой в рамках логистической цепи;

$Q_i$ – объем продукции, необходимый для выполнения фокусной компанией производственной программы.

Плановый объем продукции, производимой фокусной компанией, определяется на основе плана производства (продаж) с учетом комплекса факторов, определяющих текущий и перспективный спрос на продукцию:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{n} \left( P_j \cdot k_{ij} \right),$$

где $P_j$ – план производства (продаж) $j$-го изделия;

$k_{ij}$ – применяемость $i$-й детали в $j$-м изделии;

$n$ – количество номенклатурных позиций товаров.

Логистические издержки, связанные с закупками сырья (затраты левой подсети цепи поставок):

$$Z_1 = \sum_{p=1}^{u} \sum_{i=1}^{t} z_{ip},$$

где $Z_{lp}$ – издержки доставки $l$-го вида свежих фруктов от $p$-го поставщика; $u$ – число поставщиков;

$t$ – номенклатура поставляемого сырья.

План продаж определяется на основе маркетинговых исследований целевых рыночных сегментов:

$$P_j = \sum_{k=1}^{s} P_{jk},$$

где $P_{jk}$ – план продаж $j$-го изделия $k$-му сегменту;

$s$ – количество сегментов.

Логистические издержки, связанные с реализацией сухофруктов (затраты в правой подсети):

$$Z_2 = \sum_{k=1}^{s} \sum_{j=1}^{n} z_{jk},$$

где $Z_{jk}$ – затраты доставки $j$-го товара $k$-му сегменту.

Целевая функция, предполагающая минимизацию общих логистических издержек фокусной компании, связанных с закупками и сбытом:

$$Z = Z_1 + Z_2 \to \min.$$

Решением этой задачи является выбор поставщиков сырья (свежих фруктов) и объемов этих поставок, а также выбор звеньев сбытовой сети и распределение между ними партий сухофруктов.

Рассмотренная задача может быть решена с применением сетевой модели ЦПС, представленной в форме расширенной СП. При этом для соблюдения принципа ‘just-in-time’ принципиально важно расширение СП в аспекте учета временных зависимостей.

## Выводы

Анализ особенностей построения и функционирования полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину дал возможность обосновать выбор в качестве средства моделирования математический аппарат сетей Петри. Разработан вариант сетевой модели ЦПС и выполнен сравнительный анализ этой модели с традиционной сетевой моделью. В общем виде приведена математическая модель задачи минимизации логистических издержек для центрального звена цепи – фокусного предприятия. Показана необходимость расширения аппарата безопасных СП, путем введения средств отражения временных зависимостей между бизнес процессами в рамках ЦПС, для оптимизации цепи с соблюдением принципа ‘just-in-time’.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сток Дж. Р. Стратегическое управление логистикой / Джеймс Р. Сток, Дуглас М. Ламберт. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 831 с.
2. Бауэрсокс Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок. 2-е изд. / Дж. Д. Бауэрсокс, Дж. Д. Клосс. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2008. – 640 с.

3. Рахими Яшар. Знаниеориентированный подход к организации поддержки принятия решений по формированию полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину / Яшар Рахими // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава : ПНТУ, 2017. – Вип. 6 (46). – С. 197-201.
4. Crainic T. G. Bundle-Based Relaxation Methods for Multicommodity Capacitated Network Design / T. G. Crainic, A. Frangioni, B. Gendron // Discrete Applied Mathematics. – 2001. – 112. – P. 73-99.
5. Crainic, T. G. Tools for Tactical Freight Transportation Planning / T.G. Crainic, J. O.R. Roy // European Journal of Oper. Res. – 1988. – 33 (3). – P. 290-297.
6. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. – М.: Мир, 1984. – 264 с.

REFERENCES

1. Stock, J.R. and Lambert, D.M. (2005), *Strategic Logistics Management*, INFRA-M, Moscow, 831 p.
2. Bowersox, D.J. and Closs, D.J. (2008), *Logistics: an integrated supply chain*, ZAO Olimp-Business, Moscow, 640 p.
3. Rahimi, Yashar (2017), "Knowledge of an oriented approach to the organization of decision-making support for the formation of a complete logistic chain of supply of dried fruits to Ukraine", *Systems of control, navigation and communication*, 6 (46), pp. 197-201.
4. Crainic, T.G., Frangioni, A. and Gendron, B. (2001), "Bundle-Based Relaxation Methods for Multicommodity Capacitated Network Design", *Discrete Applied Mathematics*, 112, pp. 73-99.
5. Crainic, T.G. and Roy, J.O.R. (1988), "Tools for Tactical Freight Transportation Planning", *European Journal of Oper. Res*., 33 (3), pp. 290-297.
6. Peterson, J. (1984), *Petri nets theory and systems modelling*, Mir, Moscow, 264 p.

Received (Надійшла) 28.02.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.04.2018

**Розробка мережевої моделі для оптимізації функціонування логістичної цепи поставок сухофруктів в режимі «just-in-time»**

Я. Рахімі

**Мета статті.** Розробка комплексної інформаційної моделі повної логістичного ланцюга поставок сухофруктів в Україну. **Результати.** Розглянуто питання, пов'язані з моделюванням процесів створення, розгортання та підтримки функціонування повної логістичного ланцюга поставок сухофруктів (ЛПС) в Україні. Проведено аналіз бізнес процесів, що мають місце в ЛПС, який показав, що в порівнянні з іншими системами класу SCM, створення ЛПС породжує ряд специфічних проблем, оскільки такі ланцюга є складні соціо-техніко-економічні системи, що складається з безлічі постачальників сировини (свіжих фруктів ), підприємств-виробників кінцевої продукції (сушіння, упакування), складських терміналів, дистриб'юторів, 3PL і 4PL-провайдерів (роздрібних торговців). В ході аналізу показано також, що управління ЛПС неможливо без проведення їх аналізу на різних рівнях - стратегічному, тактичному і оперативному; для проведення такого аналізу запропоновано використовувати мережеву модель, що включає об'єкти двох типів - центральна ланка, що відображає діяльність фокусної компанії з переробки вихідної сировини (сухофруктів), і ряд підмереж, що моделюють діяльність постачальників сировини і реалізаторів готової продукції. Розглянуто модель повної ЛПС в формі мережі Петрі (СП) і запропонована інтерпретація бізнес процесів в ланцюзі елементами СП. Перераховано особливості, що відрізняють модель ЛПС від класичної мережевої моделі. Наведено змістовна і формальна постановки задачі мінімізації логістичних витрат при функціонуванні ЛПС. Зроблено висновок про необхідність розширення часом мережевий моделі ЛПС для дотримання принципу 'just-in-time' при моделюванні бізнес процесів.

**Ключові слова:** поставки сухофруктів; логістична система; ланцюги поставок; моделювання бізнес процесів; мережа Петрі; мінімізація логістичних витрат.

**Development of the network model for optimizing the dried fruit supply chain in the "just-in-time" mode**

Ya. Rahimi

**Purpose of the article.** Development of a comprehensive information model of the complete logistics chain of supplies of dried fruits to Ukraine. **Results.** The paper deals with modeling of a complete supply chain of dried fruit (DFSC) to Ukraine, with the focus on its creation, deployment and functioning. The analysis of the business processes running within the DFSC has shown that unlike other SCM systems, the creation of DFSC has a number of specific problems. This is due to the fact that these chains are complex socio-technical and economic systems consisting of numerous suppliers of raw materials (fresh fruit), manufacturers of final products (drying, packaging), warehouse terminals, distributors, 3PL and 4PL-providers (retailers). The research has shown that to manage the DFSC properly one needs to analyze its various levels, namely the strategic, tactical and operational ones. An efficient solution for this purpose is a network model that uses objects of two types. The first one includes a central link reflecting the activities of the focal company, processing raw materials (dried fruit). The other one includes a number of sub-networks, modeling the activity of raw material suppliers and finished product retailers. Thus, a model of a complete DFSC has been considered as a Petri net (PN), with its business processes interpreted using the PN elements. The paper also specifies the features distinguishing the DFSC model from a classical network model. The conceptual and formal challenge of the research conducted is to minimize the logistics costs of DFSC functioning. To conclude, it is necessary to extend the time limit in the network model of the DFSC in order to comply with the 'just-in-time' principle, when modeling business processes.

**Keywords:** dried fruit supply chain; logistics system, supply chain; business process modeling; Petri net; logistics costs minimization.

UDC 519.85 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.03**

A. Chugay, Ye. Stoian

A.N. Podgorny Institute for mechanical engineering problems of National Academy of Science, Kharkiv, Ukraine

# CLUSTER PACKING OF CONCAVE NON-ORIENTED POLYHEDRA IN A CUBOID

The **subject matter** of the article is the solution of the problem of optimal packing of concave polyhedra in a cuboid of minimal volume. The **goal** is to construct a mathematical model of the problem under consideration and to develop a solution method. The **task** to be solved are: to develop tools for mathematical modeling of the interaction of two concave non-oriented polyhedra; to construct a mathematical model of the problem of packing concave non-oriented polyhedra in a cuboid of minimal volume; to investigate the peculiarities of the mathematical model; to develop an effective method of solution and implement its software. The **methods** used are: the phi-function technique, the internal point method. The following **results** are obtained. Using the phi-function for two convex non-oriented polyhedra, a phi-function for two concave non-oriented polyhedra is constructed. On the basis of the phi-function, an exact mathematical model of the packing problem for concave polyhedra that allow simultaneous continuous translations and rotations is constructed. The mathematical model is represented as a non-linear programming problem. The properties of the constructed mathematical model are analyzed and a multi-stage approach based on them is proposed, which makes it possible to obtain a good locally optimal solution of the problem posed. Since working with polyhedra is an important to determine the optimal clustering of two objects, one of the stages of the proposed approach is to solve the problem of pairwise clustering of polyhedra. A numerical example demonstrating the effectiveness of the proposed approach is given. **Conclusions**. The scientific novelty of the obtained results consists in the following: an exact mathematical model of the packing problem of concave non-oriented polyhedra is constructed in the form of a nonlinear optimization problem and a multi-stage approach is proposed that allows obtain a good locally optimal solution of the problem.

**Keywords**: cluster packing; concave polyhedra; continuous rotation; nonlinear optimization.

## Introduction

The 3*D* packing problems of concave polyhedra have extensive engineering applications. For example, as actual applications of the problems we can note the following problems: the optimization of the 3*D*-printing process in SLS technologies of additive production [1]; 3*D* simulation of microstructures of different materials (including nanomaterial's) [2]. Also it has a wide spectrum of applications in powder metallurgy, modern biology, mineralogy, materials science, nanotechnology, robotics, pattern recognition systems, control systems, space apparatus control systems, aircraft construction, civil engineering, etc.

It is well known that the 3*D* objects packing problem is NP complex. Because of its NP complexity, it is hard to be solved satisfactorily. So, to find their approximate solution many research works use a wide variety of techniques, including heuristics, traditional optimization methods and different mixed approaches which utilize heuristics and methods of non-linear mathematical programming. The review of this methods is given in [3].

In most works, orientation changes of 3*D* objects either are not allowed or only discrete changes in the orientation for given angles (45 or 90 degrees) are permitted. In [4] authors propose HAPE3D algorithm which can deal with arbitrarily shaped polyhedral which may be rotated around each coordinate axis at four different angles only.

Due to the difficulty of construction of adequate mathematical models at present there are few works that solve the 3D packing problems of concave provided that continuous rotations of geometric objects are allowed.

The solutions of such problems are considered in works [5-6].

This work is devoted to solving of the packing problem of concave polytopes with continuous angles rotations. Our approach is based on mathematical modeling of relations between geometric objects reducing the problem to a nonlinear programming one. To this end we use the phi-function technique for analytic description of objects interactions and objects placements into a container taking into account continuous rotations and translations.

## Problem statement and its mathematical model

Let there be concave polyhedra $P_i$, $i \in I = \{1,2,...,n\}$, and a cuboid

$$C = \{X \in R^3, w_1 \le x \le w_2, l_1 \le x \le l_2, \eta_1 \le x \le \eta_2\},$$

where $w_1, w_2, l_1, l_2, \eta_1$ and $\eta_2$ are variables, i.e. a vector $\zeta = (w_1, w_2, l_1, l_2, \eta_1, \eta_2)$ defines sizes of $C$.

The polyhedra $P_i$ are a union of convex polyhedra

$$P_i = \bigcup_{k=1}^{\varepsilon_i} P_{ik}, i \in I,$$

where polyhedra $P_{ik}$ are given by vertices

$$p_{ikt} = (p_{ikt}^1, p_{ikt}^2, p_{ikt}^3), \quad i \in I, \ k \in K_i = \{1,2,...,\varepsilon_i\}, \quad t \in T_{ik} = \{1,2,...,\rho_{ik}\}.$$

A location of polyhedra $P_i$ in the Euclidean 3D arithmetic space $R^3$ is defined by a translation vector $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ and rotation angles

$$\theta_i = (\phi_i, \psi_i, \omega_i), \quad i \in I.$$

Thus, a motion vector

$$u_i = (v_i, \theta_i) = (x_i, y_i, z_i, \phi_i, \psi_i, \omega_i)$$

gives the location of $P_i$ in $R^3$.

Whence, a vector $u = (u_1, u_2, ..., u_n) \in R^{6n}$ defines the location of $P_i$, $i \in I$, in $R^3$ and, consequently, a complete set of variables makes up a vector $(u, \zeta) = (u_1, u_2, ..., u_n, \zeta) \in R^m$, where $m = 6n + 6$.

In what follows, polyhedra $P_i$ translated by vector $v_i$ and rotated by angles $\phi_i, \psi_i$ and $\omega_i$ is denoted by $P_i(u_i)$ and a cuboid $C$ with variable sizes $s$ is designated as $C(\zeta)$.

Let $V_{ir} = (V_{1ir}, V_{2ir}, V_{3ir})$, $r \in J_i = \{1, 2, ..., \vartheta_i\}$, be vertex coordinates of convex hull of $P_i$. Then a location of $V_{ir}$ and $p_{ikt}$ in $R^3$ are defined by the relations

$$V_{ir}(u_i) = (V_{1ir}(u_i), V_{2ir}(u_i), V_{3ir}(u_i)) = R_i^T V_{ir} + v_i, \quad i \in I, r \in J_i,$$

$$p_{ikt}(u_i) = R_i^T p_{ikt} + v_i, i, j \in I, k \in K_i, t \in T_{ik},$$

where $R_i$ is a rotation operator.

Then the following packing problem arises.

*Basic problem*. Find a vector $u \in R^m$ which insures the arrangement $P_i(u_i)$, $i \in I$, without mutual overlapping's into a cuboid $C(\zeta)$ so that the cuboid volume $H(\zeta)$ will attain the minimal value.

Based on phi-functions (see [3,7]) a mathematical model of the problem takes the form

$$H(\zeta^*) = \min H(\zeta) \ \ s.t. (u, \zeta) \in \Lambda \subset R^m, \qquad (1)$$

where

$$\Lambda = \{(u, \zeta) \in R^m : \Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0, i < j \in I, \Phi_i(u_i, \zeta) \geq 0, i \in I, F(\zeta) \geq 0\}; \qquad (2)$$

$$H(\zeta) = (w_2 - w_1)(l_2 - l_1)(\eta_2 - \eta_1),$$

$$F(\zeta) = \min\{w_2 - w_1, l_2 - l_1, \eta_2 - \eta_1\},$$

$$\Phi_i(u_i, \zeta) = \min\{\phi_{io}^r(u_i, \zeta), o \in O_2 = \{1, 2, ..., 6\}, r \in J_i\},$$

$$\phi_{i1}^r(u_i, \zeta) = V_{1ir}(u_i) - w_1, \phi_{i2}^r(u_i, \zeta) = w_2 - V_{1ir}(u_i),$$
$$\phi_{i3}^r(u_i, \zeta) = V_{2ir}(u_i) - l_1, \phi_{i4}^r(u_i, \zeta) = l_2 - V_{2ir}(u_i),$$
$$\phi_{i5}^r(u_i, \zeta) = V_{3ir}(u_i) - \eta_1, \phi_{i6}^r(u_i, \zeta) = \eta_2 - V_{3ir}(u_i).$$

Here the inequality $\Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0$ insures non-overlapping $P_i$ and $P_j$, the inequality $\Phi_i(u_i, \zeta) \geq 0$ provides a containment of $P_i$ into $C(\zeta)$ i.e. $\Phi_i(u_i, \zeta)$ is the phi-function for $P_i$ and

$$B(\zeta) = R^3 \setminus \operatorname{int} C(\zeta)$$

where $\operatorname{int} C(\zeta)$ is the interior of $C$.

Since $P_i = \bigcup_{s=1}^{\varepsilon_i} P_{is}$ and $P_j = \bigcup_{p=1}^{\varepsilon_j} P_{jp}$ then $P_i \cap P_j = \varnothing$ if $P_{is} \cap P_{jp} = \varnothing$, $s \in K_i$, $p \in K_j$. This means that

$$\Phi_{ij}(u_i, u_j) = \min\{\Phi_{ij}^{sp}(u_i, u_j), s \in K_i, p \in K_j\},$$

where $\Phi_{ij}^{sp}(u_i, u_j)$ is the phi-function for $P_{is}$ and $P_{jp}$ [7]. Hence, $\Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0$ if the following condition if fulfilled

$$\min\{\Phi_{ij}^{sp}(u_i, u_j), s \in K_i, p \in K_j\} \geq 0.$$

## Clustering of polyhedra

In order to obtain starting point for the problem (1)-(2) the following step by steps procedure is offered. Firstly polyhedra are in pair packed into clusters to be cuboids and spheres of the minimal volumes. Next the cuboids and spheres are placed into a cuboid of the minimal volume. Then having taken the polyhedra instead of cuboids and spheres packed into the cuboid we pack the polyhedra into a cuboid of the minimal volume.

Let $P_i$, $i \in I$, consists of $k$ groups each from which contains $l_k$ identical polyhedra. We cluster in pairs $P_i$, $i \in I$, into cuboids $Q_{ij}$ of the minimal volumes $D_{ij}^C$, $i < j \in K = \{1, 2, ...k\}$. To this end we solve the problems

$$D_{ij}^C = H_{ij}(\zeta^\Diamond) = \min H(\zeta), \quad s.t. (u_i, u_j, \zeta) \in \Omega_{ij} \subset R^{16}, \ i < j \in I, \qquad (3)$$

where

$$\Omega_{ij} = \{(u_i, u_j, \zeta) \in R^{16} : \Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0, \Phi_i(u_i, \zeta) \geq 0, \Phi_j(u_j, \zeta) \geq 0, F(\zeta) \geq 0\}. \qquad (4)$$

The inequality

$$\Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0$$

insures $intP_i \cap intP_j = \varnothing$ and $\Phi_i(u_i, \zeta) \geq 0$ guarantees placement of $P_i$ within $C_{ij}(\zeta)$.

After that we cluster in pairs $P_i$, $i \in I$, into spheres $S_{ij}$ of the minimal volumes $D_{ij}^S$, $i < j \in K = \{1, 2, ...k\}$. Then we solve the problems

$$D_{ij}^S = \frac{4}{3}\pi \min R_{ij}^3, \quad s.t. (u_i, u_j, R_{ij}) \in \Omega_{ij} \subset R^{16}, \ i < j \in I, \qquad (5)$$

where

$$\Omega_{ij} = \{(u_i, u_j, R_{ij}) \in R^{16}:$$

$$\Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0, \Phi_i(u_i, R_{ij}) \geq 0, \quad (6)$$

$$\Phi_j(u_j, R_{ij}) \geq 0, F(R_{ij}) \geq 0\}.$$

The inequality

$$\Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0$$

insures

$$intP_i \cap intP_j = \varnothing$$

and

$$\Phi_i(u_i, \zeta) =$$

$$= (V_{1ir}(u_i))^2 + (V_{2ir}(u_i))^2 + (V_{3ir}(u_i))^2 - R_{ij}^2 \geq 0,$$

guarantees placement of $P_i$ within $S_{ij}(R_{ij})$ (10).

Note that local extrema of the problems (3)-(4) and (5)-(6) are calculated in the same way as a local minimum point of the problem (1)-(2). For local optimization we used the IPOPT code (https://projects.coin-or.org/Ipopt).

Let $P_i$, $i \in I$, consists of $k$ groups each from which contains $l_k$ identical polyhedra. We construct clusters pack in pairs $P_i$, $i \in I$, into cuboids $Q_{ij}$ of the minimal volumes $D_{ij}$, $i < j \in K = \{1, 2, ...k\}$.

Now we compute

$$\delta_{ij}^C = (D_i + D_j) / D_{ij}^C$$

and

$$\delta_{ij}^S = (D_i + D_j) / D_{ij}^S,$$

$$i < j \in K = \{1, 2, ...k\},$$

and find

$$\delta_{sp} = \max\{\delta_{ij}^C, \delta_{ij}^S, i < j \in K\}.$$

If $\delta_{sp} = \delta_{ij}^C$ then we generate identical cuboids

$$Q_i = Q_{sp}, \; i = 1, 2, ..., k_{sp} = \min\{l_s, l_p\}.$$

In addition, if $k_{sp} = l_s$ ($k_{sp} = l_p$) then we exclude $s$ ($p$) from $K$.

If $k_{sp} = l_s = l_p$ then we omit $s$ and $p$ from $K$. If $\delta_{sp} = \delta_{ij}^S$ then we generate identical spheres

$$S_j = S_{sp}, \; i = 1, 2, ..., k_{sp} = \min\{l_s, l_p\}.$$

In addition, if $k_{sp} = l_s$ ($k_{sp} = l_p$ then we exclude $s$ ($p$) from $K$.

If $k_{sp} = l_s = l_p$ then we omit $s$ and $p$ from $K$.

After that we define

$$\delta_{rt} = \max\{\delta_{ij}^C, \delta_{ij}^S, i < j \in K \setminus \{\lambda_{sp}\}\},$$

where either $\lambda_{sp} = s$ or $\lambda_{sp} = p$ or $\lambda_{sp} = \{s, p\}$ and so on until $K$ is exhausted.

As a result sets of cuboids $C_i$, $i = 1, 2, ..., \mu_1$, and spheres $S_i$, $i = 1 + \mu_1, 2 + \mu_1, ..., \mu = \mu_1 + \mu_2$, are formed. For the sake of convenience we rename

$$C_i, \; i = 1, 2, ..., \mu_1,$$

and spheres

$$S_i, \; i = 1 + \mu_1, 2 + \mu_1, ..., \mu = \mu_1 + \mu_2,$$

as $Q_i$, $i \in M = \{1, 2, ..., \mu\}$.

Thus each cluster $Q_i$ contains pair of polyhedra $P_{k_i}$ and $P_{t_i}$ with placement parameters $u_{k_i}^C$ and $u_{t_i}^C$ with respect to the local coordinate system of $Q_i$. Next we solve a packing problem of $Q_i$, $i \in M$, into a cuboid $C$ of the minimal volume. We suppose that a location of cluster $Q_j$ in $R^3$ is defined by a vector

$$\gamma_j = (\upsilon_j, \xi_j) = (x_{1j}, y_{1j}, z_{1j}, \xi_{1j}, \xi_{j2}, \xi_{j3}) \in R^6, \; j \in M.$$

Then a mathematical model of the packing problem has the form

$$H(\zeta^\Diamond) = \min H(\zeta), \; s.t. \, (\gamma, \zeta) \in \Omega \subset R^{(6n+1)}, \quad (7)$$

where

$$\Omega = \{(u, \zeta) \in R^{6n+1} : \Phi_{ij}(\gamma_i, \gamma_j) \geq 0, i < j \in M, \; \Phi_i(\gamma_i, \zeta) \geq 0, \; i \in T, \; F(\zeta) \geq 0\}. \quad (8)$$

The inequality

$$\Phi_{ij}(\gamma_i, \gamma_j) \geq 0$$

insures

$$intQ_i \cap intQ_j = \varnothing \text{ and } \Phi_i(\gamma_i, \zeta) \geq 0$$

guarantees placement of $Q_i$ within $C(\zeta)$.

Searching for an approximation to a global minimum point of the problem is realized by methods which are presented in the papers [8, 9].

Let $(\gamma^\Diamond, \zeta^\Diamond) \in R^{6(n+1)}$ be an approximation to a global minimum point of the problem (7)-(8). To the point $(\gamma^\Diamond, \zeta^\Diamond)$ there corresponds the arrangement of clusters $Q_i(\gamma_i^\Diamond)$, $i \in M$ into the cuboid $C(\zeta^*)$ and each cluster contains a pair of polyhedra $P_{k_i}$ and $P_{t_i}$ with placement parameters $u_{k_i}^{C*}$ and $u_{t_i}^{C*}$. It permits to take appropriate polyhedra $P_i$, $i \in I$, instead of clusters $Q_i$, $i \in M$, and form a starting point $(u^0, \zeta^0) = (u^0, \zeta^*)$ for the problem (1)-(2).

Construction of the point is executed by the special problem that called “inverse rotation”.

## Multistage solution approach

A solution strategy (3D MultiStage Approach (3D-MSA)) can be described by the following stages.

1. Pack in pair polyhedra $P_i$, $i \in I$, into cuboids $C_i$, $i = \{1,2,..,\mu_1\}$, and spheres $S_i$, $i = 1+\mu_1, 2+\mu_1, ..., \mu = \mu_1 + \mu_2$, of minimum volumes. For optimal clustering of two polyhedrons also we can apply quasi phi-function technique. This approach presented in [10].

2. Cover polyhedra $P_i$ by spheres $S_i$, with centers $v_i$, $i \in I$; cover convex polyhedra $P_{ik}$ by spheres $S_{ik}^t$ of minimal radius $\rho^0$ and centers $v_{ik}^t = (x_{1i}^k, y_{2i}^k, z_{3i}^k)$, $i \in I$, $k \in K_i$.

3. Solve the packing problem of cluster $Q_i$, $i \in M = \{1,2,...,\mu\}$. Wherein, if $Q_i$, $i \in M = \{1,2,...,\mu\}$ is set of cuboids $C_i$ then we solve packing problem of parallelepipeds with the feasibility of changing their orthogonal orientation [8]. And if $Q_i$, $i \in M = \{1,2,...,\mu\}$ is set of cuboids $C_i$ and spheres $S_i$ then we solve packing problem of cuboids and spheres using approach proposed in [9]. As a result we obtain local minimum point $(\gamma^\diamond, \zeta^\diamond) \in R^{6(n+1)}$.

4. Replace clusters $Q_i$, $i \in M$, with corresponding polyhedra $P_i$, $i \in I$. In order to form a starting point $(u^0, \zeta^0)$ for the problem (1)-(2) we solve $n$ auxiliary non-linear optimization problems (“inverse rotation”) to define vector $u^0$ based on $\gamma^\diamond$. As a result we derive a point $(u^0, \zeta^0) \in R^{6(n+1)}$ on the ground of the point $(\gamma^\diamond, \zeta^\diamond) \in R^{6(n+1)}$.

5. Fix $\theta^0$ and find a local minimum point $X^*$ of the problem

$$H(\zeta^*) = \min H(\zeta) \;\; s.t. \; X \in Q \subset R^{3n+6} \qquad (9)$$

where

$$Q = \{X = (v,\zeta) \in R^{3n+6} : \Phi_{ij}(v_i, v_j) \ge 0, i < j \in I, \; \Phi_i(v_i, \zeta) \ge 0, i \in I, F(\zeta) \ge 0\}. \qquad (10)$$

As a starting point of problem (9)-(10) we take point $(v^0, \zeta^0)$. Since rotation angles are fixed then inequality sysytem (10) is linear.

6. Form a starting point $(u^0, \zeta^0) = (v^*, \theta^0, \zeta^*)$, and calculate a local minimum point $(u^{0*}, \zeta^{0*})$ of the problem (1)-(2).

## Numerical results

Here presented an example that demonstrates the efficiency of proposed methodology.

We have run our experiments on an Intel Core I5 750 computer and for local optimisation we used the IPOPT code (https://projects.coin-or.org/Ipopt).

We consider the collection of polytopes of example 1 given in [4]. In fig. 1 depicted five types of polyhedrons that need to pack.

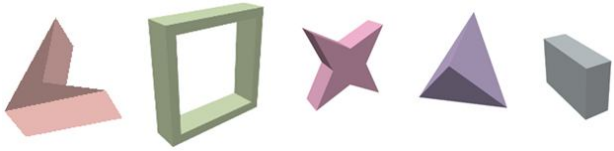


**Fig. 1.** Five types of polyhedrons

Figure 2 presents clusters $Q_i$ used for solving problem (7)-(8).

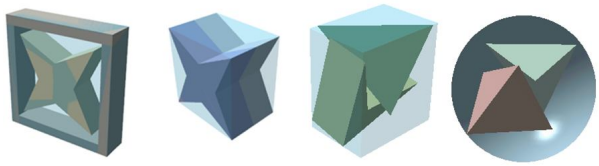


**Fig. 2.** Clusters $Q_i$

Fig. 3 shows the results obtained on each stage of 3D-MSA of optimal placement of 36 polyhedrons. The container has volume $H^* = 10720$.

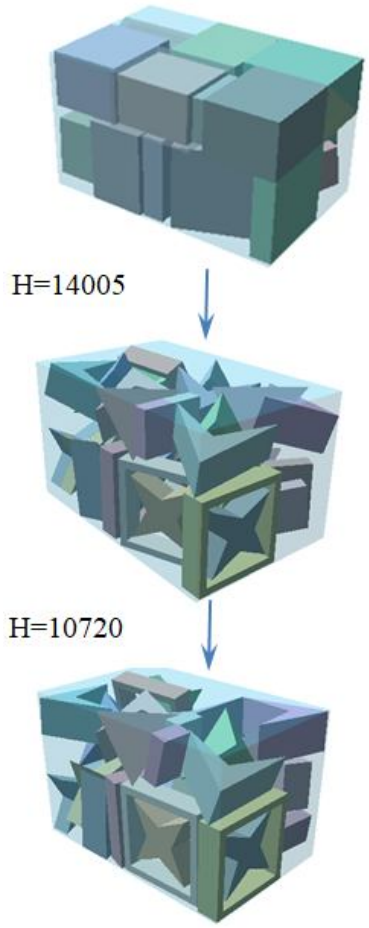
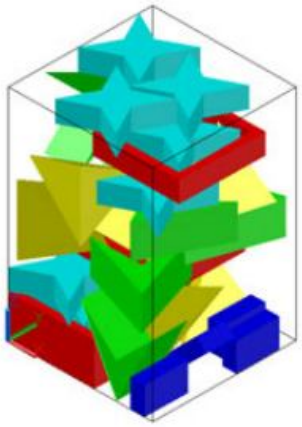
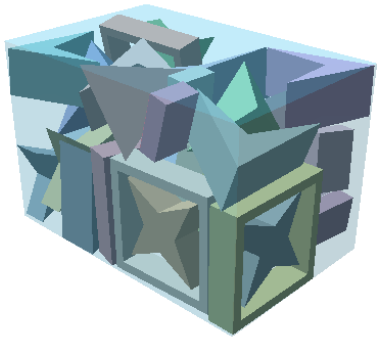



**Fig. 3.** Solution stages of 3D-MSA

As shown in table 1, the 3D-MSA allows us to reduce the container volume. The packing efficiency is significantly improved by 14%. At the same time, the solution time is less by 60%.

*Table 1.* **Comparison of HAPE3D and 3D-MSA**

| | HAPE3D | 3D-MSA |
|---|---|---|
| H* | 12480 | 10720 |
| Time (s) | 9637 | 3789 |
| layout |  |  |

## Conclusions

The paper presents an exact mathematical model of packing optimization problem of concave polyhedra which are allowed both translations and continuous rotations.

The phi-functions enable us to apply state-of-the art methods of nonlinear optimization on all solution stages of the problem (1)-(2) including the construction of starting points, the calculation of local extrema and searching for of "approximations" to global extrema.

Iterative processes being used to solve the problem can be easily parallelized.

Numerical results above have shown effectively of solution approach offered when tackling optimization 3D packing problems.

Optimization approaches worked out in the paper can be used for solving other packing optimization problems.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ


1. Оптимізація процесу 3D-друку для SLS технології адитивного виробництва / А. М. Чугай, О. В. Панкратов, Т. Є. Романова, Ю. Є. Стоян // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава : ПНТУ, 2017. – С. 127-130.
2. Wang Y. 3D image segmentation for analysis of multisize particles in a packed particle bed / Y. Wang, C. L. Lin, J. D. Miller // Powder Technology. – 2016. – 301, P. 160-168.
3. Optimized object packings using quasi-phi-functions / Y. Stoyan, T. Romanova, A. Pankratov, A. Chugay // Springer Optimization and Its Applications. – 2015. – Vol. 105. – P. 265-293.
4. Liu X. HAPE3D-a new constructive algorithm for the 3D irregular packing problem / X. Liu, J. Liu, A. Cao // Frontiers Inf. Technol. Electronic Eng. – 2015. – № 16. – P. 380-390.
5. Packing of concave polyhedra with continuous rotations using nonlinear optimisation / T. Romanova, J. Bennell, Y. Stoyan, A. Pankratov // European Journal of Operational Research. – 2018. – № 268 (1). – P. 37-53.
6. Pankratov A.V. Optimal packing of convex polytopes using quasi-phi-functions / A. V. Pankratov, T. E. Romanova, A. M. Chugay // Проблемы машиностроения. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 55-65.
7. Stoyan Y. G. Mathematical modeling of the interaction of non-oriented convex polytopes / Y. G. Stoyan, A. M. Chugay // Cybernetics and Systems Analysis. – 2012. – № 48(6). – P. 837-845.
8. Grebennik I. V. Packing n-dimensional parallelepipeds with the feasibility of changing their orthogonal orientation in an n-dimensional parallelepiped / A. V. Pankratov, A. M. Chugay, A. V. Baranov // Cybernetics and Systems Analysis. – 46 (5). – P. 793-802.
9. Stoyan Y.G. Packing different cuboids with rotations and spheres into a cuboid / Y. G. Stoyan, A. M. Chugay // Advances in Decision Sciences. – 2014. – available at: http://dx.doi.org/10.1155/2014/571743.
10. Стоян Ю.Є. Оптимальная кластеризация многогранников / Ю.Є. Стоян, О.В. Панкратов, Т.Є. Романова // Біоніка інтелекту. – 2017. – № 2. – С. 12-22.


REFERENCES


1. Chugay, A.M., Pankratov, A.V., Romanova, T.E. and Stoian, Yu.E. (2017) “Optimization of the process of 3D-printing for SLS technologies of additive production”, *Systems of control, navigation and communication*, No. 6(46), pp. 127-130.
2. Wang, Y., Lin, C.L., Miller, J.D. (2016) “3D image segmentation for analysis of multisize particles in a packed particle bed”, Powder Technology. No. 301, pp. 160–168.

3. Stoyan, Y.G., Romanova, T., Pankratov, A. and Chugay, A. (2015) "Optimized object packings using quasi-phi-functions", *Springer Optimization and Its Applications*, Vol. 105, pp. 265-293.
4. Liu, X., Liu, J. and Cao, A. (2015), "HAPE3D-a new constructive algorithm for the 3D irregular packing problem", *Frontiers Inf Technol Electronic Eng*., No. 16., pp. 380-390.
5. Romanova, T., Bennell, J., Stoyan, Y. and Pankratov, A. (2018) "Packing of concave polyhedra with continuous rotations using nonlinear optimisation", *European Journal of Operational Research*, No. 268 (1), pp. 37-53.
6. Pankratov, A.V. Romanova, T.E. and Chugay, A.M. (2015), "Optimal packing of convex polytopes using quasi-phi-functions, *Problems of mechanical engineering*, No. 18 (2), pp. 55-65.
7. Stoyan, Y.G. and Chugay, A.M. (2012), "Mathematical modeling of the interaction of non-oriented convex polytopes", *Cybernetics and Systems Analysis*, No. 48 (6). pp. 837-845.
8. Grebennik, I.V, Pankratov, A.V., Chugay, A.M. and Baranov, A.V. (2010), "Packing n-dimensional parallelepipeds with the feasibility of changing their orthogonal orientation in an n-dimensional parallelepiped", *Cybernetics and Systems Analysis*, No. 46 (5). pp. 793-802.
9. Stoyan, Y.G. and Chugay, A.M. (2014), "Packing different cuboids with rotations and spheres into a cuboid Advances in Decision Sciences", *Advances in Decision Sciences*, available at: http://dx.doi.org/10.1155/2014/571743.
10. Stoian, Y., Pankratov, A. and Romanova, T. (2017), "Optimal clustering of polyhedra", *Bionika intellekta*, No. 2, pp. 12-22.

Received (Надійшла) 14.02.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.04.2018

**Кластерна упаковка неопуклих неорієнтованих багатогранників у кубоід**

А. М. Чугай, Ю. Є. Стоян

**Предметом** вивчення у статті є розв'язання задачі оптимальної упаковки неопуклих багатогранників у прямий паралелепіпед мінімального об'єму. **Метою** є побудова математичної моделі даної задачі і розробка методу розв'язання. **Задачі**: розробити засоби математичного моделювання взаємодії двох неопуклих неорієнтованих багатогранників; побудувати математичну модель задачі упакування неопуклих неорієнтованих багатогранників в кубоід мінімального об'єму; дослідити особливості математичної моделі; розробити ефективний метод розв'язання і виконати його програмну реалізацію. Використовуваними **методами** є: метод phi-функцій, метод внутрішньої точки. Отримані наступні **результати**. Використовуючи phi-функцію для двох опуклих неорієнтованих багатогранників, побудована phi-функція для двох неопуклих неорієнтованих багатогранників. На основі цієї phi-функції побудована точна математична модель задачі упаковки неопуклих багатогранників, що допускають одночасно безперервні трансляції та повороти. Математична модель представлена у вигляді задачі нелінійного програмування. Проаналізовано властивості побудованої математичної моделі і на їх основі запропонований багатоетапний підхід, що дозволяє отримати гарний локально оптимальний розв'язок поставленої задачі. Оскільки при роботі з багатогранниками важливою задачею є визначення оптимальної кластеризації двох об'єктів, то одним з етапів запропонованого підходу є розв'язання задачі попарної кластеризації багатогранників. Наводиться чисельний приклад, який демонструє ефективність запропонованого підходу. **Висновки**. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: побудована точна математична модель задачі упаковки неопуклих неорієнтованих багатогранників у вигляді задачі нелінійної оптимізації та запропонований багатоетапний підхід, що дозволяє отримати гарне локально оптимальний розв'язок поставленої задачі.

**Ключові слова**: кластерна упаковка; неопуклі багатогранники; безперервне обертання; нелінійна оптимізація.

**Кластерная упаковка невыпуклых неориентированных многогранников в кубоид**

А. М. Чугай, Ю. Е. Стоян

**Предметом** изучения в статье является решение задачи оптимальной упаковки невыпуклых многогранников в прямой параллелепипед минимального объема. **Целью** является построение математической модели рассматриваемой задачи и разработка метода решения. **Задачи:** разработать средства математического моделирования взаимодействия двух невыпуклых неориентированных многогранников; построить математическую модель задачи упаковки невыпуклых неориентированных многогранников в кубоид минимального объема; исследовать особенности математической модели; разработать эффективный метод решения и выполнить его программную реализацию. Используемыми **методами** являются: метод phi-функций, метод внутренней точки. Получены следующие **результаты**. Используя phi-функцию для двух выпуклых неориентированных многогранников, построена phi-функция для двух невыпуклых неориентированных многогранников. На основании этой phi-функции построена точная математическая модель задачи упаковки невыпуклых многогранников, допускающих одновременно непрерывные трансляции и повороты. Математическая модель представлена в виде задачи нелинейного программирования. Проанализированы свойства построенной математической модели и на их основе предложен многоэтапный подход, позволяющий получить хорошее локально оптимальное решение поставленной задачи. Поскольку при работе с многогранниками важной задачей является определение оптимальной кластеризации двух объектов, то одним из этапов предложенного подхода является решение задачи попарной кластеризации многогранников. Приводится численный пример, демонстрирующий эффективность предложенного подхода. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: построена точная математическая модель задачи упаковки невыпуклых неориентированных многогранников в виде задачи нелинейной оптимизации и предложен многоэтапный подход, позволяющий получить хорошее локально оптимальное решение поставленной задачи.

**Ключевые слова:** кластерная упаковка; невыпуклые многогранники; непрерывное вращение; нелинейная оптимизация.

# Methods of information systems synthesis

УДК 004.728 : 519.87 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.04**

А. А. Коваленко [1], Г. А. Кучук [2]

[1] *Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна*
[2] *Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна*

## МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТА ТЕХНІЧНОЇ СТРУКТУР СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

**Предметом** вивчення в статті є процеси синтезу структур системи управління (СУ) об'єктом критичного застосування (ОКЗ). **Метою** є розробка методів синтезу інформаційної та технічної структур СУ ОКЗ. **Завдання:** 1) отримати формалізовані описи задач, що виникають при синтезі організаційної структури СУ; 2) обрати оптимальну структуру комп'ютерної системи (КС), що забезпечує функціонування СУ ОКЗ та її підсистем; 3) отримати формалізовані описів задач, що виникають при синтезі технічної структури КС СУ ОКЗ. Для цього використовувались **методи** теорії множин та цілочисельного програмування з булевими змінними. Отримано такі **результати.** Запропоновано методи синтезу інформаційної та технічної структур СУ ОКЗ. У першому з них враховуються задачі управління компонентами СУ, алгоритми і методи розв'язання задач, а також розподіл задач по компонентах в процесі їх розв'язання. Сформульовано критерій якості і можливі обмеження. Окремо порушено питання синтезу організаційної структури СУ, яке є одним з основоположних. Другий метод складається з двох етапів, що включають синтез найменшої можливої сукупності компонентів для реалізації СУ, їх розташування в рамках відповідної КС, кількості і характеру взаємозв'язків між компонентами, а також синтез прийнятних варіантів реалізації кожного з компонентів і взаємозв'язків. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: вперше розроблено методи синтезу інформаційної структури СУ ОКЗ та технічної структури відповідної КС, що лежить в основі такої СУ.

**Ключові слова:** синтез; управління; структура; система; мережа; компонент; формалізація; зв'язок.

## Вступ

Задача синтезу структур сучасних СУ різними об'єктами є комплексною проблемою, вирішення якої неможливо без попередньої декомпозиції, структуризації і формалізації.

До теперішнього часу багатьма авторами описано ряд можливих підходів і рішень як до синтезу структур обчислювальних мереж для ієрархічних систем управління, так і до синтезу структур інформаційно-телекомунікаційних мереж, а також багаторівневих інформаційних структур інтеграційних компонентів їх гетерогенних складових [1 – 8]. До основних етапів синтезу СУ можна віднести такі:

– синтез організаційної структури системи управління та синтез (разом з рішенням задач стратифікації) інформаційної структури КС, що забезпечує функціонування системи управління;

– синтез технічної структури КС.

Основною задачею синтезу організаційної структури СУ об'єктом є розробка логічної структури організації такої СУ, включаючи її основні компоненти і взаємозв'язки між ними. Результатом синтезу інформаційної структури є структура КС, за допомогою якої реалізується управління процесом функціонування системи управління, спрямованої на розв'язання задач певних класів. Така структура є логічною сукупністю необхідних компонентів управління, стратифікованих за відповідними рівнями, а також зав'язків між компонентами і рівнями, які забезпечують обмін як службовою інформацією, так і даними, що особливо важливо для системи управління ОКЗ.

Синтез технічної структури КС включає розробку фізичної структури для отриманої на попередньому етапі інформаційної структури комп'ютерної системи.

Крім того, в процесі синтезу СУ, на кожному з етапів, розподіл сукупності задач, що розв'язуються, за сукупністю використовуваних компонентів КС має прагнути до екстремуму по заданому критерію якості з обов'язковим урахуванням усіх обмежень, що застосовуються.

**Метою статті** є розробка методів синтезу інформаційної та технічної структур системи управління ОКЗ, що дозволяють, відповідно:

– отримати формалізовані описи задач, що виникають при синтезі організаційної структури системи управління, а також задач вибору оптимальної структури та логіки КС, що забезпечує функціонування системи управління (включаючи її підсистеми), в тому числі тих, які можна застосувати до ОКЗ;

– отримати формалізовані описів задач, що виникають при синтезі технічної структури КС системи управління ОКЗ.

## Метод синтезу інформаційної структури системи управління ОКЗ

У процесі синтезу структури системи управління ОКЗ основними етапами є такі:

1) формалізація структури і компонентів системи управління, включаючи визначення необхідної кількості компонентів і необхідної кількості рівнів, за якими вони повинні бути розподілені;

2) формалізація взаємозв'язків між компонентами СУ, включаючи визначення принципів управ-

ління і відтворення необхідних зв'язків в загальній ієрархії рівнів управління;

3) формалізація задач, що реалізуються такими СУ, включаючи їх оптимальний розподіл по компонентах.

Організаційна структура СУ повинна давати однозначну відповідь на питання розподілу процесів по підсистемах різних рівнів, а також розподілу всієї сукупності можливих функцій управління і методів їх реалізації по необхідним підсистемам.

При розв'язанні задачі синтезу організаційної структури СУ потрібно визначити:

- множини принципів і методів управління, які повинні реалізовуватися СУ, що синтезується;
- достатньої множини взаємопов'язаних функцій, що реалізуються СУ;
- множини компонентів СУ, взаємопов'язаних між собою і стратифікованих за рівнями;
- відображення елементів множини взаємопов'язаних функцій, що реалізуються СУ, на множину компонентів СУ.

Важливою задачею початкового етапу синтезу є визначення та формалізація вимог до СУ. Реалізація вимог системою управління можливо багатьма способами, що найбільш зручно формалізується за допомогою математичного апарату теорії графів. Таким чином, стає можливою формалізація взаємозв'язків для СУ, що синтезується, а також опис збору, перетворення, обробки і виведення інформації.

При побудові графів можливе розв'язання задач розподілу певних елементів по множині доступних ресурсів. При відображенні множини взаємопов'язаних функцій і задач СУ об'єктом КЗ, які задані у вигляді відповідних графів, на множину компонентів СУ можна отримати орієнтований мультиграф, окремі частини якого відповідають можливим варіантам розподілу функцій по компонентах СУ, а дуги відображають взаємозв'язки між компонентами.

Оптимальним варіантом реалізації організаційної структури СУ об'єктом КЗ буде підграф орієнтованого мультиграфа, який одночасно є допустимим варіантом реалізації організаційної структури СУ.

Таким чином, модель структури СУ може бути представлена орієнтованим графом

$$G_s = \left(V_D, R_F, \Theta\right),$$

де $V_D = \{v_d;\ d = \overline{1, d_0}\}$ – множина можливих варіантів організації даних; $R_F = \{r_f;\ f = \overline{1, f_0}\}$ – множина можливих варіантів реалізації функцій; $\Theta = \left(\theta_{df}\right)$, $d = \overline{1, d_0}; f = \overline{1, f_0}; \dim\Theta = d_0 \times f_0$ – матриця, що відображує взаємозв'язок даних і функцій. При цьому $\theta_{df} = 1$, якщо для формування множини даних $v_d$ використовується функція RF та $\theta_{df} = 0$ інакше.

На такому графі G можливе завдання варіантів реалізації даних і способів їх формування, за допомогою функцій, з інших даних СУ, що дозволяє відображати варіанти перетворення вхідних даних у вихідні дані з метою вибору оптимального варіанту при заданих критеріях оптимальності і обмеженнях, що існують.

Вихідну інформацію для синтезу інформаційної структури КС представлено вимогами до характеристик її якості. Послідовність окремих задач, що розв'язуються при синтезі СУ об'єктом КЗ, виглядає таким чином:

– розробка моделі інформаційної структури КС з описом входів і виходів, а також відповідними процедурами обробки даних;

– аналіз варіантів обробки і представлення даних стосовно реалізації компонентів КС, що використовується, на основі апарату графів;

– детальний аналіз, включаючи аналіз допустимих варіантів побудови, синтезованого графа в аспекті реалізації входів-виходів і обробки даних КС;

– визначення оптимального варіанту інформаційної структури КС.

Однією з найбільш актуальних наукових задач етапу синтезу СУ є формалізація задачі вибору оптимального варіанту інформаційної структури. Розглянемо загальний підхід, коли множину задач $i = \overline{1, I}$, що мають множину варіантів розв'язання $v_i = \overline{1, V_i}$, можливо розбити на множину етапів $\ell_{iv_i} = \overline{1, L_{iv_i}}$, які можуть виконуватися множиною можливих варіантів $v_{\ell_{iv_i}} = \overline{1, V_{\ell_{iv_i}}}$ на множині доступних компонентів $j = \overline{1, J}$ системи, що має множину варіантів побудови $w_j = \overline{1, W_j}$. Окрім того, за допомогою $n_{ij}$ позначимо максимальну кількість етапів обраного варіанту $i$-ої задачі, що розв'язується в $j$-му компоненті КС. При такій нотації стає можливим сформулювати задачу синтезу інформаційної структури КС таким чином [1]:

$$P_{iv_{\ell_{iv_i}}}\left(x_{iv_{\ell_{iv_i}}}, x_{i\ell_{iv_i}}, x_{i\ell_{iv_i}j}, x_{jw_j}\right) \to opt,$$

де $P$ – показники якості, що оптимізуються; $x_{iv_{\ell_{iv_i}}}, x_{i\ell_{iv_i}}, x_{i\ell_{iv_i}j}\ ma\ x_{jw_j}$ є булевими змінними, що приймають одиничні значення тільки в разі вибору відповідних етапів або варіантів.

Таксономію введених нотацій наведено на рис. 1.

Обмеження на однозначність вибору з представленого числа можливих варіантів розв'язання задач може бути представлено у вигляді такого виразу [1]:

$$\sum_{v_{\ell iv_i}=1}^{V_{\ell iv_i}} x_{iv_{\ell iv_i}} = 1,$$

де $i = \overline{1, I}$ – множина задач.

Обмеження на відсутність дублювання етапів безпосереднього розв'язання задачі, кожен з яких може бути реалізований тільки одним певним компонентом системи, може бути представлено як [1]:

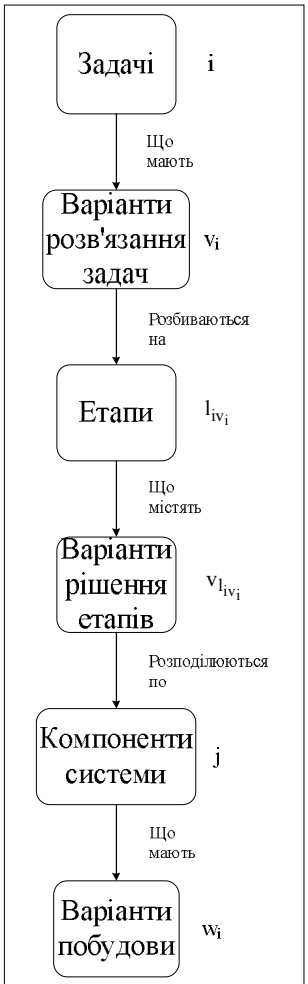



**Рис. 1.** Таксономічна схема взаємозв'язку утворюючих інформаційної структури КС

$$\sum_{j=1}^{J} x_{\ell_{iv_i} ij} = 1,$$

де $i = \overline{1, I}$ – множина задач; $\ell_{iv_i} = \overline{1, L_{iv_i}}$ – допустима множина етапів розв'язання кожної із задач. Обмеження на максимальну кількість задач $M$, яке допустимо реалізацією системи, має вигляд [1]:

$$\sum_{i=1}^{I} \sum_{v_{\ell_{iv_i}}=1}^{V_{\ell_{iv_i}}} x_{iv_{\ell_{iv_i}}} \le M .$$

Оскільки, в загальному випадку, кожна задача з множини задач, що реалізуються системою, яка синтезується, може реалізовуватися деякою сукупністю компонент такої системи, є справедливим обмеження [1]:

$$\sum_{j=1}^{J} x_{i\ell_{iv_i} j} = 1 .$$

Таким чином, стає можливим завдання умови типу логічного «І» між деякими компонентами j, що реалізують певні задачі або етапи $j$ $N_{jw_j}\left(N_{iv_{\ell_{iv_i}}}, N_{i\ell_{iv_i} j}\right)$, і пов'язаним з ними множиною компонентів, задач або етапів: якщо $x_{iw_j} = 1$, то $x_{i'w'_j} = 1$ для усіх $j'w'_j \in N_{jw_j}$. Така умова має наступний вигляд [1]:

$$\left(\prod\nolimits_{j'w'_j \in N_{jw_j}} x_{j'w'_j} - 1\right) x_{jw_j} = 0 .$$

Як слідство з вищенаведеної умови, можлива умова типу логічного «АБО», яка формулюється для випадку, коли необхідно виконання рівності $x_{j'w'_j} = 1$ тільки для єдиного $j'w'_j$ з заданої множини $M_{jw_j}$ при $x_{jw_j} = 1$ [1]:

$$\left(\sum_{j'w'_j \in M_{jw_j}} x_{j'w'_j} - 1\right) x_{jw_j} = 0 .$$

Обмеження на недопущення розв'язання в безпосередньо не пов'язаних компонентах взаємопов'язаних етапів $\ell_{iv_i}$ та $\ell'_{iv_i}$ однієї задачі [1]:

$$\sum_{i,\ell_{iv_i},j} \theta_{jj'} x_{i\ell_{iv_i} j} x_{i'\ell'_{iv_i} j'} = 1 ,$$

де $\theta_{jj'} = 1$ при наявності безпосереднього зв'язку між компонентами j та $j'$ КС.

## Метод синтезу технічної структури комп'ютерної системи, що забезпечує функціонування системи управління ОКЗ

У процесі синтезу СУ об'єктом КЗ необхідно визначити оптимальне відображення множини взаємопов'язаних функцій управління на множину взаємопов'язаних компонентів КС, представлених певними технічними засобами (ТЗ). До таких ТЗ існує ряд вимог, що пред'являються, включаючи економічні вимоги на їх створення, експлуатацію та модифікацію, вимоги до оперативності реалізації функцій, а також вимоги до надійності.

Під час синтезу СУ об'єктом КЗ, крім задач розподілу функцій СУ між множиною компонентів системи відповідно до визначених критеріїв, виникають задачі вибору ТЗ і каналів зв'язку в контексті гарантування певних характеристик СУ.

В даний час існують різні підходи і моделі, що використовуються для розв'язання задач синтезу СУ; вони передбачають послідовність характерних етапів [9]:

– визначення кількості, розташування і складу компонентів КС СУ для кожного з можливих класів управління, що дозволяє виконати мінімізацію витрат на реалізацію таких компонентів;

– визначення варіантів реалізації та складу компонентів і їх взаємозв'язків на основі вимог до СУ, що дозволяє виконати мінімізацію витрат на забезпечення необхідного рівня надійності при певних умовах експлуатації;

– розробка топологічної структури СУ на основі рішень двох попередніх етапів, включаючи визначення функціональної структури, розподіл функцій СУ по множині її компонентів і оптимізацію такого процесу, а також безпосередній вибір комплексу ТЗ для реалізації компонентів КС СУ, що дозволяє виконати мінімізацію витрат на реалізацію і експлуатацію компонентів;

– аналіз процесу функціонування компонентів для обраного варіанту реалізації КС СУ за допомогою імітаційного моделювання.

Наступний матеріал буде покривати перші два з розглянутих етапів. Перш за все, при синтезі технічної структури КС СУ об'єктом КЗ на рівні компонентів і відповідних зв'язків, виникає ряд задач, що неухильно підлягають оптимізації.

Процес синтезу технічної структури можна розбити на два складових етапи, які можна застосувати до формалізації за допомогою апарату графів [10]:

1) синтез найменшої можливої сукупності компонентів для реалізації СУ, їх розташування в рамках відповідної КС, а також кількості та характеру

взаємозв'язків між компонентами; вхідною інформацією для такого етапу є вимоги доступності компонентів СУ;

2) синтез прийнятних варіантів реалізації кожного з компонентів і взаємозв'язків; вхідною інформацією є вимоги до надійності СУ об'єктом КЗ, в контексті як навколишнього середовища, так і можливих впливів на СУ під час її функціонування.

Сутність першого з етапів полягає у розв'язанні задачі знаходження мінімальної кількості компонентів КС при дотриманні вимог застосовності СУ для заданої множини задач управління, включаючи, можливо, також специфічні вимоги (наприклад, вимоги щодо диверсності компонентів для певного типу задач). Таку задачу можна зручно сформулювати у вигляді лінійної цілочисельної задачі математичного програмування [2].

Нехай $i=\overline{1,I}$ – сукупність задач управління, що підлягають розв'язанню СУ, $j=\overline{1,J}$ – сукупність компонентів КС СУ, а $\ell=\overline{1,L}$ – фізичні області КС СУ, в яких реалізується управління за допомогою певних компонентів в залежності від типу задач управління. Нехай $L_i$ є областями КС, в яких проводиться розв'язання задач $i$-го типу. За допомогою $m_i$ позначимо сукупність компонентів КС, доступних для розв'язання задач $i$-го типу, а за допомогою $\tau_\ell$ – час, за який потрібно розв'язати задачу компонентами КС в її $\ell$-й області. Крім того, необхідно ввести такі булеві змінні, що відображають використання компонента і області КС СУ при розв'язанні задач управління:

$$x_j=\begin{cases}1, \text{ якщо використовується компонент } j,\\ 0, \text{ інакше;}\end{cases}$$

$$y_\ell=\begin{cases}1, \text{ якщо використовується область } \ell,\\ 0, \text{ інакше.}\end{cases}$$

Тепер можна стверджувати, що основна задача, яка підлягає розв'язанню, полягає в мінімізації витрат на реалізацію таких компонентів:

$$\min\sum_{j=1}^{J}c_j x_j\ ,$$

де $c_j$ – витрати на створення $j$-го компонента КС СУ.

Якщо задані вимоги до застосування СУ для заданої множини задач управління, то необхідно враховувати що

$$\sum\nolimits_{\ell\in L_i}\tau_\ell y_\ell\le\tau_i\,,$$

де $\tau_i$ – обмеження на час розв'язання задачі управління $i$-го типу із підмножини задач $L_i$; а при наявності ще й спеціальних обмежень (наприклад, по диверсності компонентів для $i$-ої задачі), врахувати всі такі обмеження, наприклад, якщо для $i$-ої задачі необхідно не менше $k_i$ компонент, то

$$\sum\nolimits_{j\in m_i}x_j\ge k_i\,.$$

Крім того, необхідно задати взаємозв'язок між введеними змінними, враховуючи що $n_\ell$ – сукупність компонент, які можна застосувати для розв'язання задачі відповідного типу в $\ell$-й області КС:

$$\sum_{j\in n_\ell}x_j\ge y_\ell\ge\frac{1}{|n_\ell|}\sum_{j\in n_\ell}x_j\ .$$

В процесі реалізації другого етапу, для кожного з можливих у конкретній КС СУ типів задач управління задається мінімальна сукупність компонентів і взаємозв'язків між ними, що забезпечує коректне функціонування КС СУ.

Множини варіантів реалізації компонентів КС і їх взаємозв'язків визначаються як в контексті мінімізації відповідних витрат, так і в контексті надійності, що забезпечується. Введемо наступні позначення, стосовно до часового інтервалу функціонування СУ об'єктом КЗ, що розглядається, і наявності допустимих впливів на СУ під час функціонування: $P_{ik}\left(k=\overline{1,K_i}\right)$ – ймовірність безвідмовного функціонування частини КС, що реалізує розв'язання $k$-го варіанту $i$-ої задачі управління; $P_{jk}\left(k=\overline{1,K_j}\right)$ – ймовірність безвідмовного функціонування $k$-го варіанту реалізації $j$-го компонента КС СУ; $P_{Rk}\left(k=\overline{1,K_r}\right)$ – ймовірність безвідмовного функціонування $k$-го варіанту реалізації $R$-го мережевого компонента, що забезпечує функціонування КС СУ; $P_{dk}$ – ймовірність безвідмовного функціонування складеного каналу зв'язку, що має $k$-й варіант реалізації, і утворює певний маршрут (d) з'єднання при розв'язанні задачі управління; $c_{ik}, c_{jk}, c_{Rk}, c_{dk}$ – витрати на фізичну і логічну реалізацію відповідних компонентів, включаючи вузли обробки і передачі інформації, а також канали зв'язку (що утворюють складовий канал зв'язку маршруту з'єднання для розв'язанні задачі).

Можна виділити агреговані варіанти реалізації певних областей комп'ютерної системи СУ з урахуванням множини і характеристик необхідних компонентів [2].

Введемо такі булеві змінні, що приймають одиничні значення тільки в разі вибору $k$-х варіантів побудови: $\theta_{ik}$ - $i$-ої задачі, $\theta_{jk}$ - $j$-го компонента КС, $\theta_{Rk}$ - $R$-го проміжного вузла мережі КС, $\theta_{\ell dk}$ - каналів зв'язку на маршруті з'єднання для розв'язання задачі. Таким чином, для знаходження оптимального розподілу необхідно знайти матрицю $\Theta$, при якій витрати мінімізуються.

Тепер можна стверджувати, що основна задача, котра підлягає розв'язанню на другому етапі, полягає в мінімізації витрат на побудову компонентів, яка описується як

$$C=\sum_\alpha\sum_k c_{\alpha k}\theta_{\alpha k}+\sum_\beta\sum_k c_{\beta k}\theta_{\beta k}\to\min$$

при обмеженнях, що описуються таким чином:

$$P_{i0}\left(\theta_{ik},\theta_{0k}\right)\times$$
$$\times\left[\begin{array}{l}P_{Rk}\left(\theta_{Rk},\theta_{iRk}\right)\left(1-P_{ijk}\left(\theta_{ijk},\theta_{Rjk},\theta_{jk}\right)\right)+\\+\left(1-P_{Rk}\left(\theta_{Rk},\theta_{iRk}\right)\right)\left(1-P_{ij}\left(\theta_{ijk},\theta_{jk}\right)\right)\end{array}\right]\geq P_i^*,$$

$$\sum_k \theta_{\alpha k}=1,\ \alpha=i,j,R,$$

$$\sum_k \theta_{\beta k}=1,\ \beta=\{iR,ij,jR,j0\},$$

де $$P_{Rk}\left(\theta_{Rk},\theta_{iRk}\right)=\left(\sum_k P_{Rk}\theta_{Rk}\right)\left(\sum_k P_{iRk}\theta_{iRk}\right);$$

$$P_{ijk}\left(\theta_{ijk},\theta_{Rjk},\theta_{jk}\right)=$$
$$=\prod_j\left[1-\left(1-\sum_k P_{ijk}\theta_{ijk}\right)\left(1-\sum_k P_{Rjk}\theta_{Rjk}\right)\left(\sum_k P_{jk}\theta_{jk}\right)\right],$$

$$P_{ik}\left(\theta_{ik},\theta_{0k}\right)=\left(\sum_k P_{ik},\theta_{ik}\right)\left(\sum_k P_{0k},\theta_{0k}\right),$$

$$P_{ij}\left(\theta_{ijk},\theta_{jk}\right)=\prod_j\left[1-\left(\sum_k P_{ijk}\theta_{ijk}\right)\left(\sum_k P_{jk}\theta_{jk}\right)\right].$$

## Висновки

В статті запропоновано методів синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. Перший з них враховує вибір задач управління компонентами системи управління, реалізації алгоритмів і методів розв'язання задач і розподіл задач по компонентах в процесі їх розв'язання. Сформульовано критерій якості і можливі відповідні обмеження.

Окремо розглянуто питання синтезу організаційної структури системи управління, яке є одним з основоположних.

Другий метод складається з двох етапів, що включають синтез найменшої можливої сукупності компонентів для реалізації систем управління, їх розташування в рамках відповідної комп'ютерної системи, кількості і характеру взаємозв'язків між компонентами, а також синтез прийнятних варіантів реалізації кожного з компонентів і взаємозв'язків. У процесі синтезу враховуються вимоги за доступністю компонентів системи управління та процес її функціонування в контексті навколишнього середовища за умови можливих впливів.

Найближчим напрямком подальших досліджень є вироблення підходів до синтезу технічної структури комп'ютерної системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ


1. Коваленко А. А. Подходы к синтезу информационной структуры системы управления объектом критического применения / А. А. Коваленко // Системи обробки інформації : збірник наукових праць. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 1 (117). – С. 180 – 184.
2. Коваленко А. А. Подходы к синтезу технической структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А. А. Коваленко // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 1(38). – С. 116 – 119.
3. Синтез структуры вычислительной сети для иерархической системы управления / Г А. Кучук, А. В. Королев, А. В. Муравьев, А. Ю. Набока // Сб. научн. трудов. Информационные системы. Вып. 2. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1994. – С. 90 – 93.
4. Кучук Г. А. Концептуальний підхід до синтезу структури інформаційно-телекомунікаційної мережі / Г. А. Кучук, І. В. Рубан, О. П. Давікоза // Системи обробки інформації : збірник наукових праць. – Х.: ХУПС, 2013. – Вип. 7 (114). – С. 106 – 112.
5. Коваленко А. А. Подходы к оптимизации распределения задач управления по компонентам компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А. А. Коваленко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України : науково-технічний журнал. – Х.: ХУПС, 2014. – № 2 (15). – С. 158-160.
6. Кучук Г. А. Модель процесса эволюции топологической структуры компьютерной сети системы управления объектом критического применения / Г. А. Кучук, А. А. Коваленко, А. А. Янковский // Системи обробки інформації : збірник наукових праць. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 7 (123). – С. 93-96.
7. Кучук Г. А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення / Г. А. Кучук. – Х.: ХУПС, 2013. – 264 с.
8. Кучук Г. А. Синтез стратифікованої інформаційної структури інтеграційної компоненти гетерогенної складової Єдиної АСУ Збройними Силами України / Г. А. Кучук, О. П. Давікоза // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: ХУПС, 2013. – № 3 (12). – С. 154-158.
9. Whitt W. The Queuing Network Analyzes / W. Whitt // Bell System Tech. I. – 1983. – Vol. 62, № 9. – P. 2779 – 2815.
10. Gelenbe E. Analysis and synthesis of computer systems (2nd Edition) / E. Gelenbe, G. Pujolle // Advances in Computer Science and Engineering : Texts – Vol.4 – 2010. – 309 p.


REFERENCES


1. Kovalenko, A.A. (2014), "Approaches to the synthesis of the information structure of the critical use management system", *Information processing systems*, KhUPS, Kharkiv, No. 1 (117), pp. 180-184.
2. Kovalenko, A.A. (2014), "Approaches to the synthesis of the technical structure of the computer system that forms the control system for the critical application object", *Collection of scientific works of Kharkov University of Air Forces*, KhUPS, Kharkiv, No. 1 (38), pp. 116-119.

3. Kuchuk, G.A., Korolev, A.V., Muravyev, A.V. and Naboka A.Yu. (1994), "Synthesis of the structure of a computer network for a hierarchical control system", *Information systems*, Issue 2, KhVU, Kharkiv, pp. 90-93.
4. Kuchuk, G.A., Ruban, I.V. and Davicosa O.P. (2013), "Conceptual Approach to the Synthesis of the Information and Telecommunication Network Structure", *Information Processing Systems*, KhUPS, Kharkiv, No. 7 (114), pp. 106-112.
5. Kovalenko, A.A. (2014), "Approaches to optimization of distribution of control tasks by components of a computer system, forming a system of control of a critical application object", *Science and technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine*, KhUPS, Kharkiv, No. 2(15), pp. 158-160.
6. Kuchuk, G.A., Kovalenko, A.A. and Yankovsky A.A. (2014), "Model of the process of evolution of the topological structure of the computer network of the control system by the object of critical application", *Information Processing Systems*, KhUPS, Kharkiv, No. 7 (123), pp. 93-96.
7. Kuchuk, G.A. (2014), *Information Technologies for Integrated Data Flow Control in Information and Telecommunication Networks of Critical Purposes*, KhUPS, Kharkiv, 264 p.
8. Kuchuk, G.A. and Davicosa O.P. (2013), "Synthesis of the stratified information structure of the integration component of the heterogeneous component of the Single Automated Control System by the Armed Forces of Ukraine", *Science and technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine*, KhUPS, Kharkiv, No. 3(12), pp. 154-158.
9. Whitt, W. (1983), "The Queuing Network Analyzes", *Bell System Tech. I*., Vol. 62, No. 9, pp. 2779-2815.
10. Gelenbe, E. and Pujolle, G. (2010), "Analysis and synthesis of computer systems", *Advances in Computer Science and Engineering*, Vol. 4, 309 p.

Received (Надійшла) 23.02.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 11.04.2018

**Методы синтеза информационной и технической структур системы управления объектом критического применения**

А. А. Коваленко, Г. А. Кучук

**Предметом** изучения в статье являются процессы синтеза структур системы управления (СУ) объектом критического применения (ОКП). **Целью** является разработка методов синтеза информационной и технической структур СУ ОКП. **Задачи**: 1) получить формализованные описания задач, возникающих при синтезе организационной структуры СУ; 2) выбрать оптимальную структуру компьютерной системы (КС), обеспечивающей функционирование СУ ОКП и ее подсистем; 3) получить формализованные описаний задач, возникающих при синтезе технической структуры КС СУ ОКП. Для этого использовались **методы** теории множеств и целочисленного программирования с булевыми переменными. Получены следующие **результаты**. Предложены методы синтеза информационной и технической структур СУ ОКП. В первом из них учитываются задачи управления компонентами СУ, алгоритмы и методы решения задач, а также распределение задач по компонентам в процессе их решения. Сформулирован критерий качества и возможные ограничения. Отдельно затронуты вопросы синтеза организационной структуры СУ, которые являются одними из основополагающих. Второй метод состоит из двух этапов, включающих синтез наименьшей возможной совокупности компонентов для реализации СУ, их расположение в рамках соответствующей КС, количества и характера взаимосвязей между компонентами, а также синтез приемлемых вариантов реализации каждого из компонентов и взаимосвязей. **Выводы**. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: впервые разработаны методы синтеза информационной структуры СУ ОКЗ и технической структуры соответствующей КС, лежащей в основе такой СУ.

**Ключевые слова:** синтез; управление; структура; сеть; компонент; формализация; связь.

**Methods for synthesis of informational and technical structures of critical application object's control system**

A. Kovalenko, H. Kuchuk

The **subject matter** of the paper is the processes of synthesis of the structures related to control system (CS) for critical application object (CAO). The **goal** is to develop the methods for CAO CS's informational and technical structures synthesis. The **tasks** to be solved are: 1) derive formalized descriptions for the problems, which occur during the synthesis of CS's organizational structure; 2) choose the optimal structure of the computer system (CompS), which ensures the operation of the CAO CS and its subsystems; 3) derive formalized descriptions for the problems, which occur during the synthesis of the technical structure of the CAO CS CompS. For this purpose, methods of the theory of sets and integer programming with Boolean variables were used. The following **results** were obtained. The methods for CAO CS's informational and technical structures synthesis are obtained. The first of them takes into account the problems of CS components control, the algorithms and methods for solving problems, as well as the distribution of tasks among the components during their solution. Formulated quality criteria and possible constraints. Separately raised the problem related to the synthesis of the CS's organizational structure, which is one of the fundamental. The second method consists of two steps, which include the synthesis of the smallest possible set of components for the implementation of the CS, their location within the corresponding CompS, the number and nature of the interconnections between the components, as well as the synthesis of acceptable options for the implementation of each component and interconnections. **Conclusions**. The scientific novelty of the obtained results is as follows: the methods for synthesis of the CAO CS's informational structure and the corresponding CompS's technical structure, which underlies the CS, are first developed.

**Keywords:** synthesis; control; structure; system; network; component; formalization; connection.

# Information systems research

УДК 004.7 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.05**

А. О. Аронов, В. В. Вишнівський, І. В. Замаруєва

Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна

## МЕТОД АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИЯВЛЕННЯ ЗАСТАРІЛОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ САЙТУ

**Предметом** вивчення в статті являються процеси обробки даних, що розміщені на сайті для вирішення прикладного завдання автоматичного виявлення застарілої інформації. **Метою** являється підвищення ефективності роботи системного адміністратора сайту шляхом надання йому такого інструментарію, який би автоматично дозволяв виявляти застарілу інформацію на сайті та приймати рішення щодо її подальшої долі (видаляти, архівувати, переміщувати у спеціальні розділи тощо). **Завдання:** розробка методу автоматичного виявлення застарілої інформації на основі інформаційно-аналітичного аналізу даних сайту, який би надав системному адміністратору можливість подальшого автоматичного опрацювання даних сайту. Використовуваним **методом** є: інформаційно-аналітичний метод аналізу даних сайту, що представлений у вигляді моделі табличного представлення логічної структури алгоритму Янова. Отримані такі **результати.** Згідно табличної моделі процесу обробки інформації сформульовано завдання автоматичного виявлення застарілої інформації. В основу процедури автоматичного виявлення застарілої інформації покладено логічну структуру алгоритму Янова. Дана структура дозволяє наочно зберігати цілісність алгоритму при додаванні (розширенні) певних процедур. Індивідуальність об'єкта враховується за рахунок наявності або відсутності певних умов, що дозволяє уникнути рекурсій. В результаті отримано еталонні моделі (шаблони), які перетворюють текстові дані до єдиного уніфікованого представлення. Дані моделі розроблено для форматів, що характерні для інформаційних листів-повідомлень та новин. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: ми розробили метод автоматичного виявлення застарілої інформації на основі інформаційно-аналітичного аналізу даних сайту, який відрізняється від існуючих тим, що для виявлення застарілої інформації аналізуються не лише часові показники часу створення/оновлення сторінок сайту, а безпосередньо зміст текстової сторінки. Для аналізу текстової інформації побудовані шаблони, які дозволяють автоматизувати процес виявлення застарілої інформації та оновлення сторінок сайту.

**Ключові слова:** сайт; застаріла інформація; інформаційно-аналітичний аналіз даних; логічна структура алгоритму Янова.

## Вступ та постановка завдання

Разом із стрімким зростанням кількості сайтів збільшується й обсяг накопичуваної інформації на них, що приводить до проблем їх ефективного функціонування. З одного боку, до змісту інформації, що міститься на сайті висуваються вимоги достовірності, актуальності, несуперечливості та цілісності. З іншого боку, з моменту створення сайту на ньому збирається великий обсяг інформації, яка втрачає актуальність [1. 2]. Актуальність інформації — це відповідність теми інформації повідомлення потребам користувачів сайту. Таким чином, актуальність інформації є динамічною властивістю інформації, яка визначається не змістом інформації, а часом її існування.

Власне за якість інформації відповідає системний адміністратор сайту. В його обов'язки входить перевірка інформації (даних) на коректність, своєчасне оновлення інформації, видалення (або архівація) застарілої інформації. В той же час, із-за великої кількості сторінок (обсяг обліковується кількома сотнями або тисячами сторінок), часто стає неможливим прослідкувати, які сторінки оновлювалися, а які ще ні. Причина цього криється у додаванні нової інформації або ж корегуванні помилок на сторінках тим самим формально унеможливлюючи визначення застарілої інформації з використанням полів «дата останнього редагування». На подібних сторінках може бути повністю відсутні також часові маркери «дати», «числа», «року» тощо. Крім, того складність полягає ще в тому, що фіксування дати безпосередньо у змісті сторінки, яка може визначати застарілість інформації, виражається природномовними засобами і не має уніфікованого подання, що ускладнює процес автоматизації виявлення застарілої інформації [3].

Таким чином, актуальним являється **завдання** розробки методу автоматичного виявлення застарілої інформації на основі інформаційно-аналітичного аналізу даних сайту, який би надав системному адміністратору можливість подальшого автоматичного опрацювання даних сайту.

**Метою роботи** являється підвищення ефективності роботи системного адміністратора сайту шляхом надання йому такого інструментарію, який би автоматично дозволяв виявляти застарілу інформацію на сайті та приймати рішення щодо її подальшої долі (видаляти, архівувати, переміщувати у спеціальні рубрики тощо).

## Основна частина

Відповідно до поставленої в роботі мети необхідно розробити метод автоматичного виявлення застарілої інформації на основі інформаційно-аналітичного аналізу даних сайту. Метод призначений для створення програмного забезпечення, яке можуть використовувати системні адміністратори сайту.

**Обмеження:** метод можна використовувати для обробки сторінок сайту, де часові характеристи-

ки повністю або обмежено неявно представлені в тексті сторінки.

**Вхідними даними** є безпосередньо тексти сторінок сайту та база даних еталонних моделей форматів представлення часових показників у тексті.

**Вихідні дані:** оновлені сторінки сайту.

Процес обробки даних базується на принципах табличної обробки інформації [4, 5]. Обробка інформації представленої у вигляді таблиць має ряд переваг, а саме: наочність, відсутність рекурсій, що важливо при побудові алгоритму. Табличне представлення логічної структури алгоритму в класичній теорії алгоритмів отримало назву логічна структура алгоритму (ЛСА) Янова [6]. Логічна структура алгоритму Янова дозволяє наочно зберігати цілісність алгоритму при додаванні (розширенні) певних процедур. Фактично рядок в таблиці виконує всю послідовність дій відповідно до заданого об'єкта. Індивідуальність об'єкта враховується за рахунок наявності або відсутності певних умов, це дозволяє уникнути рекурсій. Структура алгоритму опрацювання застарілої інформації представлена в табл. 1.

*Таблиця 1.* **Фрагмент алгоритму опрацювання застарілої інформації на сайті у формі логічної структури алгоритму Янова**

| Код сторінки | За якими ознаками | | | З чим порівнюємо | | | Умова if | Дія |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $L_1$ | $L_2$ | $L_3$ | $K_1$ | $K_2$ | $K_3$ | | |
| 1.7. | + | | + | + | | | $T(L_3) < K_1$ | $P1$ |
| 1.5.1.2. | | | + | | + | | $T(L_3) < K_2$ | $P1$ |
| 1.4.5. | + | | | + | | | $T(L_1) < K_1$ | $P1$ |
| 1.8. | | | + | | | + | $T(L_3) < K_3$ | $P3$ |
| 1.4.6.1. | | + | | | + | | $T(L_2) < K_2$ | $P2$ |

В табл. 1 перший стовпчик включає перелік всіх кодів сторінок сайту, які підлягають аналізу. Кожна сторінка має унікальний ключ (код) в межах сайту. Система кодування побудована на основі ієрархічного класифікатора організації даних сайту, який детально описаний в [7]. Так, код 1.7. відповідає сторінці «Новини»; 1.5.1.2. – «Склад студ. ради»; 1.4.5. – «Конференції»; 1.8. – «Фотогалерея»; 1.4.6.1. – «Аспірантура. Правила прийому». Наступні три стовпці (2-4) визначають параметри, за якими перевіряється відповідна сторінка. Так параметр $L_1$ означає, що пошук застарілої інформації відбувається безпосередньо за текстом сторінки. Параметр $L_2$ – за назвою сторінки. Параметр $L_3$ – за часом створення/оновлення сторінки. Стовпці 5-7 визначають з чим ми порівнюємо часові показники $L_{1\text{-}3}$. Так параметр $K_1$ – поточна дата; $K_2$ – фіксована дата (наприклад, вартість навчання, документи до вступу визначаються датою роботи приймальної комісії); $K_3$ – комбінована дата (наприклад, поточна дата в тексті + 1місяць, тощо). 8-й стовпчик визначає умови порівняння. 9-й стовпчик визначає дії (процедури), які необхідно виконати у разі, якщо правило до відповідної сторінки сайту спрацювало. Процедура ***P*1** означає надіслати сторінку до архіву, ***P*2** – видалити текст сторінки, ***P*3** – нагадати про необхідність оновлення (як правило, це відноситься до даних, які мають зберігатися в архівах до певної фіксованої дати. Наприклад, відомості про конференції, семінари тощо.

Слід зазначити, що часові показники $L_1$-$L_3$ не мають уніфікованого представлення, а звідси для програмної реалізації алгоритму потрібно задати певні еталонні моделі (шаблони), які б перетворювали текстові дані до єдиного уніфікованого представлення. Як вже зазначалося, ЛСА Янова дозволяє без порушення загальної логічної структури деталізувати окремі комірки табличного представлення алгоритму. Розглянемо детальніше правила уніфікації часових показників, при цьому всі часові показники приводяться до виду представлення поточної дати в комп'ютері $K_1$. Аналіз текстових даних сайту (зокрема, сайту Державного університету телекомунікацій) показав, що часові показники визначаються таким чином:

***G*1:** = <число> + <місяць> + <рік>
(наприклад: «**11 квітня 2018**»);

***G*2:** = <число$_1$-число$_2$> + <місяць> + <рік>
(наприклад: «**12-13 квітня 2018**»);

***G*3:** = <число$_1$-число$_2$> + <місяць>
(наприклад: «**4-8 квітня** *відбувся* ..»);

***G*4:** = <місяць>
(наприклад: «*у* **вересні** *відбувся* ..»).

*Примітка*: знак «+» означає, що дата не розривається контекстом.

Формати ***G*1** і ***G*2** характерні для інформаційних листів-повідомлень про конференції, семінари тощо. Особливістю представлення цих даних є те що вони можуть бути представлені, як правило, трьома мовами: українською, англійською, російською, а тому <місяць> також може містити назви 3-ма мовами. Формати ***G*3** і ***G*4**, як правило, притаманні новинам і представлені українською та російською мовами. Далі розглянемо правила уніфікації для кожного з визначених форматів текстового представлення часових показників.

Формат ***G*1:**

<{1/2/…/31}>+<{січня/января/January}>+
<201{6/7/8/9}>:=<$X_1$.01.201$X_3$>;

<{1/2/…/29}>+<{лютого/февраля/February}>+
<201{6/7/8/9}>:=<$X_1$.02.201$X_3$>;

…

<{1/2/…/31}>+<{грудня/декабря/December}>+
<201{6/7/8/9}>:=<$X_1$.12.201$X_3$>.

Таким чином, для формату ***G*1** визначається 12 шаблонів (еталонних моделей) відповідно до кількості місяців в році. В шаблоні позначення «**<…>**» означає запис на якому відбувається порівняння; фігурні дужки означають множину можли-

вих даних; знак «/» відповідає логічній операції «*або*»; позначення «:=» – операції «приймає значення»; $\boldsymbol{X_1}$ – результат операції перетинання множини чисел із першого кортежу з числом, яке зустрілося у тексті; $\boldsymbol{X_3}$ – результат операції перетинання множини чисел із третього набору даних з числом, яке зустрілося у тексті.

Так, для фрагменту текстового інформаційного листа-повідомлення: «*International Conference CoLInS 2017 Computational Linguistics and Intelligent Systems* ***21 April, 2017,*** *Kharkiv, Ukraine»,* результат накладення на шаблон буде такий вигляд:

<21>+<April>+<2017>:=< 21.04.2017>.

Формат ***G2*** також буде мати 12 шаблонів:

<{1/…/30}-{1/…/31}>+
<{січня/января/January}>+
<201{6/7/8/9}>:=<(-)$\boldsymbol{X_1}$.01.201$\boldsymbol{X_3}$>;

<{1/…/28}-{1/…/29}>+
<{лютого/февраля/February}>+
<201{6/7/8/9}>:=<(-)$\boldsymbol{X_1}$.02.201$\boldsymbol{X_3}$>;

**…**

<{1/…/30}-{1/…/31}>+
<{грудня/декабря/December}>+
<201{6/7/8/9}>:=<(-)$\boldsymbol{X_1}$.12.201$\boldsymbol{X_3}$>.

У даному шаблоні позначення «**(-)**$\boldsymbol{X_1}$» означає, що в якості результату операції перетинання обирається число із першого набору даних, яке розташоване після знаку «-» в тексті.

Наприклад: ***12-13 квітня 2018*** *року в Державному університеті телекомунікацій відбудеться 10-та міжнародна науково-практична конференція "Проблеми інформатизації", присвячена польоту першого космонавта світу Гагаріна Ю.А.*

Формат ***G3*** характерний для внутрішніх новин, він має також 12 шаблонів:

<{1/…/30}-{1/…/31}>+<січня>:= <(-)$\boldsymbol{X_1}$.01.$\boldsymbol{X_n}$>;

<{1/…/28}-{1/…/29}>+<лютого>:= <(-)$\boldsymbol{X_1}$.02.$\boldsymbol{X_n}$>;

**…**

<{1/…/30}-{1/…/31}>+<грудня>:= <(-)$\boldsymbol{X_1}$.12.$\boldsymbol{X_n}$>.

Відмінною особливістю даного формату є те, що оскільки рік відсутній або розірваний контекстом безпосередньо у тексті, тому рік визначається за поточною датою (визначеною у комп'ютері або за часом створення документу) і вставляється у результат (позначення «$\boldsymbol{X_n}$» у шаблоні.

Приклад: «*Реєстрація на вебінар обов'язкова і буде відкрита до* ***18 квітня*** *за посиланням*».

Відмінною особливістю формату ***G4*** є відсутність прямого посилання в тексті на такі часові ознаки, як: число і рік, відновлюються з поточної дати або дати створення файлу.

Даний формат як і попередній також характерний для представлення так званих внутрішніх подій і має 12 шаблонів:

<січні>:= <$\boldsymbol{XX_n}$.01.$\boldsymbol{XXXX_n}$>;

<лютому>:= < $\boldsymbol{XX_n}$.02.$\boldsymbol{XXXX_n}$>;

**…**

<грудні>:= < $\boldsymbol{XX_n}$.12.$\boldsymbol{XXXX_n}$>.

В шаблоні назва місяця ставиться тільки у місцевому відмінку (тобто має відповідати на питання *коли*, це потрібно для того щоб відокремити тексти, які не мають відношення до актуальності інформації в тексті.

## Висновки

В статті запропоновано метод автоматичного виявлення застарілої інформації на основі інформаційно-аналітичного аналізу даних сайту, який відрізняється тим, що для виявлення застарілої інформації аналізуються не лише часові показники часу створення/оновлення сайту, а безпосередньо зміст текстової сторінки. Для аналізу текстової інформації побудовані шаблони, які дозволяють автоматизувати процес виявлення застарілої інформації та оновлення сторінок сайту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ


1. Gelenbe E. Analysis and synthesis of computer systems (2nd Edition) / E. Gelenbe, G. Pujolle // Advances in Computer Science and Engineering : Texts – Vol. 4. – 2010. – 309 p.
2. Кучук Г. А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення / Г. А. Кучук. – Х.: ХУПС, 2013. – 264 с.
3. Гаврилова Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В.Ф. Хорошевский. – С.Пб.: Питер, 2000. – 384 с.
4. Табличная обработка информации / Е. П. Балашов, В. Н. Негода, Д. В. Пузанков и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 184 с.
5. Криницкий Н. А. Программирование и алгоритмические языки / Н. А. Криницкий, Г. А. Миронов, Г. Д. Фролов. – М.: Наука, 1979. – 509 с.
6. Аронов А.О. Розробка моделі структурно-логічного представлення даних сайту вищого навчального закладу на основі ієрархічного класифікатора / А.О. Аронов // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2018. – Вип. 59. – С. 24-28.
7. Замаруєва І.В. Автоматизація аналізу змісту природно-мовних текстів як шлях забезпечення безпеки прийняття управлінських рішень / І.В. Замаруєва, О.В. Барабаш, І.В. Пампуха // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку: науково-виробничий збірник. – К.: УНДІЗ, 2017. – № 3(47). – С. 33-41.


REFERENCES


1. Gelenbe, E. and Pujolle, G. (2010), "Analysis and synthesis of computer systems", *Advances in Computer Science and Engineering*, Vol. 4, 309 p.

2. Kuchuk, G.A. (2014), Information Technologies for Integrated Data Flow Control in Information and Telecommunication Networks of Critical Purposes, KhUPS, Kharkiv, 264 p.
3. Gavrilova, T.A. and Khoroshevskiy, V.F. (2000), Bazy znaniy *intellektual'nykh system* [Knowledge bases of intellectual systems], Piter, St. Petersburg, 384 p.
4. Balashov, E.P., Negoda, V.N. and Puzankov D.V. (1985), *Table processing of information*, Energoatomizdat, Leningrad, 184 p.
5. Krinitsky, N.A., Mironov, G.A. anf Frolov G.D. (1979), *Programming and algorithmic languages*, Nauka, Moscow, 509 p.
6. Aronov, A.O. (2018), "Development of the model of structural-logical representation of the data of the site of the higher educational institution on the basis of the hierarchical classifier", *Collection of scientific works of the Military Institute of the Taras Shevchenko National University of Kyiv*, VIKNU, Kyiv, No. 59, pp. 24-28.
7. Zamarueva, I.V., Barabash, O.V. and Pampukha, I.V. (2017), "Automation of the analysis of the content of natural-language texts as a way to ensure the safety of the adoption of management decisions", *Scientific notes of the Ukrainian Research Institute of Communication*, UNIIZ, Kiev, No. 3 (47), pp. 33-41.

Надійшла (received) 23.02.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 11.04.2018

**Метод автоматизации обнаружения устаревшей информации на основе информационно-аналитического анализа данных сайта**

А.А. Аронов, В.В. Вишневский, И.В. Замаруева

**Предметом** изучения в статье являются процессы обработки данных, размещенные на сайте для решения прикладной задачи автоматического обнаружения устаревшей информации. **Целью** является повышение эффективности работы системного администратора сайта путем предоставления ему такого инструментария, который бы автоматически позволял выявлять устаревшую информацию на сайте и принимать решение о ее дальнейшей судьбе (удалять, архивировать, перемещать в специальные разделы и т.д.). **Задача**: разработка метода автоматического обнаружения устаревшей информации на основе информационно-аналитического анализа данных сайта, который бы предоставил системному администратору возможность дальнейшей автоматической обработки данных сайта. Используемым **методом** является: информационно-аналитический метод анализа данных сайта, представленый в виде модели табличного представления логической структуры алгоритма Янова. Получены следующие **результаты**. Согласно табличной модели процесса обработки информации сформулирована задача автоматического обнаружения устаревшей информации. В основу процедуры автоматического обнаружения устаревшей информации положена логическая структура алгоритма Янова. Данная структура позволяет наглядно сохранять целостность алгоритма при добавлении (расширении) определенных процедур. Индивидуальность объекта учитывается за счет наличия или отсутствия определенных условиях, что позволяет избежать рекурсий. В результате получены эталонные модели (шаблоны), которые превращают текстовые данные к единому унифицированному представлению. Данные модели разработаны для форматов, которые характерны для информационных писем-сообщений и новостей. **Выводы**. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: мы разработали метод автоматического обнаружения устаревшей информации на основе информационно-аналитического анализа данных сайта, который отличается от существующих тем, что для выявления устаревшей информации анализируются не только временные показатели времени создания / обновления страниц сайта, а непосредственно содержание текстовой страницы. Для анализа текстовой информации построены шаблоны, которые позволяют автоматизировать процесс выявления устаревшей информации и обновления страниц сайта.

**Ключевые слова:** сайт; устаревшая информация; информационно-аналитический анализ данных; логическая структура алгоритма Янова.

**Method for automation of detecting detailed information on the basis of information and analytical analysis of the site data**

A. Aronov, V. Vyshnivsky, I. Zamarueva

The **subject matter** of the article is the data processing processes posted on the site for solving the applied problem of automatic detection of outdated information. The **goal** is to increase the efficiency of the work of system administrator site by providing him with a tool that automatically allows to identify outdated information on the site and decide its future fate (delete, archive, move to special sections, etc.). The **tasks** to be solved are: to develop a method for automatically detecting outdated information based on information analysis of site data that would provide the system administrator with the ability to further automatically process site data. The **method** used is: an information-analytical method for analyzing site data, presented in the form of a table representation model of the logical structure of the Yanov's algorithm. The following **results** were obtained. According to the tabular model of information processing, the task of automatic detection of outdated information was formulated. The basis of the procedure for automatic detection of outdated information is the logical structure of the Yanov's algorithm. This structure allows visually to preserve the integrity of the algorithm when adding (expanding) certain procedures. The individuality of the object is accounted for by the presence or absence of certain conditions, which avoids recursion. As a result, we obtained a reference models (templates), which convert text data to a single unified representation. These models are designed for formats that are typical for letters-messages and news. **Conclusions**. The scientific novelty of the results obtained is as follows: we have developed a method for automatically detecting outdated information based on information analysis of site data that differs from existing ones in that not only time indicators for creating / updating pages of a site are analyzed, but the all content of text page. For the analysis of text information templates were build, which allow to automate the process of revealing outdated information and updating the pages of the site.

**Keywords:** web-site; outdated information; information analytical analysis of data; logical structure of Yanov's algorithm.

UDC 621.391 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.06**

S. Gatsenko [1], Yu. Buchinsky [2]

[1] National Defence University of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Kyiv, Ukraine
[2] Military unit A 3438, Odesa, Ukraine

# THE ANALYSIS OF EXPERT SYSTEM FOR ADAPTING DECISIONS FOR DETERMINING THE TYPE OF RADIO RESPONSE SOURCES

In this article, the authors of research described the sources of radio radiation and explained the complexity of identifying sources of radioelectronic radiation under a priori uncertainty. Authors of the article state, that the source of radio-electron radiation can be identified by a set of parameters of its signal. It is established that the informational nature of the signal source of radio emission for the devices of radio monitoring depends on how reliable this signal is detected and how accurately (precisely) its parameters are determined, which are useful days of radio monitoring of the message or value. Because signal tracking always takes place against a background of different kinds of interference, the fact of detecting a signal, as well as errors in measuring signal parameters and selecting messages are always random. The problem of determining the type of signal, and therefore the source, which it emits, is partially solved by the preliminary analysis of the ether on the hearing conducted by the operators of radiomonitoring. This makes it possible not to distract from non-informative signals belonging to sources of radio-electronic radiation that are not showing interest to radio monitoring, to shorten the search time for sources of radio-electronic radiation and to minimize the cost of depreciation of equipment. The disadvantage of this method is the necessity to have a sufficient number of trained operators and to constantly increase their training. Was given that the preparation of one operator to a professional level can last 6-12 months, it is very difficult to provide data requirements. Therefore, in the given article it is suggested to analyze the parameters of sources of radio-electronic radiation on a set of parameters of sources signals of radio-electron radiation with the help of expert decision support system concerning determination of sources parameters of radio-electronic radiation. In the article, the authors proposed an expert system for determining the parameters of sources of radio-electronic radiation using a database management system. Unlike machine programs that use procedural analysis, expert systems solve problems in a narrow subject area (specific field of expertise) based on deductive considerations. Such systems are often able to find solutions that are unstructured and poorly defined. They cope with the lack of structuring by involving heuristics, that is, the rules described in accordance with the experience of using the equipment, which may be useful in those situations where the lack of necessary knowledge or time eliminates the possibility of complete analysis.

**Keywords:** radiomonitoring; expert system; decision support system; distributed computing.

## Introduction

Based on the information provided in [1], the basis of the functioning of passive devices of radio monitoring is the detection of signals transmitting messages (for example, the signal of air traffic control) and the recognition of the parameters of high-power signals of stationary, onboard, ship and ground radar stations (RS). Informativity of the signal source of the radio emission (SRE) for the devices of radio monitoring depends on how reliable this signal is detected and how accurately (accurately) are determined its parameters, which are useful days of radio monitoring message or value. Signal tracking always takes place against a background of different kinds of interference, the fact of detecting a signal, as well as errors in measuring signal parameters and selecting messages are always random.

In view of the above, ***the purpose of this article*** is to develop an expert decision support system to determine the type of radio emission sources.

## Presentation of the main material

Useful information for radio monitoring is obtained by analyzing electromagnetic fields $u(t,r)$ on the opening of the receiving antenna $r \in L$ during the time $t \in [-T/2; T/2]$ on the background of space-time obstacles $n(t,r)$. Assuming that signal and interference are additive, then:

$$u(t,r,\alpha_i) = s(t,r,\alpha_i) + n(t,r), \quad (1)$$

where $s(t,r,\alpha_i)$ is the time dependent signal $t$, spatial $r$ coordinates and parameters $\alpha_i$; $n(t,r)$ is the set of obstacles depending on time $t$ and spatial $r$ coordinate.

Spatial-temporal obstacles $n(t,r)$ caused by the joint action of the atmosphere and outer space, the adjective noise of the antenna-feeder network, and other noise of the reception apparatus of the radio monitoring device.

Parameters $\alpha_i$ and spatial parameters $r$ bring radio-monitoring useful information for it. Processing of the signal from the receiving antenna of the radiomonitoring station is almost always divided into spatial and temporal. First of all, the processing of the signal in space. This operation is performed by the antenna system - a spatial filter that selects a signal against obstacles in different areas of the space and determines the spatial parameters of the signal (direction to the SRE). The result of spatial processing is, above all, the estimation of the parameters of the spatial position and movement of the source of radiation.

Then the signal processing is carried out by the station receiver of the radiomonitoring in the time domain. As a result of time processing, carrier frequencies, radiation power, qualitative and quantitative characteristics of modulating functions and

other parameters of the signals of the SRE of radiomonitoring objects are determined.

Complexity of the field structure (sometimes this structure is called “complex signaling situation”) is conditioned by the presence of many emitters of radio signals and sources of indirect and unintentional radiation, by changing the geometric, frequency and time parameters of the emitted signals due to the maneuvering of emitters in the space in which radio monitoring facilities function (in the environment of interests radiomonitoring).

Complex signaling situation is, on the one hand, the subject of analysis for the devices of radio monitoring, its creation involves the emission of radio-electronic devices of radio-monitoring objects. But, on the other hand, the complexity of the signaling situation for the devices of radio monitoring provides the process of detecting and defining the parameters of the signals of radio monitoring objects against the background of non-informative radiation. Many unnecessary radiation is mainly and creates the background noise $n(t,r)$, which complicates the work of the operators of stations of radiomonitoring. In addition, the task of monitoring is to monitor the dynamics of changes in the signal situation, that is, fixing signaling situations, consisting of signals at each time in the interests of radio monitoring.

The problem of determining the type of signal, and therefore the source, which it emits, is partially solved by the preliminary analysis of the ether on the hearing conducted by the operators of radiomonitoring. This allows you not to be distracted by uninformative signals belonging to the SRE, that are not of interest to radio, to reduce the search SRE and minimize the cost of depreciation of equipment.

Disadvantage of this method can be the necessity for a sufficient number of trained operators and a constant increase in their training. Given the fact that the training of one operator to a professional level can last 6-12 months, it is very difficult to meet these requirements.

In the case of a signal from the SRE, which is of interest to radio operator conducts instrumental measurements of radioequipment using radio stations and defines the parameters of the signal, namely: $F_H$ is the bearing frequency of the signal; $T_i$ is the period of pulse following; $\tau_i$ is the pulse duration; $T_c$ is the period of following of signal repetition.

With the data value the operator must determine the type of SRE using reference records or memory, which slows down the decision-making process and increases the probability of an error. For an operator who has not acquired the necessary experience in determining the type of RS, this operation is practically impossible or very complicated and takes a long time.

In order to eliminate the above-mentioned, negative factors and bring the speed of information processing by the operators of radiomonitoring to the real-time scale, for the first time an expert decision making support system (DMSS) was developed for determining the type of SRE for signal parameters.

In [2] states, that expert systems represent a class of computer programs, that conduct analysis, perform a classification, give advice and define types. They are focused on solving problems, which usually require expert examination by a specialist. Unlike machine programs that use procedural analysis, expert systems solve problems in a narrow subject area (specific field of expertise) based on deductive considerations. Such systems are often able to find solutions that are unstructured and poorly defined.

They cope with the lack of structuring by involving heuristics, that is, the rules described in accordance with the experience of using the equipment, which may be useful in those situations where the lack of necessary knowledge or time eliminates the possibility of complete analysis.

**Selection of software for the implementation of an expert system for determining the type of RS.** Software tools for the implementation of the expert system were developed to provide the DMSS type functions for the definition of the SRE type.

One of the effective approaches for creating a “query-response” system is web services. Web service or web office is a programmed system with standardized interfaces identified by a web address.

Web services can interact with each other and with third-party applications with messages based on specific protocols (SOAP, XML-RPC, etc.) and transactions (REST). Web service is unit of modularity when using the service-oriented architecture of the application. The basic principles of organizing systems based on web services are described in [3].

Protocol of interaction between the software and the web service selected SOAP protocol, as it allows you to fully realize all the necessity of this expert system. SOAP (Simple Object Access Protocol) is a protocol for exchanging structured messages in a distributed computing environment.

SOAP can be used with any application layer protocol: SMTP, FTP, HTTP, HTTPS, etc. However, its interaction with each of these protocols has its own peculiarities, which should be defined separately. Often, SOAP is used over HTTP.

It should be noted that this approach allows us to switch to the concept of constructing a distributed computing system and put it on a server that has high computing capabilities and local access to databases, difficult and time-consuming computing tasks.

Description of any web service is contained in the XML document in WSDL (Web Services Description Language). You can get a description of the WSDL using a link that is indicated by an arrow.

Any expert system provides input, accumulation, storage and analysis of expert knowledge. In order to use them, the expert system user must have quick and easy access to this knowledge. Aforementioned factors led to the selection of a database as a data warehouse. Among many database management systems (hereinafter referred to DBMSs), the MySQL database was selected (principles for constructing algorithms using databases described in [6]) to provide software compatibility.

The implementation of the web service was provided using the Delphi 7 programming system. This system supports all the necessary technologies, including SOAP and MySQL.

**Architecture of an expert system for determining the type of RS by parameters.** General architecture of the expert system for determining the type of radar is shown in Fig. 1. It consists of the following components:

main program - automated control system. It is a key, organizing element in the work of the complex as a whole;

web service - a service that is deployed on the basis of a server personal computer (PC). Performs the functions of receiving the request, access to the database management system and providing a response to the results;

MySQL DMSP - a database that provides the input, accumulation, storage and delivery of information that is necessary to the user.

Work of the expert system in conjunction with the DMSS program consists of several stages, which are indicated by the arrows with the numbers in fig. 1.

After a preliminary analysis of the ether, the operator decides on the instrumental analysis of the detected signal from the SRE.

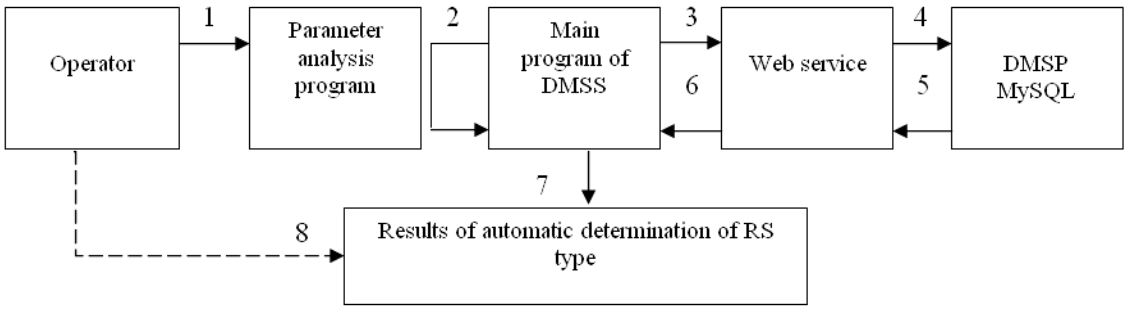



**Fig. 1.** General architecture expert system determine the type of RS

In the first stage, the operator submits a command to the program for measuring the parameters of the signal to read, calculate and process the signal parameters from the equipment. The result of the staffing, combat program of the station is file with the extension ".dat" (hereinafter - dat file), which contains set of data on measurements for a certain period of time.

At the second stage of the work, the system loads the newly created data file of the main program and deduces from it all the signal parameters, namely: $F_H$ (carrier frequency), $T_i$ (pulse follow-up period) and $\tau_i$ (pulse duration). Each of these parameters can have several values, usually from two to five;

In the third stage, the system generates a request for a web service as a function:

$$\text{Param}\, T_0\ \text{RLC}\left(SF, ST, STau\right), \qquad (2)$$

where *SF* is the a set of specified carrier frequency signals (up to five values) separated by a space character; *ST* is the set of defined periods of follow-up of pulses in a signal (up to five values) separated by a space mark; *STau* is the set of specified pulse duration in the signal (up to five values) separated by a space mark.

At the fourth stage, the web service makes a set SQL-request to DMSP MySQL by a certain algorithm.

At the fifth stage, after receiving data from the MySQL database, the web service concludes, which types of RS are suitable for the given parameters.

At the sixth stage, the web service delivers certain types of RS in the order of decreasing the probability of their determination and formulates the response to the automated control system (ACS) "R" in the format:

$$N_1; P_1; N_2; P_2; ...N_n; P_n, \qquad (3)$$

where $N_i$ is the name of the radar station defined by the web service; $P_i$ is a probabilistic factor, that matters in conditional clauses (the greater the value of the coefficient, the more likely, that the station signal corresponds to the calculated parameters).

At the seventh stage of the expert system, the DMSS program creates an informational, interactive display on the monitor displaying a response from the web service in tabular form.

At the eighth stage of the expert system, the radio monitoring operator must confirm the version of the result of the system, that it considers most probable. This function is necessary because sometimes the probability *P* of two or more RS is approximately the same. In this case, the operator makes his choice based on other knowledge or a priori information. Confirmation is performed by double-clicking the left mouse button of the "mouse" type on the line with a correctly defined RS. As a result of confirmation, the bearings on the RS are applied to the map, in case, if the RS is determined by the ground, then the information about its work is entered in the table and schedule of the stationary RS. In case of detection of on-board or ship RS, information about it is entered in the monitoring table of the air (marine) situation.

Algorithm of the expert system for determining the type of radar is shown in Fig. 2. This algorithm is an integral part of a web service located on a database server in order to increase the speed of the web service access to the database server, avoiding low-speed data transmission channels.

At the first stage of the algorithm, reception and downloading of parameters measured by the monitoring station and transmitted through SOAP to the web service is carried out.

At the next stage, the tolerances on the carrier frequency $F_H$ are determined by the formulas:

$$F_{H_{max}} = F_H + \left(\frac{F_H}{K_F}\right), \quad (4)$$

$$F_{H_{min}} = F_H - \left(\frac{F_H}{K_F}\right), \quad (5)$$

where $K_F$ is the admission factor taking into account the inaccuracy of frequency determination by the station of radio monitoring. Coefficient $K_F$ determined based on the reasons for the error of determining the carrier frequency of the signal by equipment of the radio monitoring station, namely ± 11 MHz and $K_F$ =2000; $F_{H_{max}}$, $F_{H_{min}}$ is the maximum and minimum carrier frequency, taking into account the coefficient of tolerance.

Next step in the database is to select all possible radio sources that correspond to the range

$$F_{H\min} \le F_H \le F_{H\max},$$

after which their names are entered into an intermediate array of types of SRE. Each coincidence value $F_H$ with reference adds to the total probability of a weighted value $P_{F_1} = 3$.

At the end of the analysis of the coincidence of the measured values with values in the database, taking into account the coefficient of admission $K_F$ the SRE search algorithm is launched for $f_{n\,min}$ and $f_{n\,max}$ table rtr_rls. after which their names are entered into an intermediate array of types of SRE.

In this analysis, all possible radio sources that match the range are selected from the database

$$f_{H\min} \le F_H \le f_{H\max}.$$

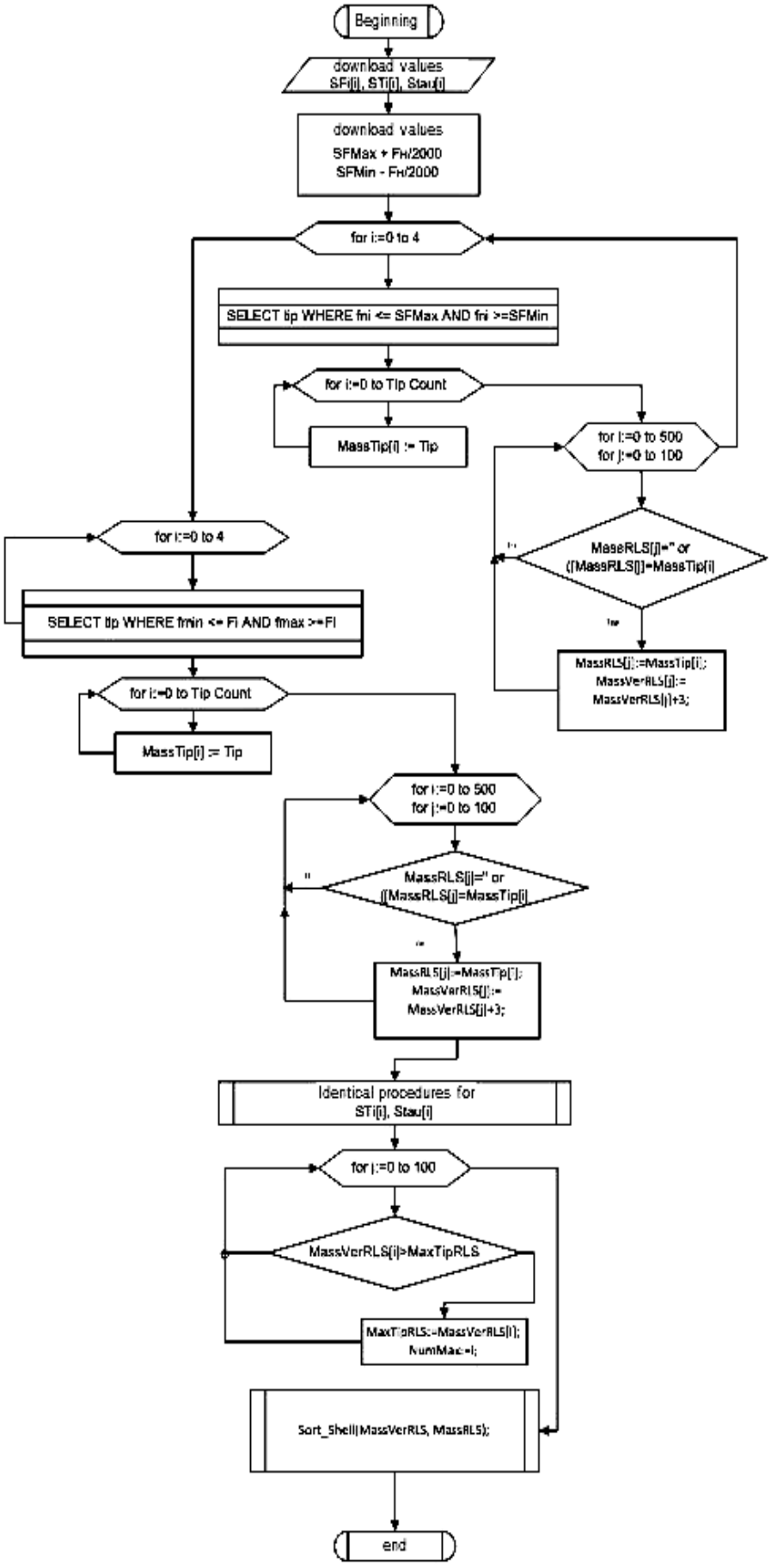



**Fig. 2.** Partial algorithm of the expert system for determining the type of RS by signal parameters

Since the inclining of the carrier frequency in a certain area of values is less informative than the correspondence with a specific value, then each finding value $F_H$ within

$$f_{H\min} \le F_H \le f_{H\max}$$

adds to the probability value the weight factor

$$P_{F_2} = 1.$$

Similarly, two blocks are used to search for the matching of measured values by reference to $T_i$ (pulse follow-up period) and $\tau_i$ (duration of impulses). At the same time value $T_{i\,max}$ and $T_{i\,min}$ are calculated by the formulas:

$$T_{i\ max} = T_i + \left( T_i / K_T \right), \quad (6)$$

$$T_{i\ min} = T_i - \left( T_i / K_T \right), \quad (7)$$

where $K_T$ is the tolerance factor, which takes into account the inaccuracy of determining the period of follow-up of pulses by the station of radiomonitoring.

Since the avarage square error of measurement $T_i$ (period of pulse following up) no more 0,1 mcs, and the range for defining this parameter is significant 2-79999, coefficient $K_T$ defined

$$K_T = 1000.$$

$T_{i\,max}, T_{i\,min}$ is the maximum and minimum value of the pulse follow-up period, taking into account the admission coefficient.

Value $\tau_{i\ \max}$ and $\tau_{i\ \min}$ are calculated by the formulas:

$$\tau_{i\ \max} = \tau_i + \left( \tau_i / K_\tau \right), \quad (8)$$

$$\tau_{i\ \min} = \tau_i - \left( \tau_i / K_\tau \right), \quad (9)$$

where $K_\tau$ is the tolerance factor, which takes into account the inaccuracy of determining the period of follow-up of pulses by the station of radio monitoring.

The device square error of measurement $\tau_i$ (duration of impulses) no more, than 0,1 microseconds, coefficient $K_\tau$ is defined and makes up $K_\tau$ = 2000; $\tau_{i\ \max}$, $\tau_{i\ \min}$ is the maximum and minimum value of pulse duration, taking into account the coefficient of tolerance.

When weighing weight coefficients in cases with $T_i$ and $\tau_i$ value of weight coefficients $P_T = 1$ and $P_\tau = 1$.

After creating an array with a list of SRE and their total probabilistic parameters whose parameters are more or less consistent with the reference ones, the algorithm of the expert system works by sorting the array that places the SRE in the order of decreasing their probabilistic values.

Last stage of the web service's work is to formulate a response to the radiomonitoring program and transfer it to the SOAP protocol.

After receiving a response from the web service, the radiomonitoring program displays the values of the SRE type table for confirmation by the operator of the radio monitoring station.

## Conclusion from this explosion

In order to solve the scientific problem of automation of the process of detection and recognition of radiation sources, for the first time an expert system was supported for decision-making on determining the type of SRE in terms of its signal parameters in the interests of radio-monitoring. As the system advises the operator of the radio monitoring station on the most likely option, requirements for qualification of operators can be reduced, which significantly reduces the financial and time costs for their training, and the process of work at the station becomes part of training the operator.

Directions of further researches on the improvement of the software algorithm of the expert estimation of the signal, subject to the deep modernization of the equipment, will allow the transition to semi-automatic or fully automatic operation of the radio monitoring station, which will open new possibilities and significantly increase the efficiency of radio monitoring through increased efficiency and reliability of decision-making by operators of radio monitoring stations.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Куприянов А.И. Теоретические основы электронной войны / А.И. Куприянов, А.В. Сахаров. – М.: Университетская книга, 2007. – 355 с.
2. Таунсенд К. Проектная и программная реализация экспертных систем на персональном компьютере / К. Таунсенд, Д. Фохт. – М.: Финансы и статистика, 1990. – 320 с.
3. Ouzzani, M. Semantic Web Services for Web Databases / M. Ouzzani, A. Bouguettaya. – Springer Science + Business Media, 2011. – 155 с.
4. Feilner M. *Beginning* OpenVPN 2.0.9 / Markus Feilner, Norbert Graf. – Packt Publishing, 2009. – 345 с.
5. Фаронов В.В. Дельфи 5. Руководство разработчика базы даннях / В.В. Фаронов, П.В. Шумаков. – М.: Знание, 2000. – 640 с.

REFERENCES

1. Kupriyanov, A.I. and Saharov, A.V. (2007), *Theoretical basis of electronic warfare*, University Book, Moscow, 355 p.

2. Taunsend, K. and Foht, D. (1990), *Design and software implementation of expert systems on personal computer*, Finance and Statistics, Moscow, 320 p.
3. Ouzzani, M. and Bouguettaya, A. (2011), *Semantic Web Services for Web Databases*, Springer Science+Business Media, 155 p.
4. Markus, Feilner and Norbert, Graf (2009), *Beginning OpenVPN 2.0.9,* Publisher : Packt Publishing, 345 p.
5. Faronov, V.V. and Shumakov, P.V (2000), *Delphi 5. Database Developer's Guide*, Knowledge, Moscow, 640 p.

Надійшла (received) 28.01.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 23.03.2018

**Аналіз експертної системи підтримки прийняття рішень по визначенню типу джерел радіовипромінювань**

С. С. Гаценко, Ю. А. Бучинський

Авторами проаналізовані джерела радіоелектронного випромінювання і описана складність їх ідентифікації при апріорній невизначеності. Заявлено, що джерело радіоелектронного випромінювання може бути ідентифікований набором параметрів його сигналу. Встановлено, що інформаційний характер джерела сигналу радіовипромінювання для пристроїв радіомоніторингу залежить від того, наскільки достовірний цей сигнал і наскільки точно (достовірно) визначені параметри, які його ідентифікують. Оскільки моніторинг сигналів завжди відбувається на тлі різних видів перешкод, факт виявлення сигналу, а також помилки у вимірі параметрів сигналу та вибір повідомлень завжди випадкові. Проблема визначення типу сигналу і, отже, джерела, який він випромінює, частково вирішується попереднім аналізом ефіру на слух, який проводиться операторами радіомоніторингу. Це дозволяє не відволікатися від неінформативних сигналів, що відносяться до джерел радіоелектронного випромінювання, які не виявляють інтересу для радіомоніторингу, скоротити час пошуку джерел радіоелектронного випромінювання і звести до мінімуму вартість амортизації обладнання. Недоліком цього методу є необхідність мати достатню кількість навчених операторів і постійне їх навчання. Визначено, що підготовка одного оператора до професійного рівня може тривати 6-12 місяців. Тому в даній статті пропонується проаналізувати параметри джерел радіоелектронного випромінювання по набору параметрів джерел сигналів радіоелектронного випромінювання за допомогою системи підтримки прийняття рішень по визначенню параметрів джерел радіоелектронного випромінювання. У статті автори запропонували експертну систему для визначення параметрів джерел радіоелектронного випромінювання з використанням системи управління базами даних. На відміну від машинних програм, які використовують процедурний аналіз, експертні системи вирішують проблеми у вузькій предметній області (спеціальна галузь знань) на основі дедуктивних міркувань. Такі системи часто можуть знайти рішення, які неструктурованість і погано визначені. Вони справляються з відсутністю структурування, використовуючи евристику, тобто правила, описані відповідно до досвіду використання обладнання, які можуть бути корисні в тих ситуаціях, коли відсутні необхідні знання або кількість часу виключає можливість повного аналізу.

**Ключові слова:** радіомоніторинг; експертна система; система підтримки прийняття рішення; розподілені обчислення.

**Анализ экспертной системы поддержки принятия решений по определению типа источников радиоизлучений**

С. С. Гаценко, Ю. А. Бучинский

Авторами исследованы источники радиоизлучения и описана сложность их идентификации при априорной неопределенности. Заявлено, что источник радиоэлектронного излучения может быть идентифицирован набором параметров его сигнала. Установлено, что информационный характер источника сигнала радиоизлучения для устройств радиомониторинга зависит от того, насколько достоверен этот сигнал и насколько точно (достоверно) определены параметры, которые его идентифицируют. Поскольку мониторинг сигналов всегда происходит на фоне различных видов помех, факт обнаружения сигнала, а также ошибки в измерении параметров сигнала и выбор сообщений всегда случайны. Проблема определения типа сигнала и, следовательно, источника, который он излучает, частично решается предварительным анализом эфира на слух, который проводится операторами радиомониторинга. Это позволяет не отвлекаться от неинформативных сигналов, относящихся к источникам радиоэлектронного излучения, которые не проявляют интереса для радиомониторинга, сократить время поиска источников радиоэлектронного излучения и свести к минимуму стоимость амортизации оборудования. Недостатком этого метода является необходимость иметь достаточное количество обученных операторов и постоянное их обучение. Определено, что подготовка одного оператора до профессионального уровня может длиться 6-12 месяцев. Поэтому в данной статье предлагается проанализировать параметры источников радиоэлектронного излучения по набору параметров источников сигналов радиоэлектронного излучения с помощью системы поддержки принятия решений по определению параметров источников радиоэлектронного излучения. В статье авторы предложили экспертную систему для определения параметров источников радиоэлектронного излучения с использованием системы управления базами данных. В отличие от машинных программ, которые используют процедурный анализ, экспертные системы решают проблемы в узкой предметной области (специальная область знаний) на основе дедуктивных соображений. Такие системы часто могут найти решения, которые неструктурированны и плохо определены. Они справляются с отсутствием структурирования, используя эвристику, то есть правила, описанные в соответствии с опытом использования оборудования, которые могут быть полезны в тех ситуациях, когда отсутствуют необходимые знания или количество времени исключает возможность полного анализа.

**Ключевые слова:** радиомониторинг; экспертная система; система поддержки принятия решения; распределенные вычисления.

УДК 681.142 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.07**

В. А. Краснобаев [1], С. А. Кошман [1], В. А. Чеснок [1], А. С. Янко [2]

[1] Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, Харьков, Украина
[2] Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина

# ТАБЛИЧНЫЙ МЕТОД ОБРАБОТКИ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМЕ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ

**Предметом** изучения в статье являются процессы обработки информации в системах обработки информации, которые построены на основе непозиционной системы счисления в остаточных классах (СОК). **Целью** статьи является разработка табличного метода обработки цифровой информации, представленной в СОК. **Задачи**: исследовать особенности применения табличной арифметики в СОК; исследовать существующие табличные методы реализации модульных арифметических операций; разработать усовершенствованный табличный метод реализации арифметических операций в СОК, который позволит сократить количество оборудования матричных схем. Используемыми **методами** являются: методы анализа и синтеза, а также методы теории чисел. Получены следующие результаты. Проанализирована цифровая структура таблиц модульных операций сложения, вычитания и умножения, на основании чего разработан новый оригинальный табличный метод реализации арифметических операций в СОК. Данный метод основан на использовании кода табличного умножения, который приобрел новое качество и стал универсальным табличным кодом для выполнения трех арифметических операций. Данный метод даёт возможность синтезировать конструктивно простое и быстродействующее операционное устройство в СОК. **Выводы**. Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: усовершенствован табличный метод обработки цифровой информации, который, несмотря на информационное различие свойств цифровых данных структур таблиц, реализующих модульные операции в СОК, позволяет реализовать всего по 0,25 части полных таблиц, что ранее предполагалось невозможным. Результаты исследований целесообразно использовать в системах и устройствах обработки больших массивов цифровой информации в реальном времени.

**Ключевые слова:** система обработки информации; система счисления в остаточных классах; табличная арифметика; класс вычетов; массив цифровой информации.

## Введение

Задача решение трудоемких вычислительных научно-практических задач состоит в основном в необходимости проведения значительных объемов вычислений в реальном времени. Таким образом, важны и актуальны исследования, посвященные совершенствованию существующих и разработки новых методов и средств повышения производительности переработки цифровой информации систем обработки информации (СОИ) реального времени, в частности, табличных методов обработки цифровой информации.

**Целью статьи** является разработка табличного метода обработки цифровой информации, представленной в непозиционной системе счисления в остаточных классах (СОК).

## Анализ последних исследований

Все позиционные системы счисления (ПСС), используемые в современных СОИ, в которых представляется и обрабатывается информация, обладают существенным недостатком – наличием межразрядных связей в обрабатываемых операндах. Это обстоятельство обуславливает основное ограничение по повышению производительности СОИ в ПСС [1].

В современных литературных источниках отмечается, что одним из действенных практических направлений повышения пользовательской производительности вычислительных средств является внедрение нетрадиционных методов представления и обработки информации в числовых системах с параллельной структурой, и в частности, в так называемых модулярных системах счисления, обладающих максимальным уровнем внутреннего параллелизма в организации процесса переработки информации. К таким системам счисления относится и непозиционная система счисления в остаточных классах – классе вычетов [2-4].

Одно из свойств СОК - малоразрядность остатков, представляющих операнд. Именно это свойство позволяет существенно повысить быстродействие выполнения арифметических операций счет возможности применения (в отличии от ПСС) табличной арифметики, где арифметические операции сложения, вычитания и умножения выполняются практически в один такт [5-8].

В общем случае табличное операционное устройство СКСОИ для реализации арифметических операций (которые реализуется в унитарном коде) представляет собой двухвходовое ПЗУ. Для каждого из входов количество входных шин для $l$-байтовой ($8l$ двоичных разряда) СОИ равно $2^{8l}$. При этом общее количество логических схем совпадения “И” в узлах ПЗУ (которое в основном и определяет общее количество оборудования табличного операционного устройства СОИ) равно

$$N_{1\,\text{ПСС}} = 2^{8l} \times 2^{8l} = 2^{16l}.$$

В этом случае $N_1 = 2^{16} = 65536$, что является приемлемым количеством оборудования для современного развития элементной базы. Однако, как отмечалось выше, тенденция развития средств обработки цифровой информации направлена на увеличение длины разрядной сетки СОИ. Уже сейчас предлагается к практическому использованию СОИ для $l=2$.

В этом случае

$$N_{4\text{ПСС}} = 2^{32} \times 2^{32} = 2^{64} \text{ и } N_{8\text{ПСС}} = 2^{64} \times 2^{64} = 2^{128}.$$

Очевидно, что табличный метод реализации арифметических операций в ПСС практически не применим. Поиск путей повышения производительности обработки информации привел к необходимости разработки табличного метода реализации модульных операций, использование которого позволит повысить эффективность применения табличной арифметики в СОК.

Отметим основные достоинства табличного варианта построения СОИ в СОК:

- табличные схемы имеют высокую надежность, так как реализуются в виде компактных ПЗУ; в этом случае весь тракт СОИ строится по блочному принципу, что улучшает ремонтопригодность СОИ (уменьшается время восстановления $T_в$);

- простота табличных схем и дешифраторов, имеющих количество выходов, соответствующих основанию СОК;

- высокое быстродействие; результат операции может быть получен в момент поступления входных операндов, т.е. в один такт; время выполнения арифметических операций в СОК сравнимо с тактовой частотой вычислителя, что принципиально невозможно для позиционных вычислительных машин при существующей элементной базе.

Известен табличный метод реализации операции модульного умножения в СОК, который реализуется посредством использованием кода табличного умножения (КТУ). В этом случае таблица $a_i\beta_i \ (mod\ m_i)$ модульного умножения для произвольного основания $m_i$ СОК симметрична относительно левой (главной) и правой диагоналей, а также вертикали и горизонтали. Симметричность относительно левой диагонали определяется коммутативностью операции $a_i\beta_i$ умножения, а симметричность относительно правой диагонали определяется тем, что

$$(m_i - a_i)(m_i - \beta_i) \equiv a_i\beta_i (\mathrm{mod}\, m_i).$$

Симметричность относительно вертикали и горизонтали определяется из условия кратности значения модуля сумме симметричных чисел таблицы умножения

$$a_i\beta_i + a_i(m_i - \beta_i) \equiv 0 (\mathrm{mod}\, m_i)$$

$$a_i\beta_i + \beta_i(m_i - a_i) \equiv 0 (\mathrm{mod}\, m_i)$$

Исходя из вышеизложенного очевидно, что для табличной реализации операции модульного умножения $a_i\beta_i (\mathrm{mod}\, m_i)$ достаточно иметь числовую информацию только об ее восьмой части. Отсюда возникает возможность упростить таблицу модульного умножения.

Для наиболее эффективной реализации операции $a_i\beta_i (\mathrm{mod}\, m_i)$ применяются методы специального кодирования, позволяющие в четыре раза уменьшить таблицу модульного умножения. Решение поставленной задачи возможно в результате применения специальных кодов.

Рассмотрим один из вариантов выполнения операции модульного умножения посредством использования КТУ (табл. 1 и 2 для $m_i = 5$).

*Таблица* 1. **Код табличного умножения**

| $a_i$ | КТУ | | $a_i$ | КТУ | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $\gamma_a$ | $a_i'$ | | $\gamma_a$ | $a_i'$ |
| 1 | 0 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| 2 | 0 | 2 | 4 | 1 | 1 |

*Таблица* 2. **Таблица модульного умножения**

| $\beta_i$ \ $a_i$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 2 | 0 | 2 | 4 | 1 | 3 |
| 3 | 0 | 3 | 1 | 4 | 2 |
| 4 | 0 | 4 | 3 | 2 | 1 |

Пусть даны входные операнды $a_i$ и $\beta_i$. Значения $a_i(\beta_i)$, лежащие в диапазоне $[0,(m_i-1)/2)$, могут быть закодированы произвольным способом, а значения $a_i(\beta_i)$, лежащие в диапазоне $[(m_i+1)/2, m_i-1)$, кодируется, как $m_i - a_i(m_i - \beta_i)$. Для отличия диапазонов вводится следующий индекс (признак) КТУ:

$$\gamma_a(\gamma_\beta) = \begin{cases} 0, \text{ если } 0 \le a_i(\beta_i) \le (m_i-1)/2, \\ 1, \text{ если } (m_i+1)/2 \le a_i(\beta_i) \le m_i - 1. \end{cases}$$

Метод определения результата операции модульного умножения $a_i'\beta_i' (\mathrm{mod}\ m_i)$ в СОК посредством использования КТУ следующий: если заданы два операнда в КТУ $a_i = (\gamma_a, a_i'), \beta_i = (\gamma_\beta, \beta_i')$, то для того, чтобы получить произведение этих чисел по модулю $m_i$, достаточно найти произведение $a_i'\beta_i' (\mathrm{mod}\ m_i)$ и инвертировать его обобщенный индекс $\gamma_i$ в случае, если $\gamma_a$ отлично от $\gamma_\beta$, т.е.

$$a_i\beta_i (\mathrm{mod}\ m_i) = (\gamma_i, a_i'\beta_i' (\mathrm{mod}\ m_i)),$$

где

$$\gamma = \begin{cases} \overline{\gamma}_i, \text{ если } \gamma_a \ne \gamma_\beta, \\ \gamma_i, \text{ если } \gamma_a = \gamma_\beta; \end{cases}$$

$$a_i' = \begin{cases} a_i, \text{ если } \gamma_a = 0, \\ m_i - a_i, \text{ если } \gamma_a = 1. \end{cases}$$

При использовании данного метода табличное ПЗУ, реализующее операцию модульного умножения, конструктивно уменьшаются в четыре раза.

При выполнении операции табличными методами в некоторых случаях возможно дополнительное уменьшение оборудования за счет того, что строится не единая таблица для модульных операций, а $k$ боле мелких таблиц, позволяющих

дать ответы по каждому из $k$ разрядов результата, где $k$ – разрядность регистра, необходимая для хранения цифр остатка по рассматриваемому основанию $m_i$ СОК.

## Основные материалы исследований

До сих пор вопросы эффективной реализации арифметических операций сложения и вычитания с использованием КТУ в литературе либо не рассматривались, либо такая реализация считалась большинством исследователей теоретически и практически невозможной.

Основная практическая трудность заключается в том, что довольно сложно синтезировать табличные алгоритмы выполнения этих модульных операций, так как таблицы реализации модульных операций сложения и вычитания различны по своей цифровой структуре вследствие чего они не обладают теми свойствами симметрии, которыми обладают таблицы модульного умножения. Однако совершенно иные результаты можно получить, исследуя возможности реализации одной модульной операции с помощью таблиц, реализующих обратную ей операцию, и наоборот.

При исследовании цифровых свойств таблиц модульных операций сложения и вычитания (табл. 1 и 2 для $m_i = 5$) выведено и доказано следующее аналитическое соотношение

$$\begin{aligned}&\left[\left(\gamma_a, a_i'\right)+\left(\gamma_\beta, \beta_i'\right)\right]+\\&\left\{\left[m_i-\left(\gamma_a, a_i'\right)\right]-\left(\gamma_\beta, \beta_i'\right)\right\}=0\left(\operatorname{mod} m_i\right),\end{aligned} \quad (1)$$

где $a_i = \left(\gamma_a, a_i'\right)$, $\beta_i = \left(\gamma_\beta, \beta_i'\right)$ – входные операнды, представленные в КТУ.

*Таблица* 3. **Таблица модульного сложения**

| $\beta_i$ \ $a_i$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 |
| 2 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 |
| 3 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 |
| 4 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 |

*Таблица* 4. **Таблица модульного вычитания**

| $\beta_i$ \ $a_i$ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 3 | 4 | 0 | 1 | 2 |
| 3 | 2 | 3 | 4 | 0 | 1 |
| 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 0 |

Запишем выражение (1) в виде

$$\begin{aligned}&\left(\gamma_a, a_i'\right)+\left(\gamma_\beta, \beta_i'\right)=\\&=m_i-\left\{\left[m_i-\left(\gamma_a, a_i'\right)\right]-\left(\gamma_\beta, \beta_i'\right)\right\}.\end{aligned} \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что для получения результата операции модульного сложения в КТУ достаточно знать результат операции модульного вычитания, т.е. возникает возможность эффективно (с точки зрения уменьшения количества оборудования ПЗУ) использовать КТУ одновременно для трех модульных операций: умножения, сложения и вычитания. На основании выражения (2) рассмотрим метод, посредством которого можно будет осуществлять выполнения любой из трех арифметических операций в СОК: умножение, сложение и вычитание. Операция модульного сложения осуществляется посредством алгоритма, описанного выражением (2). Составим алгоритм выполнения операции модульного сложения с помощью таблицы, для выполнения операции модульного вычитания

$$\left(a_i' - \beta_i'\right) \operatorname{mod} m_i .$$

В соответствии с выражением (2) рассмотрим алгоритм реализации операции модульного сложения.

1. Уменьшаемое $a_i = \left(\gamma_a, a_i'\right)$ инвертируется по модулю $m_i$, т.е. получим следующее выражение: $\overline{a}_i = \left(\left(\gamma_a + 1\right) \operatorname{mod} 2, a_i'\right)$. Вычитаемое $\left(\gamma_\beta, \beta_i'\right)$ оставляем без изменений.

2. Посредством ПЗУ, реализующего операцию модульного вычитания, по входным операндам $a_i'$ и $\beta_i'$ определяется результат операции

$$\left(a_i' - \beta_i'\right) \operatorname{mod} m_i .$$

Как и для алгоритма модульного умножения, индекс $\gamma_i$ результата операции модульного вычитания формируется в соответствии со значениями индексов соответствующих операндов, т.е. в соответствии со значениями $(\gamma_a + 1) \operatorname{mod} 2$ и $\gamma_\beta$, где:

$$\gamma_i = \begin{cases} \overline{\gamma}, \text{ если } \left(\gamma_a + 1\right) \operatorname{mod} 2 \neq \gamma_\beta, \\ \gamma, \text{ если } \left(\gamma_a + 1\right) \operatorname{mod} 2 = \gamma_\beta. \end{cases}$$

Следовательно, результат операции модульного вычитания будет иметь следующий вид:

$$\left(\gamma_i, \left(a_i' - \beta_i'\right) \operatorname{mod} m_i\right).$$

3. Полученный результат модульного вычитания инвертируем по модулю $m_i$:

$$\left(\left(\gamma_i + 1\right) \operatorname{mod} 2, \left(a_i' - \beta_i'\right) \operatorname{mod} m_i\right).$$

Это и будет искомый результат модульного сложения.

Таким образом, несмотря на различие цифровой структуры таблиц модульных операций сложения, вычитания и умножения, создан новый ориги-

нальный табличный метод реализации арифметических операций в СОК.

На основании данного метода можно синтезировать конструктивно простое и высоконадежное операционное устройство СОИ в СОК, основу которого составляют три отдельных коммутатора, каждый из которых реализует только 0,25 части соответствующей полной таблицы модульных операций умножения (табл. 2) и вычитания (табл. 4) (первый коммутатор – II-квадрант таблицы умножения (табл. 5); второй и третий коммутаторы – соответственно I (табл. 7) и II (табл. 6) квадранты табл. 4 вычитания).

В этом плане код табличного умножения приобрел новое качество и стал универсальным табличным кодом для выполнения трех арифметических операций в СОК.

*Таблица 5*. **2-й квадрант таблицы 2**

| $\beta_i$ \ $a_i$ | | 1 | 2 |
|---|---|---|---|
| | | 4 | 3 |
| 1 | 4 | 1 | 2 |
| 2 | 3 | 2 | 4 |

*Таблица* 6. **2-й квадрант таблицы 4**

| $\beta_i$ \ $a_i$ | | 1 | 2 |
|---|---|---|---|
| | | 4 | 3 |
| 1 | 4 | 0 | 1 |
| 2 | 3 | 4 | 0 |

*Таблица* 7. **1-й квадрант таблицы 4**

| $\beta_i$ \ $a_i$ | | 2 | 1 |
|---|---|---|---|
| | | 3 | 4 |
| 1 | 4 | 2 | 3 |
| 2 | 3 | 1 | 2 |

*Таблица 8*. **2-й квадрант таблицы 3**

| $\beta_i$ \ $a_i$ | | 1 | 2 |
|---|---|---|---|
| | | 4 | 3 |
| 1 | 4 | 2 | 3 |
| 2 | 3 | 3 | 4 |

*Таблица 9*. **1-й квадрант таблицы 3**

| $\beta_i$ \ $a_i$ | | 2 | 1 |
|---|---|---|---|
| | | 3 | 4 |
| 1 | 4 | 4 | 0 |
| 2 | 3 | 0 | 1 |

## Выводы

В статье предложен метод обработки цифровой информации в СОК, основанный на табличном принципе.

Посредством данного метода реализуются арифметические операций модульного сложения, вычитания и умножения. Данный метод (в отличии от известных) несмотря на информационное различие свойств цифровых данных структур таблиц, реализующих модульные операции $(a_i \otimes \beta_i) \bmod m_i$ в СОК, позволяют реализовать всего по 0,25 части каждой из полных таблиц, что ранее предполагалось невозможным.

Основное преимущество предложенного метода состоит в возможности достижения высокого быстродействия обработки информации. Так результат выполнения арифметической целочисленной операции может быть получен в момент поступления на обработку входных операндов, т.е. практически в один такт.

Таким образом, время выполнения арифметических операций в СОК сравнимо с тактовой частотой вычислителя, что принципиально невозможно для СОИ в ПСС.

Результаты предложенных исследований целесообразно использовать в системах и устройствах обработки больших массивов цифровой информации в реальном времени.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ


1. Акушский И. Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И. Я.Акушский, Д. И. Юдицкий. – М.: Сов. радио, 1968. – 440 с.
2. Krasnobayev V. A. A method for increasing the reliability of verification of data represented in a residue number system / V. A. Krasnobayev, S. A. Koshman, M. A. Mavrina // Cybernetics and Systems Analysis. – 2014. – Vol. 50, Issue 6. – P. 969-976.
3. Krasnobayev V. A. A Method for arithmetic comparison of data represented in a residue number system / V. A. Krasnobayev, A. S. Yanko, S. A. Koshman // Cybernetics and Systems Analysis. – Vol. 52, Issue 1. – P. 145-150.
4. Мороз С.А. Метод верификации данных в системе непозиционных остаточных вычетов / С. А. Мороз, В. А. Краснобаев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава : ПНТУ, 2011. – Вип. 2 (18). – С. 134-138.
5. The statistical analysis of a network traffic for the intrusion detection and prevention systems / Kuznetsov A. A., Smirnov A. A., Danilenko D. A., Berezovsky A. V. // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol. 74. – P. 61-78.
6. Stasev Yu. V. Asymmetric Code-Theoretical Schemes Constructed with the Use of Algebraic Geometric Codes" / Yu. V. Stasev, A. A. Kuznetsov // Cybernetics and Systems Analysis. – 2005. – Vol. 41, Issue 3. – P. 354-363.

7. Krasnobayev V. A. A method for operational diagnosis of data represented in a residue number system / V. A. Krasnobayev, S. A. Koshman // Cybernetics and Systems Analysis. – 2018. – Vol. 54, Issue 2. – P. 336-344.
8. Gorbenko I. Examination and implementation of the fast method for computing the order of elliptic curve / I. Gorbenko, R. Hanzia // European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 2, No. 9(86). – P. 11-21.

REFERENCES

1. Akushsky, I.Ya. and Yuditsky, D.I.(1968), *Machine arithmetic in residual classes*, Sov. Radio, Moscow, 440 p.
2. Krasnobayev, V.A., Koshman, S.A. and Mavrina, M.A. (2014), "A method for increasing the reliability of verification of data represented in a residue number system", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 50, Issue 6, pp. 969-976.
3. Krasnobayev, V.A., Yanko, A.S. and Koshman, S.A. (2016), "A Method for arithmetic comparison of data represented in a residue number system", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 52, Issue 1, pp. 145-150.
4. Moroz, S.A. and Krasnobayev, V.A. (2011), "A data verification method in a non-positional residue number system", *Control, Navigation, and Communication Systems*, No. 2 (18), pp. 134-138.
5. Kuznetsov, A.A., Smirnov, A.A., Danilenko, D.A. and Berezovsky, A.V. (2015), "The statistical analysis of a network traffic for the intrusion detection and prevention systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 74, pp. 61-78.
6. Stasev, Yu.V., Kuznetsov, A.A. (2005), "Asymmetric Code-Theoretical Schemes Constructed with the Use of Algebraic Geometric Codes", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 41, Issue 3, pp. 354-363.
7. Krasnobayev V.A. and Koshman S.A. (2018), "A method for operational diagnosis of data represented in a residue number system", *Cybernetics and Systems Analysis*, Vol. 54, Issue 2, pp. 336-344.
8. Gorbenko, I. and Hanzia, R. (2017), "Examination and implementation of the fast method for computing the order of elliptic curve", *European Journal of Enterprise Technologies*, Vol 2, No. 9 (86), pp. 11-21.

Надійшла (received) 13.02.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 11.04.2018

**Табличний метод обробки цифровий інформації у системі залишкових класів**

В. А. Краснобаєв, С. О. Кошман, В. О. Чеснок, А. С. Янко

**Предметом** вивчення в статті є процеси обробки інформації в системах обробки інформації, які побудовані на основі непозиційної системи числення в залишкових класах (СЗК). **Метою** статті є розробка табличного методу обробки цифрової інформації, представленої в СЗК. **Завдання:** дослідити особливості застосування табличної арифметики в СЗК; дослідити існуючі табличні методи реалізації модульних арифметичних операцій; розробити вдосконалений табличний метод реалізації арифметичних операцій в СЗК, який дозволить скоротити кількість обладнання матричних схем. Використаними **методами** є: методи аналізу і синтезу, а також методи теорії чисел. Отримані наступні результати. Проаналізована цифрова структура таблиць модульних операцій додавання, віднімання і множення, на підставі чого розроблено новий оригінальний табличний метод реалізації арифметичних операцій в СЗК. Даний метод заснований на використанні коду табличного множення, який придбав нову якість і став універсальним табличним кодом для виконання трьох арифметичних операцій. Даний метод дає можливість синтезувати конструктивно простий і швидкодіючий операційний пристрій в СЗК. **Висновки**. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: удосконалено табличний метод обробки цифрової інформації, який, незважаючи на інформаційну відмінність властивостей цифрових даних структур таблиць, що реалізують модульні операції в СЗК, дозволяє реалізувати всього по 0,25 частини повних таблиць, що раніше було неможливим. Результати досліджень доцільно використовувати в системах і пристроях обробки великих масивів цифрової інформації в реальному часі.

**Ключові слова:** система обробки інформації; система числення в залишкових класах; таблична арифметика; клас вирахувань; масив цифрової інформації.

**Table method for processing digital information in the system of residual classes**

V. A. Krasnobayev, S. A. Koshman, V. A. Chesnok, A. S. Yanko

In the article **subject** of the study is the data processing in the data processing systems, which are built on the basis of non-positional number system in the residual classes (SRC). The **purpose** of the article is to develop a tabular method for digital data processing presented in the SRC. **Objectives**: to investigate the features of using tabular arithmetic in SRC; to explore the existing tabular methods for implementing modular arithmetic operations; to develop an improved tabular method for implementing arithmetic operations in SRC, which will reduce the number of hardware matrix schemes. The used **methods** are: methods of analysis and synthesis, as well as methods of number theory. The following **results** were obtained. The digital structure of the tables of modular operations of addition, subtraction and multiplication was analyzed, so a new original tabular method for implementing arithmetic operations in the SRC was developed. This method is based on the use of the table multiplication code, which acquired a new quality and became a universal table code for performing three arithmetic operations. This method makes it possible to synthesize a constructively simple and fast operating device in the SRC. **Conclusions**. The scientific novelty of the obtained results is: the table method for processing digital information has been improved, despite the information difference in the properties of the digital data of table structures, implementing modular operations in the SRC, allows to implement only 0.25 parts of complete tables, which was previously supposed impossible. The results of the research should be used in systems and devices for processing large arrays of digital data in real time.

**Keywords:** data processing system; number system in residual classes; tabular arithmetic; class of residues; array of digital information.

UDC 681.324 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.08**

S. Oberemok [1], Yu. Dolgiy [2], S. Khmelevskii [2], S. Rud [3]

[1] Kirovohrad Flight Academy National Aviation University, Kropyvnytskyi, Ukraine
[2] Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
[3] Air Command "Zakhid", Lviv, Ukraine

# IMPACT ASSESSMENT OF DATA SET PROCESSING REFUSAL ON TIME CHARACTERISTIC OF DATA PROCESSING BY AIR TRAFFIC IN ACS NETWORK

During transfer of information in automated control system network by air traffic is a high probability of durable spike load. **The purpose** is to analyse influence of possible switching node faults on the basis of data transfer process time characteristic in error-control mode by receiver. It is shown that the increase of discard probability on interconnection node of communication reduce to increasing nondimensional average time of message delivery for wide parameter range and can reduce to complete cessation of information exchange. A probabilistic and temporal characteristic of supply control method of data set transfer in data-exchange network requires consideration of interconnection switching node. There is a necessity to consider both the existence of several data flows from other sources and possibility of fault occurrence in operation on each of switching nodes.

**Keywords:** data transfer; switching node; probabilistic and temporal characteristics; air traffic ACS; data set, time-out; correlation; fixing errors.

## Introduction

**Research objective.** Research of probabilistic and temporal characteristic of supply control method of data set transfer in data-exchange network (DEN) requires consideration of interconnection switching node (SN). In addition to the above, generally should be considered both the existence of several data flows from other sources and possibility of fault occurrence in operation on each of SN.

**Analysis of the well-known publications.** The [1] shows the possibility of data set loss on SN under conditions of spike load.

The [2] shows a model which helps to research main probabilistic and temporal characteristics of data transfer process in air traffic ACS net for fixing errors mode by receiver during data transfer through interconnection switching node without denial of service.

The [3] developed a model which helps to research main probabilistic and temporal characteristics of data transfer process in air traffic ACS net for fixing errors mode by receiver with the additional information flow from another sources and switching node problems.

**Purpose of the article.** Analysis of possible switching node influence in air traffic ACS net on the main probabilistic and temporal characteristics of data transfer process in the fixing errors mode by receiver.

## Main material

Message passing through interconnection SN with checking data sets by receiver and reconstruction of lost or distorted data sets (with encountered error) with the help of retries is considered.

The source gives a message length in $M$ bit which divides into $m$ bit data sets with information part. The total number of data sets generated from the message is $M / m$. Each data set is accompanied by $k_{сл}$ service bit and $r$ check bit. The total length of the generated data set is

$$n = m + k_{в} + r.$$

Assume that each of the switching nodes, number of which is denoted by β, in the case of an overflow of input buffers possible denial of service, i.e. data set loss probability $P_{втр}^{ВК}$.

The duration of the retransmission time-out is proportional to the data set delivery time:

$$T_{TA} = \eta T_n .$$

Based on the obtained in the [3] for the calculation formulas of the constraints it may be affirmed that loss of data set on switching node does not affect the accuracy of the transferred data inasmuch as such data sets are retransferred. Thus, possible denial of service on the switching nodes changes the time characteristics of the data transfer process.

The timing based on the obtained in [3] for the calculation formulas of the constraints and analyse the effect of possible losses at switching nodes of the data transfer should be analysed.

According to the nature of distribution, there are two types of errors [4]: uncorrelated, correlated.

**Error model.** It is known that errors in real computer networks (CN) can arise in groups (data sets). Therefore, the evaluation of the pulse-frequency characteristic on the basis of uncorrelated errors can be used for approximate calculations, since it has an approximate character [5].

For a channel with uncorrelated errors, the simplest error model (the Poisson model) is often used. Its properties of computer networks as a source of error are given probability of error in the unit cell codeword – $P_n$. In this case, all errors are considered to be independent. Let the probability of distortion of a single data element in CN is. Then the probability of a correct combination with $n$ elements:

$$P_{pr} = \left(1 - P_{pr}\right)^n . \quad (1)$$

If the properties of error-correcting code applied unknown proportion not found error depends on the

number of parity bits r [9]. The probability of not detecting an error is defined as:

$$P_{no} = \left(1 - \left(1 - P_{pr}\right)^{n}\right) \cdot 2^{-r}. \quad (2)$$

**Analysis of time characteristics.** Based on the calculation formulas obtained in [7] for the accepted restrictions, it can be asserted that the loss of packets on the switching nodes does not affect the reliability of the transmitted data, since such packets are retransmitted. Thus, possible failures in the service at the switching node change the time characteristics of the data transfer process.

The time characteristics based on the calculation formulas obtained in [4] for the adopted constraints and the effect of possible losses on the switching nodes on the data transfer process should be analysed:

$$r = 8 \quad \text{i} \quad k_{в} = 8.$$

Fig. 1 shows that the relative mean time to deliver messages increases with the length of a package as in any CN. Moreover, all of the curves have a distinct minimum. This is due to the fact that for relatively small packet lengths, there is a large redundancy due to overhead and test bits. With a further increase in the length of the packets the redundancy caused by retransfers increases [10].

Increased probability of switching nodes in loss leads to an increase of the relative mean time of message delivery for a wide range of data set lengths.

The relative average message delivery time increases with the degradation of the quality of the CN (Fig. 2).

Increased probability of switching nodes loss also leads to the relative increase of the average time of message delivery for all values of the distortion probability of the unit element in a CN [8].

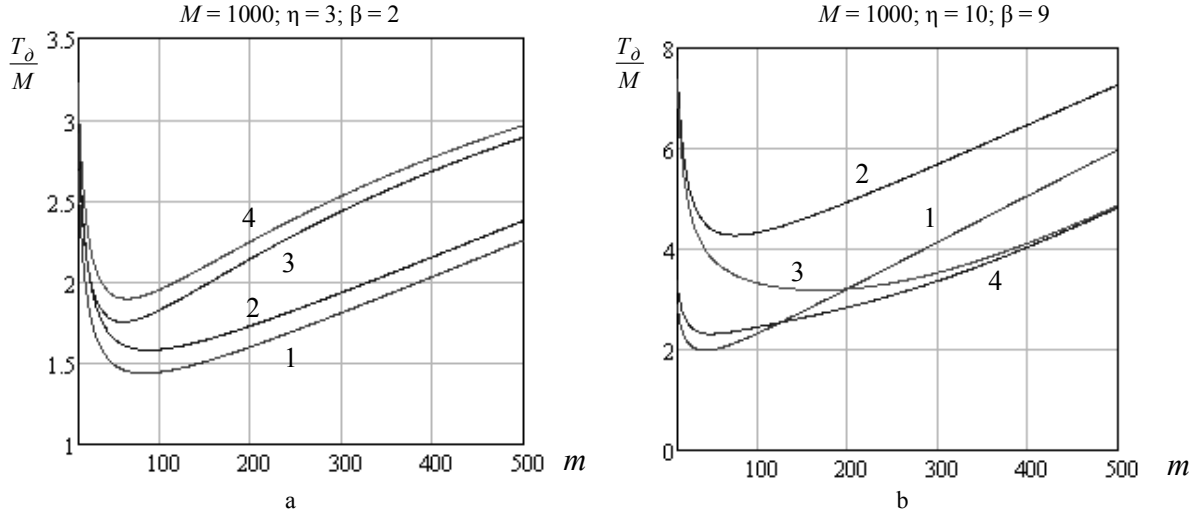



**Fig. 1.** Dependence of the relative average message delivery time on the data set length for:
$1 - P_n = 10^{-4}$, $P_{втр}^{ВК} = 0$; $2 - P_п = 10^{-4}$, $P_{втр}^{ВК} = 10^{-2}$; $3 - P_п = 10^{-3}$, $P_{втр}^{ВК} = 0$; $4 - P_п = 10^{-3}$, $P_{втр}^{ВК} = 10^{-2}$

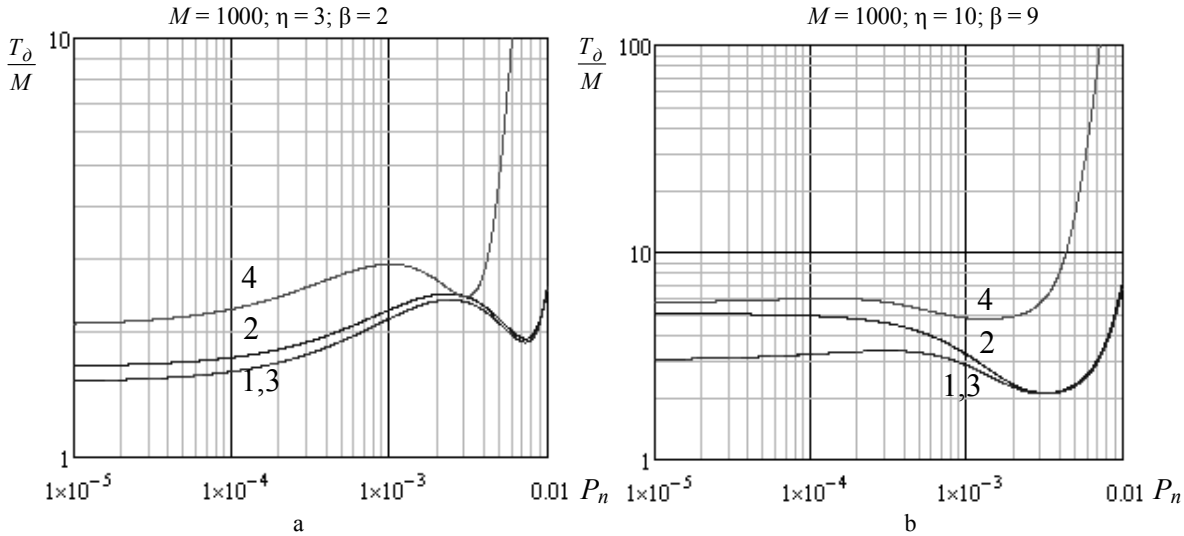



**Fig. 2.** Dependence of the relative average time of delivery
of messages on the probability of distortion of a single element in a computer network when:
$1 - m = 200$, $P_{втр}^{ВК} = 0$; $2 - m = 200$, $P_{втр}^{ВК} = 10^{-2}$; $3 - m = 200$, $P_{втр}^{ВК} = 10^{-5}$; $4 - m = 500$, $P_{втр}^{ВК} = 0$

The increase in the probability of packet loss at switching nodes leads to an earlier increase in the relative average time of message delivery with a greater number of switching nodes along the route of the packet (Fig. 3).

This statement more evident from the graph, the relative ratio of the average time of delivery if there is loss at the switching nodes relative to the average delivery time without loss of switching nodes (Fig. 4).

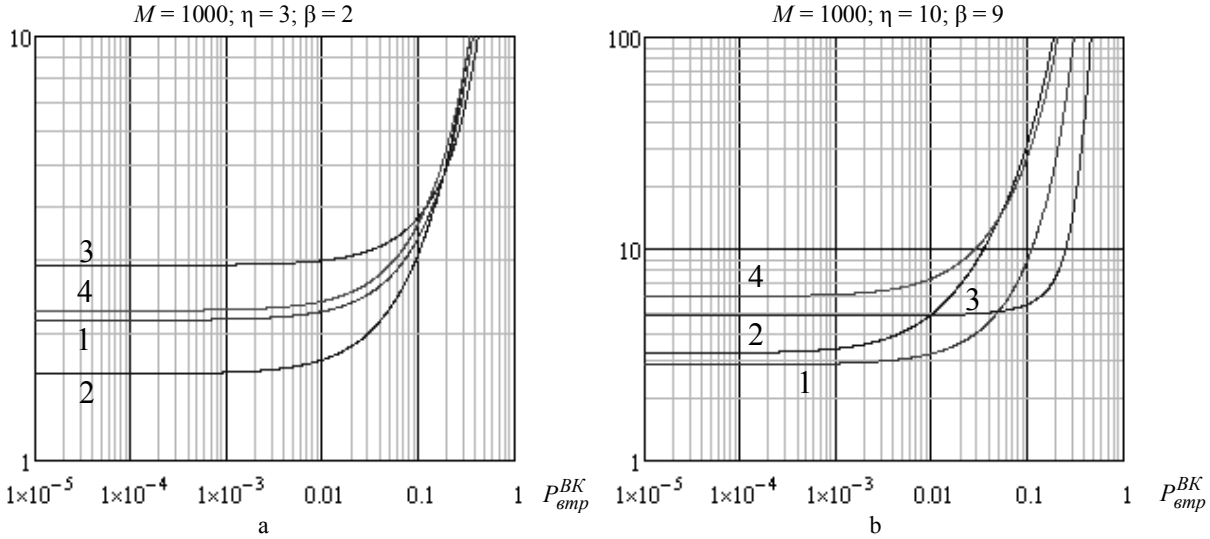



**Fig. 3.** Dependence of the relative average time of delivery of messages on the probability of data set loss on the switching nodes with:
$1 - m = 200$, $P_n = 10^{-3}$; $2 - m = 200$, $P_n = 10^{-4}$; $3 - m = 500$, $P_n = 10^{-3}$; $4 - m = 500$, $P_n = 10^{-4}$

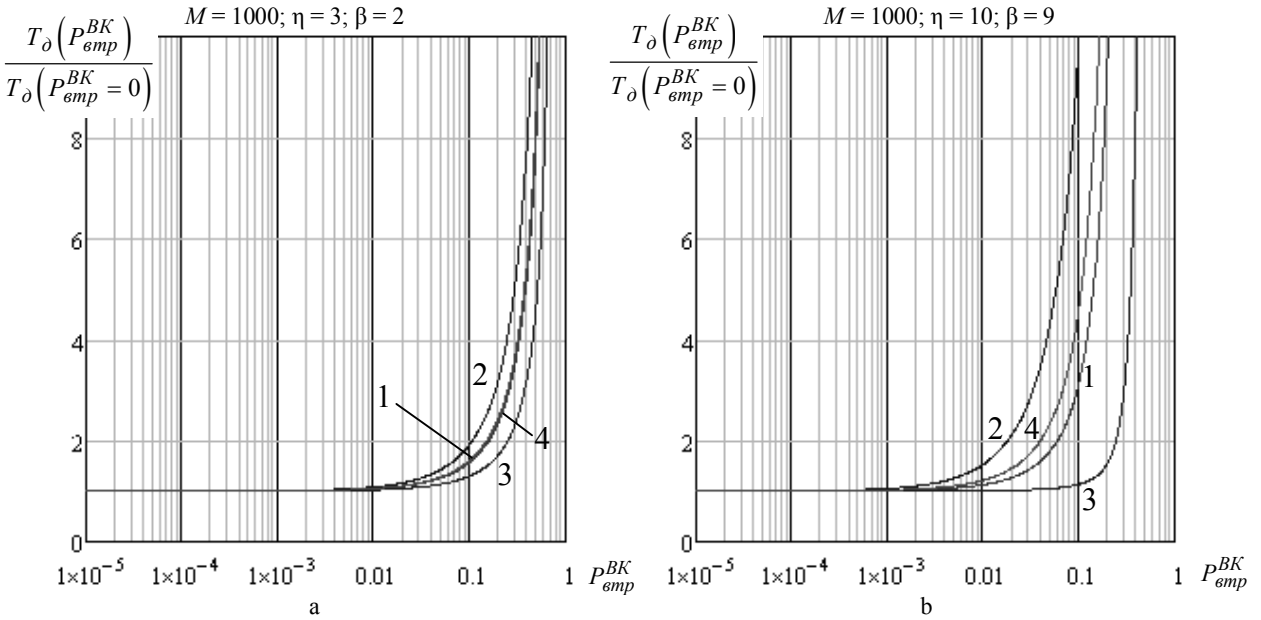



**Fig. 4.** Dependence of the ratio of the relative average message delivery time, taking into account the losses at the switching nodes to the relative average time of message delivery in the absence of losses at the switching nodes from the probability of packet loss at the switching nodes with:
$1 - m = 200$, $P_n = 10^{-3}$; $2 - m = 200$, $P_n = 10^{-4}$; $3 - m = 500$, $P_n = 10^{-3}$; $4 - m = 500$, $P_n = 10^{-4}$

In addition, a significant increase in the probability of service failures at intermediate switching nodes leads to a sharp increase in the relative average packet delivery time [6].

## Conclusion

The analysis of discard probability impact at interconnection switching nodes on temporary characteristics of data transfer process suggests that the increase of this probability leads to the increase of average time of massage delivery for a wide parameters range. Moreover, the impact of data sets loss at switching nodes is inherent for networks with a large number of retransmitting nodes. Special attention should be paid to the fact that even using high quality data lines (with small values of error probability of single element) the loss of data sets at switching nods can lead to complete termination of information exchange.

REFERENCES

1. Oberemok, S.O. (2018), “Model obrobky paketiv v komutatsiynykh vuzlakh z povnozvyaznoyu topolohiyeyu merezhi ASU povitryanym rukhom”, *Systems of control, navigation and communication*, PNTU, Poltava, Issue 1 (47), pp. 28-31.
2. Alekseyev, S.V. (2010), “Matematicheskaya model' protsessa peredachi dannykh cherez promezhutochnyye tsentry kommutatsii soobshcheniy dlya sluchaya primeneniya pomekhoustoychivogo koda v rezhime obnaruzheniya oshibok s proverkoy paketov poluchatelem”, *Zbírnik naukovikh prats' KhUPS*, KhUPS, Kharkiv, Issue 3 (25), pp. 123-125.
3. Oberemok, S.O. (2018), “Matematychna model protsesu peredachi danykh v rezhymi vyyavlennya pomylok otrymuvachem z urakhuvannyam vidmov na vuzlakh komutatsiyi v merezhakh ASU povitryanym rukhom”, *Zbirnyk naukovykh prats NUOU*, NUOU, Kyiv, Issue 4(31), pp. 78-83.
4. Shvartsman V.O. (2006), “Kachestvo uslug setey sleduyushchego pokoleniya”, *Elektrosvyaz*, No. 3, pp. 26-31.
5. Olifer, V. and Olifer, N. (2001), “Iskusstvo optimizatsii trafika”, *LAN*, No.12, pp. 38-47.
6. Nazarov, A.N. (2002), *Modeli i metody raschota strukturno-setevykh parametrov setey ATM*, Goryachaya liniya – Telekom, Moscow, 256 p.
7. Zitzler, E. (2012), “Evolutionary Multiobjective Optimization”, *Handbook of Natural Computing*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 871-904.
8. Keller, J., Liu, D. and Foge D. (2016), *Fundamentals of Computational Intelligence: Neural Networks, Fuzzy Systems, and Evolutionary Computation*, Hoboken, John Wiley & Sons Inc., NJ, 378 p.
9. Cencini, M., Cecconi, F. and Vulpiani A. (2010), *Chaos: From Simple Models to Complex Systems*, Hackensack, World Scientific, NJ, 460 p.
10. Walia, P. and Mehta, A. (2015), “Energy efficient geographic adaptive fidelity in wireless sensor networks”, *IOSR Journal of Computer Engineering*, Vol. 17, Issue 5, Ver. 1, pp. 46-55, **doi: 10.9790/0661-17514655**.

Надійшла (received) 13.02.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 11.04.2018

**Оцінка впливу відмов обробки пакетів на часові характеристики процесу обробки даних в мережах АСУ повітряним рухом**

С. О. Оберемок, Ю. С. Довгий, С. І. Хмелевський, С. О. Рудь

При передачі інформації в мережах автоматизованих систем управління повітряним рухом висока ймовірність виникнення довготривалих пікових навантажень. **Метою** є проведення аналізу впливу можливих відмов на вузлах комутації на основні часові характеристики процесу передачі даних в режимі виявлення помилок одержувачем. Показано, що збільшення ймовірності втрати пакетів на проміжних вузлах комутації призводить до зростання відносного середнього часу доставки повідомлень для широкого діапазону параметрів та може призвести до повного припинення інформаційного обміну. Ймовірнісно-часові характеристики методів управління процесом передачі пакетів в мережах обміну даними вимагають врахування впливу проміжних вузлів комутації. Є необхідність розглядати як наявність декількох потоків даних від інших джерел, так і можливість виникнення відмов в обслуговуванні на кожному з вузлів комутації. **Отримали наступні результати.** При використанні високоякісних каналів зв'язку (з малими значеннями ймовірності спотворення одиничного елементу) втрати пакетів на вузлах комутації можуть привести до повного припинення інформаційного обміну. **Висновки.** Проведений аналіз впливу ймовірності втрати пакетів на проміжних вузлах комутації на тимчасові характеристики процесу передачі даних свідчить про те, що збільшення цієї ймовірності призводить до зростання відносного середнього часу доставки повідомлень для широкого діапазону параметрів.

**Ключові слова:** передача даних; вузол комутації; ймовірнісно-часові характеристики; АСУ повітряним рухом; пакет даних; тайм-аут; кореляція; виявлення помилок.

**Оценка влияния отказов обработки пакетов на временные характеристики процесса обработки данных в сетях АСУ воздушным движением**

С. А. Оберемок, Ю. С. Долгий, С. И. Хмелевский, С. А. Рудь

При передаче информации в сетях автоматизированных систем управления воздушным движением высокая вероятность возникновения долговременных пиковых нагрузок. **Целью** является проведение анализа влияния возможных отказов на узлах коммутации на основные временные характеристики процесса передачи данных в режиме обнаружения ошибок получателем. Показано, что увеличение вероятности потери пакетов на промежуточных узлах коммутации приводит к росту относительного среднего времени доставки сообщений для широкого диапазона параметров и может привести к полному прекращению информационного обмена. Вероятностно-временные характеристики методов управления процессом передачи пакетов в сетях обмена данными требуют учета влияния промежуточных узлов коммутации. Есть необходимость рассматривать как наличие нескольких потоков данных от других источников, так и возможность возникновения отказов в обслуживании на каждом из узлов коммутации. **Получили следующие результаты.** При использовании высококачественных каналов связи (с малыми значениями вероятности искажения единичного элемента) потери пакетов на узлах коммутации могут привести к полному прекращению информационного обмена. **Выводы.** Проведенный анализ влияния вероятности потери пакетов на промежуточных узлах коммутации на временные характеристики процесса передачи данных свидетельствует о том, что увеличение этой вероятности приводит к росту относительного среднего времени доставки сообщений для широкого диапазона параметров.

**Ключевые слова:** передача данных; узел коммутации; вероятностно-временные характеристики; АСУ воздушным движением; пакет данных; тайм-аут; корреляция; выявление ошибок.

UDC 004.2 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.09**

M. Skulysh, S. Sulima

The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

# HYBRID RESOURCE MANAGEMENT SYSTEM FOR TELECOMMUNICATION NETWORK

The implementation of modern telecommunication technologies (SDN, NFV, SDR, CloudRAN) will lead to the full dependence of the telecommunication network performance on the information and computing environment efficiency. **The purpose of the article** is to develop the method for managing telecommunication network resources by choosing the optimal interval for redistributing system resources. The proposed model of load management system allows presenting the method of load forecasting, taking into account long-term accumulated data of statistics, and the latest tendencies, which are observed in the network. So it becomes possible to achieve a rational ratio of management costs and the final value of service quality. A new method of monitoring and measurement, using which it is possible to avoid overloading of network functions was developed. **Conclusion.** Experiments to research the proposed methods were conducted in the Mathcad system. The results showed that proposed methods could rationally distribute the system resources, especially under transient conditions of overload.

**Keywords:** network resource management; load forecasting; dynamic allocation of resources; virtualization of network resources.

## Introduction

Today the mobile operator telecommunication network is an organized system that includes the special equipment being serviced, observed and guided by operating data centers, which have installed computing servers and corresponding software that serves numerical information and service streams. Modern technologies SDN, NFV, SDR, CloudRAN and other are fast-growing. Their full-scale implementation will lead to the full dependence of the telecommunication network performance on the information and computing environment efficiency.

Integration of telecommunication systems (TCS) and distributed computing environment (CE) is observed today. As a result, a single heterogeneous service environment for telecommunications services, in which it is possible to control the process of information flow maintenance at each stage and to ensure compliance with high quality standards is created. At the same time, there is still no single concept, models and methods for organizing interactions that take into account the peculiarities of the CE functioning when servicing a large number of queries generated during the provision of telecommunication services. This leads to inefficient use of resources that provide a heterogeneous environment for telecommunication services.

Due to the lack of a methodological basis for organizing the work of a heterogeneous telecommunications system, system resources are chaotic, optimization problems are solved partly or locally, which leads to deterioration of control and QoS parameters for end users.

In this article the method of managing the resources of a telecommunication network by choosing the optimal interval for redistribution of system resources is proposed.

This method allows reducing the amount of redundant service information transmitted over the network and unloading the network nodes by dynamic adjustment of the system.

## Formulation of the problem

Formulate the problem of optimal resource distribution when servicing the virtual network functions of NFV. The purpose of the method of providing resources is to allocate their sufficient number for network functions, so that their SLA can be met even in the periods of peak load. The algorithm involves solving two main tasks: finding the required amount of resources and the right time to provide them.

To solve the question of necessary amount of resources for each network function, an analytical model is constructed. The presented model adopts the input data intensity of incoming requests and the requirements of serving a separate request, and calculates the amount of resources required by each network functional block to meet requirements.

The decision on when to provide resources depends on the dynamics of loads. Telecommunication loads undergo long-term changes, such as daylight hours or seasonal effects, as well as short-term fluctuations such as crowd outbreaks. While long-term fluctuations can be predicted in advance, observing changes in the past, short-term fluctuations are less predictable, and in some cases even unpredictable. The proposed method uses two different approaches for working in conditions of changes that are observed at different time scales. Proactive resource management is used to assess the load and appropriate management, as well as reactive resource management to correct errors in long-term forecasts or to respond to unexpected outbreaks of the crowd.

Consider a network with several network functions. It is assumed that each such network function indicates the desired quality of service (QoS) requirement; in this case, we assume that the QoS requirements are defined in terms of the target response time. The purpose of the system is to ensure that the average response time (or some response time percentile) observed by the network function requests does not exceed the desired target response time. In

general, several hardware and software resources on the server, such as CPU, NIC, disk, etc, service each incoming request. Assume that the given target response time is divided into several response time values for specific resources one for each such resource. Thus, if each request on each resource does not spend more time than the target value, then the overall target response time for the server will be satisfied. For ease of presentation, we assume that there is only one type of resource in the system.

Formally, $d_i$ denotes the target time of the network function response; $i$ and $T_i$ – the observed average response time, then the network function needs to allocate such amount of resources to satisfy the condition $T_i \leq d_i$.

We use this formulation of the problem to obtain a mechanism for the dynamic allocation of resources, which is described below.

## Literature review

Although the NFV promises substantial cost savings, flexibility and ease of deployment, potential problems in implementing virtualized network elements that can meet the demands of real-world performance are still open issues, and the NFV is still in its early stages of implementation.

Several research papers have focused on developing adaptive systems that can respond to changes in the load in the context of storage systems, common operating systems, network services, web servers, and Internet datacenters.

This article discusses the abstract model of the server resource and presents the methods for dynamically allocating resources. The proposed model and resource allocation methods are applicable to many scenarios where the system or resource can be abstracted using a GPS server.

One of the key issues in the virtualization area of the network is the allocation of physical resources to the virtual network functions. Virtual Network Embedding (VNE) is a well-studied task. Nevertheless, most modern solutions offer a static resource allocation scheme, in which, when a virtual network is displayed, the redistribution of resources does not occur throughout its life cycle. There is a limited number of decentralized and dynamic VNE solutions (like [1] or [2]). Moreover, even the approaches that offer solutions for dynamic virtual network embedding still allocate a fixed amount of resources for virtual nodes and channels for the entire period of existence. As network traffic is not static, this can lead to inefficient use of shared network resources, especially if the physical network rejects the requests for embedding new virtual network functions, while reserving resources for virtual network functions that are in low load conditions [3].

Most of the existing work on dynamic resource management is based on three approaches: management theory, modeling of work dynamics and load forecasting [3]. Among adaptive systems using a method based on the theory of control [4]). Among works based on the dynamics of work - [5]. The authors [6] use prediction of the load.

Summing up, the difference between the approach proposed in this article and the described above is that the resources reserved for use with virtual network functions do not remain unchanged throughout the life of the virtual network. The monitoring of virtual nodes is carried out, and, resources are redistributed, based on real resource needs. In this case, unused resources are returned to the physical network for use by other virtual networks.

The next problem that arises is how information is obtained about the current situation on the network. In this aspect, resource management in NFV networks is similar to managing application programs in data centers and clouds. Existing solutions of server resource management can be classified as predictive and reactive solutions. The prognostic allocation of resources involves the presence of a predictable and stable template in requirements and distributes volumes, usually on a time scale of several hours or days based on a template. However, large, unpredictable bursts of requirements can cause serious SLA violations. On the other hand, the reactive allocation of resources allocates resources at short intervals (for example, every few minutes) in response to load changes. Reactive policies can quickly respond to changes in load, but problems such as unpredictability, instability and high management costs limit their application in practice [7].

Therefore, predicting peak application load and allocating resources based on the worst case scenario is extremely difficult [8]. Given the difficulty in predicting peak loads, an application program should use a combination of predictive and reactive control. While prognostic methods work well for online prediction in large time intervals from a few minutes to several hours, reactive methods can predict load for short time intervals up to several minutes and respond quickly to non-stationary overloads [9].

Several approaches combine prognostic and reactive control [7, 8]. Although these approaches have the common features with the hybrid approach proposed in this article, they differ in several aspects. The offered approach is directed on productivity optimization, energy consumption and cost allocation of resources simultaneously. Based on the hybrid system of resource management, a dynamic monitoring method is developed to effectively manage network resources and reduce the amount of service information - resource management intervals have variable lengths, while in other management approaches, simple fixed intervals are used. [7] similarly uses a variable length of intervals, but in contrast to this approach, the approach proposed in the article defines the length of the intervals dynamically, depending on the actual situation on the network.

The main objective is to develop a system that can respond to transient load changes, while a theoretical mass-service approach tries to plan queries based on stationary load. The resource management method based on the model that performs resource allocation based on resource modeling to correlate QoS metrics and resource particles allocated to the application was proposed in [9]. This work is similar to the proposed

approach, but in it the model of mass service in the time domain is adapted to the task of virtualization of network functions, and also supplemented by the mechanism of measurement and prediction.

## Description of the method

To perform a dynamic allocation of resources each server will need to use three components:

1) a monitoring module that measures the load and performance of each network function (such as the intensity of receipt of requests, the average response time, etc.);

2) a forecasting module that uses measurements from the monitoring module to assess the load characteristics in the near future;

3) a resource allocation module that uses these estimates of load to determine the amount of resources that should be allocated by network functions.

Fig. 1 shows these three components [9].

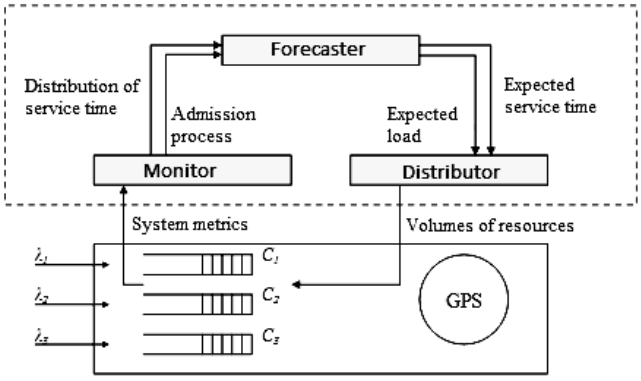



**Fig. 1.** Dynamic resource allocation system

Using traditional methods of monitoring the state of network resources, excessive service information increases significantly, which can negatively affect the overall performance of the network due to the capacity of the channels. Therefore, it is proposed to apply a mechanism, the essence of which is to dynamically change the intensity of the control of the network element state, depending on the difference between the predicted value of load and the actual. This equation describes the principle of changing the frequency of monitoring:

$$W(t) = I_{base} - \\ -K \cdot \sum_{j=t-h}^{t-1} \frac{\max(0; \lambda_{obs}(j) - \lambda_{pred}(j))}{h} I_{base}, \quad (1)$$

where $W$ – the control interval,

$I_{base}$ – the base value of the interval,

$K$ – the normalization constant,

$\lambda_{obs}(t)$ – the real intensity of the load flow during the interval $t$,

$\lambda_{pred}(t)$ - the provided intensity of the load receipt at the interval $t$.

Fig. 2 shows the adaptation of the frequency of the network element status control to the rejection of the real load from the predicted on the network element.

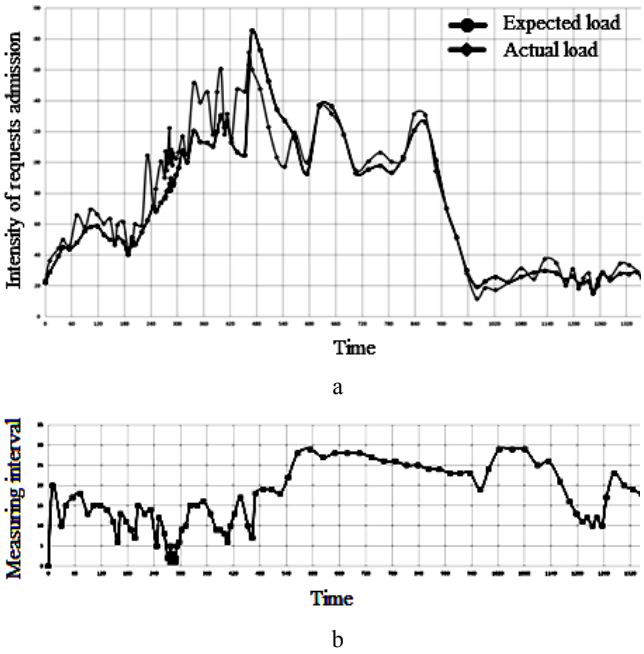



**Fig. 2.** Dynamic change of the adaptation frequency (a) Load of the network element; (b) Change the intensity of adaptation in accordance with the deviation of the actual load from the expected

The resource allocation module is called periodically (each window of adaptation or when threshold is reached) to dynamically divide the resource volume between different network functions that work on common servers on the network.

As already mentioned, the algorithm of adaptation is started every $W$ time units. Let $q^0_i$ is the length of the queue at the beginning of the adaptation window; $\lambda_i$ is an estimate of the rate of receipt of applications, and $\mu_i$ denotes an assessment of the intensity of service in the next window of adaptation (that is, the next $W$ timelines).

Then assuming that the values $\lambda_i$ and $\mu_i$ are constant, the queue length at any time t within the next adaptation window is given by equation:

$$q_i(t) = \max(0; q^0{}_i + (\lambda_i - \mu_i)t). \quad (2)$$

As the resource is modeled as a GPS server, the intensity of the network function request service is

$$\mu_i = C_i / s_{i,},$$

where $C_i$ is the number of resources of the network function and $s_i$ is the average service time of the request by one resource unit.

The average length of a queue in the window of adaptation is determined by equation:

$$q_i = \frac{1}{W} \int_0^W q_i(t) dt. \quad (3)$$

The average response time $T_i$ at the same time interval is estimated by equation:

$$T_i = \frac{q_i + 1}{\mu_i}. \quad (4)$$

Parameters of such a model depend on its current characteristics, so this model is applicable in the online scenario for responding to dynamic changes in the load.

The network functions need to allocate the number of resources, so that

$$T_i \le d_i,$$

then the amount of resources allocated by the network function $C_i$ must satisfy the condition of equation:

$$C_i \ge s_i \frac{q_i + 1}{d_i}. \quad (5)$$

A modified load factor predictor based on the method proposed in [8] uses past load monitoring to predict peak demand that will occur over time *W*.

Assume that $\lambda_{pred}(t)$ – the predicted intensity of receipt during a certain interval *t,* that is obtained from the analysis of historical data for the past days. Let $\lambda_{pred}(t)$ is the real intensity of the flow during this interval.

The predicted value for the next interval is corrected using the observed error in accordance with equation :

$$\lambda(t) = \lambda_{pred}(j) + \sum_{j=t-h}^{t-1} \frac{\lambda_{obs}(j) - \lambda_{pred}(j)}{h} \quad (6)$$

## Conducting an experiment

Consider the problem in the Mathcad system. Let us consider the work of one block in one day (1440 minutes).

We assume that basic component of the predicted intensity of applications admission during each minute is $\lambda_{pred}$, and the average value of the service life of the application be respected by one unit resource $s_i$ and it does not change, we also assume the availability of a resource of the same type .

Let the adaptation window dynamically determine based on its base value and the last four values from the monitoring history, where the base value of the adaptation window is 5 minutes.

We do not introduce restrictions on the queue size, but for calculations, we assume that at the end of the adaptation interval, the theoretical value of the queue size in the current conditions is 40 queries.

Fig. 3 shows a change in the value of the control interval and the change in the predicted value of the load intensity compared to the actual load received.

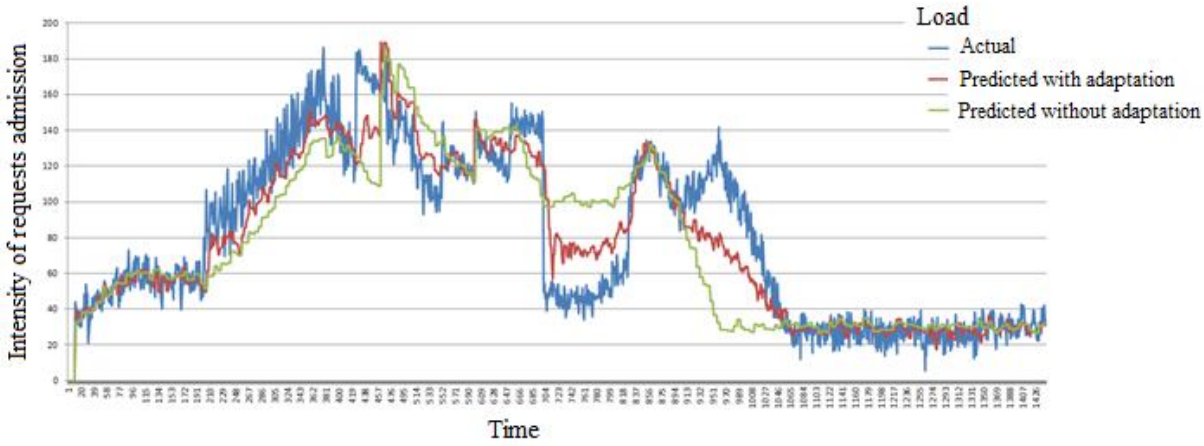



**Fig. 3.** Results of system modeling with dynamic adaptation of control interval and load forecasting and systems without them

The simulation results showed that the error in the predicted value compared to the real one could be 16%, while the "positive" error is 9% of the actual rate of receipt of applications.

If you do not apply the dynamic adjustment system for the size of the adaptation window and the system for incorporating historical data into forecasting, then the error will be 26%, and the "positive" error will be 15%, which can further be drawn from the conclusion that resources will be extremely ineffective.

## Conclusions

The article proposes a method of dynamic allocation of resources of the telecommunication network for increasing the efficiency of its work. A system that combines online measurements with forecasting and resource allocation methods was presented. In particular, a new method of monitoring and measurement, using which it is possible to reduce the amount of service information circulating in the network and to avoid negative phenomena of overload of network functions has been developed. The estimation of methods using modeling in the system Mathcad was carried out.

The results showed that these methods could rationally distribute the system resources, especially under transient conditions of overload.

The system can be used to control the deployment of virtualized network functions on the underlying physical infrastructure to minimize operator costs and improve customer service quality.

REFERENCES


1. Cai, Z., Liu, F., Xiao, N., Liu, Q. and Wang Z. (2010), "Virtual network embedding for evolving networks", *Global Telecommunications (GLOBECOM 2010): IEEE conference*, Miami, Florida, pp. 1–5.
2. Sun, G., Yu, H., Anand, V. and Li, L. (2013), "A cost efficient framework and algorithm for embedding dynamic virtual network requests", *Future Generation Computer Systems*, Vol. 29, No. 5, pp. 1265–1277.
3. Mijumbi, R., Gorricho, J.-L., Serrat, J., Claeysy, M., Turcky, F. D. and Latr S. (2014), "Design and Evaluation of Learning Algorithms for Dynamic Resource Management in Virtual Networks", *Network Operations and Management Symposium (NOMS)*, *IEEE,* Krakow, pp. 1–9.
4. Patikirikorala, T., Colman, A., Han, J. and Wang L. (2011), "Multi-model framework to implement self-managing control systems for QoS management", *Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems: symposium*, Waikiki, Honolulu, pp. 218–227.
5. Lai, W., Chiang, M., Lee, S. and Lee, T. (2013), "Game Theoretic Distributed Dynamic Resource Allocation with Interference Avoidance in Cognitive Femtocell Networks" *Wireless Communications and Networking: IEEE conference*, Shanghai, pp. 3364–3369.
6. Jokhio, F., Ashraf, A., Lafond, S., Porres, I. and Lilius, J. (2013), "Prediction-Based Dynamic Resource Allocation for Video Transcoding in Cloud Computing", *Parallel, Distributed, and Network-Based Processing: 21st Euromicro International Conference*, Belfast, pp. 254–261.
7. Gandhi, A., Chen, Y., Gmach, D., Arlitt, M. and Marwah, M. (2011), "Minimizing Data Center SLA Violations and Power Consumption via Hybrid Resource Provisioning" *Green Computing: International Conference and Workshops*, Orlando, FL, pp. 1–8.
8. Urgaonkar, B., Shenoy, P., Chandra, A., Goyal, P. and Wood, T. (2008), "Agile dynamic provisioning of multi-tier Internet applications" *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–39.
9. Chandra, A., Gong, W. and Shenoy, P. (2003), "Dynamic resource allocation for shared data centers using online measurements", *Quality of service : 11th International Workshop*, Berkeley, pp. 381–398.
10. Koval, A., Globa, L. and Novogrudska. R. (2016), "The approach to web services composition" *Hard and Soft Computing for Artificial Intelligence, Multimedia and Security*, Vol. 534 of the series Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer international publication, pp. 293-304.


Надійшла (received) 27.02.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 18.04.2018

**Гібридна система управління ресурсами телекомунікаційної мережі**

М. А. Скулиш, С. В. Сулима

Впровадження сучасних телекомунікаційних технологій (SDN, NFV, SDR, CloudRAN) призводить до повної залежності продуктивності телекомунікаційної мережі від ефективності інформаційного та обчислювальної середовища. **Метою статті** є розробка способу керування ресурсами телекомунікаційної мережі шляхом вибору оптимального інтервалу для перерозподілу системних ресурсів. Запропонована модель системи управління навантаженням дозволяє представити метод прогнозування навантаження з урахуванням довгострокових даних статистики і останніх тенденцій, які спостерігаються в мережі. Це дозволяє досягти оптимального співвідношення витрат на управління і якості обслуговування. Був розроблений новий метод моніторингу та вимірювання, за допомогою якого можна уникнути перевантаження мережевих функцій. **Висновок.** Експериментальні дослідження запропонованих методів були проведені в системі Mathcad. Результати показали, що запропоновані методи дозволяють раціонально розподіляти системні ресурси, особливо при перехідних умовах перевантаження.

**Ключові слова:** керування ресурсами мережі; прогнозування навантаження; динамічний розподіл ресурсів; віртуалізація мережевих ресурсів.

**Гибридная система управления ресурсами телекоммуникационной сети**

М. А. Скулиш, С. В. Сулима

Внедрение современных телекоммуникационных технологий (SDN, NFV, SDR, CloudRAN) приводит к полной зависимости производительности телекоммуникационной сети от эффективности информационной и вычислительной среды. **Целью статьи** является разработка способа управления ресурсами телекоммуникационной сети путем выбора оптимального интервала для перераспределения системных ресурсов. Предложенная модель системы управления нагрузкой позволяет представить метод прогнозирования нагрузки с учетом долгосрочных данных статистики и последних тенденций, которые наблюдаются в сети. Это позволяет достичь рационального соотношения затрат на управление и качества обслуживания. Был разработан новый метод мониторинга и измерения, с помощью которого можно избежать перегрузки сетевых функций. **Вывод.** Экспериментальные исследования предложенных методов были проведены в системе Mathcad. Результаты показали, что предложенные методы позволяют рационально распределять системные ресурсы, особенно при переходных условиях перегрузки.

**Ключевые слова:** управление ресурсами сети; прогнозирование нагрузки; динамическое распределение ресурсов; виртуализация сетевых ресурсов.

# Intelligent information systems

UDC 004.932, 528.854 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.10**

N. Liubchenko [1], O. Nakonechnyi [2], A. Podorozhniak [1], H. Siulieva [2]

[1] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

## AUTOMATION OF VEHICLE PLATE NUMBERS IDENTIFICATION ON ONE-ASPECT IMAGES

The **subject matter** of the article is the method of automating the identification of vehicle plate numbers based on the processing of one-aspect images obtained using video recording means. The **goal** is to provide automation of the process of identifying vehicle plate numbers within a wide range of changing the viewing angles and the levels of illumination. The **task** is formulation of the method of automated identification of vehicle plate numbers on one-aspect images, which are obtained by means of video fixation within wide limits of changing both the viewing angles and the levels of illumination. **Analysis** of the problems of methods and algorithms of automated detection and recognition of vehicle plate numbers has shown that it is most promising to use flexible algorithms that adapt to the changing conditions of observation of traffic control devices. One of the promising technologies for implementing such algorithms is the application of artificial neural networks. The solution of the problem of recognition of vehicle plate numbers can be represented as a complex of image processing and analysis of algorithms, which includes the initial preparation of the image, the discovery of the area of the vehicle plate on the image, the segmentation of symbols and the recognition of symbols. **Conclusions:** an algorithmically implemented method of identifying vehicle plate numbers, which makes possible searching the text areas under an arbitrary angle in different lighting conditions, is proposed. This method allows automating the process of identification of vehicle plate numbers within a wide range of distances to the car, as well as viewing the angles and levels of illumination. The **purpose** of further research is to improve the proposed method for its implementation, using modern software and hardware.

**Keywords:** vehicle plate number identification; image processing; character recognition; neural network; convolutional neural network.

## Introduction

On the present stage of society development, the problem of providing road safety has become a major one [1]. In particular, the road safety is paid much to in our country. The problem of improving the level of road safety is to be solved, including through the introduction of automated means of traffic control, as well as the improvement of carrying out the analysis of causes of road traffic accidents [2]. Automation of vehicle plate numbers identification with the integration of video-fixing systems of traffic rules violations will provide reliable control over the transport routes.

## Problem analysis and task setting

Currently, there are quite a few systems for automatic vehicle plate numbers recognition. A comparative analysis of the literature dealing with the methods for recognizing symbols on the images [3, 4] showed that a large number of methods can be used to identify vehicle plate numbers. The definitions of the most effective of them [5, 6] occur depending on the conditions of general illumination, the shooting angle and the presence of partial shading of license plate images.

The solution of the problem of recognizing vehicle plate numbers can be represented as a complex of algorithms of processing and analysis of images, which includes the initial preparation of the image, the discovery area of the vehicle plate number on the image, the segmentation of characters and the recognition of symbols.

The **purpose** of this article is to develop methods and algorithms for automated identification of vehicle plate numbers based on the processing of one-aspect images.

The necessity of developing such methods and algorithms is related to the possibility of geometric distortions of the vehicle plate number image, which is due to various conditions for its obtaining.

One can use the images of identified vehicle plate numbers in accordance with the known types as the input data entering the vehicle plate number automated identification algorithms being developed, [7]. Such images may have certain deviations from the reference vehicle plate number image having a zero rotation angle in the image plane and uniform illumination: the angle of the vehicle plate number in the image plane and the reference ratio of the horizontal image size of the vehicle plate number to the vertical one, due to changes in the angle of the survey; different general background on various images, as well as partial shading of license plate images resulting from different lighting conditions during shooting.

## The main part

The main problem while identifying vehicle plate numbers is its arbitrary orientation relative to the horizon, which makes it difficult to use the existing algorithms for segmentation of text information on digital images [3, 5].

Given this circumstance, an algorithmically implemented method for identifying vehicle plate numbers, which allows searching for text areas at an arbitrary angle and consisting of the following 8 steps, is proposed.

Stage 1. Correction of the histogram of the original image. The original image contains low informative zones, so that one needs to perform the "trim" of the histogram to the left and to the right of the measured levels of brightness, depending on the maximum filling of the histogram. The specified levels of the image brightness reduction are due to the type of photodetector used and the general level of illumination [3].

Stage 2. Localization of the plate number area on the obtained image of the car is carried out with the help of the algorithm presented in the specified literature (Fig. 1) [6, 8].


**Fig. 1.** Localization of the plate number area

Stage 3. Binarization of image. It consists in viewing the entire image by rows and columns. For each pixel of the input image, when the binary condition is fulfilled, the unit is written into the output image and zero if this condition is not met.

Stage 4. Morphological operations of compression and expansion. It is proposed to use morphological operations to isolate the connected regions of pixels, corresponding texts to the alphanumeric areas of plate numbers in the image of the car. Morphological compression is used to eliminate small objects and lines of 1 pixel width. Then, the separation of connected regions is performed by means of a morphological expansion [3, 9].

Step 5. Search for connected areas in the image corresponding to the vehicle plate number. To find common areas, it is suggested to use a wave algorithm in the given work . The essence of using the wave algorithm is as follows: for each single pixel of the image the wave propagates in 4 directions per unit pixels. At each step of the wave algorithm, the pixels belonging to the same group are introduced into a corresponding list, and in the input image, the pixels are assigned a zero value to exclude the looping of the algorithm. Then, the revealed areas are ranked according to the dimensions, and the areas with the largest dimensions are transmitted for further processing [3].

Stage 6. Design of a bounding quadrangular area. To do this, the image is scanned by columns and they search for pixels corresponding to the middle of the columns forming the bound area. Further, pixels corresponding to the middle line of the bound area are searched for. After performing this, the parameters of a straight line approximating the center line points are searched for. On the basis of obtained parameters of the straight line slope, the maximum width of the bound region and the coordinate of the abscissa axis of the left and right extremities of the bound region, they construct the lines forming the bounding quadrangular region (Fig. 2) [5, 6].


**Fig. 2.** Separated quadrilateral area of the vehicle plate number

Stage 7. Transformation of the deformed by projection distortions quadrangular region into a rectangular one. The text of the vehicle plate number is located at a certain angle relative to the base of the image, in this connection it is proposed to use affine transformations of the quadrangular region into a rectangular one. The latter can be accomplished by using the conversion formulas of a point from one two-dimensional plane *xy* into another one *x'y* ':

$$x' = \frac{a \cdot x + b \cdot y + c}{g \cdot x + h \cdot y + 1}, \quad y' = \frac{d \cdot x + e \cdot y + f}{g \cdot x + h \cdot y + 1}, \tag{1}$$

where *a, b, c, d, e, f, g, h* are transformation coefficients.

Knowing the coordinates of the 4 points of the transformable region, as well as the coordinates of the 4 points of the rectangular region, presented in Fig. 3, one can substitute them in the transformation formula (1), and obtain two equations from each pair of points, thus, from 4 pairs of points 8 equations with 8 unknowns are obtained. Solving this system, they obtain the required coefficients a, b, c, d, e, f, g, h. Substituting them in (1), one obtains the formulas for the transformation of a quadrangular domain into a rectangular one.

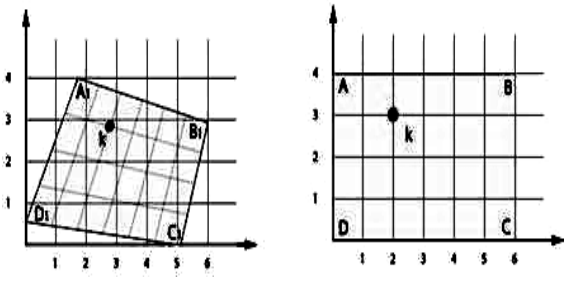



**Fig. 3.** Quadrangular and rectangular areas of vehicle plate numbers

In Fig. 4 there is represented the conversion result of the specified quadrangular area of the vehicle plate number (Fig. 2) with certain vertices of the quadrilateral region, limiting the area corresponding to the vehicle plate number, into a rectangular area suitable for further segmentation and recognition of single symbols.

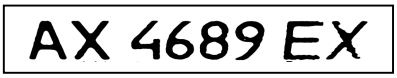



**Fig. 4.** Converted rectangular area of the vehicle plate number

Step 8. To recognize individual vehicle plate number characters, it is suggested to use a convolutional neural network trained by the method of error reversing. The choice of technology for artificial neural networks, in general, and neural networks of the above structure, in particular, is due to the specific nature of the task of identifying the vehicle plate number symbols [6, 10].

The structure of convolution neural network for plate number symbols detecting on the image consists of several convolution layers, before which are downsampling layers, and output layer before which will be applied several layers to combat re-training problem by means of dropdowm method [11].

Also, before each collapsing layer will be added preparatory layers, those add zero elements along the contour of input matrix for processing on the next layer.

The image sizing 32x32 pixels with image area of each sign of the vehicle plate number are at the matrix input.

Output result of neural network is probability vector of each of the possible characters of the number. The algorithm of neural network creation and training was represented [12, 13].

Obtained neural network scheme represented at the Fig. 5.

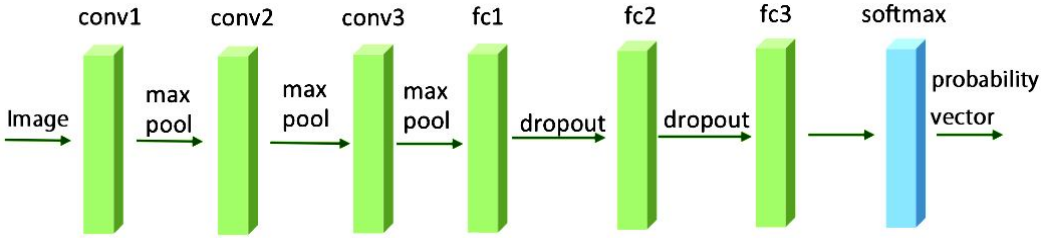



**Fig. 5.** Generalized structure of obtained convolution neural network (every convolution layer consists of three sub-layers)

For creation programming product which will demonstrate developed method the Python programming language was chosen.

The recognition result is shown in Fig. 6.

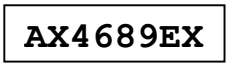



**Fig. 6.** Recognized vehicle plate number

Thus, after the recognition operation is performed, on the basis of the proposed method the vehicle plate number is presented either to the operator, or enters the corresponding database for registration.

To implement a software product that demonstrates the developed method, Python programming language was selected.

## Conclusions

Thus, an algorithmically implemented method for identifying a vehicle plate number, which allows searching for text areas at an arbitrary angle in different illumination conditions, is proposed. This method makes it possible to automate the process of identifying vehicle plate numbers in a wide range of changes in viewing angles and levels of illumination. The purpose of further research is to improve the proposed method for its implementation in modern software and hardware means.

REFERENCES

1. *Global Plan for the Decade of Action for Road Safety 2011-2020.* World Health Organization, Geneva, 2011. 25 p., available at: http://www.who.int/roadsafety/decade_of_action/plan/plan_english.pdf (last accessed January 14, 2018).
2. *Stratehiia pidvyshchennia rivnia bezpeky dorozhnoho rukhu v Ukraini na period do 2020 roku*, [Strategy for increasing the level of road safety in Ukraine up to 2020]. Cabinet of Ministers of Ukraine, Kyiv: 2017, 9 p., available at: http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/481-2017-%D1%80?lang=en (last accessed January 14, 2018).
3. Gonzalez, R. and Woods, R. (2008), *Digital Image Processing*, Pearson Prentice Hall, 954 p.
4. Podorozhnyak, A.A. (2014), "Metod viyavlenyia obektov interesa pry obrabotke dannikh v systeme dystantsyonnoho zondyrovanyia zemly" [Method of interest objects detection while processing data in the system of earth remote sensing], *Informacijno-kerujuchi systemy na zaliznychnomu transporti* [Information management systems in the railway transport], UkrDAZT, Kharkiv, No. 4, pp. 60-64.
5. Murygin, K.V. (2010), "Normalizatsiya izobrazheniya avtomobil'nogo nomera i segmentatsiya simvolov dlya posleduyushchego raspoznavaniya" [Normalization of the Image of a Car Plate and Segmentation of Symbols for the Subsequent Recognition], *Iskusstvennyi intellekt* [Artificial intelligence], No. 3, pp. 364-369.
6. Lubchenko, N., Nakonechniy, O. and Podorozhnyak, A. (2014), "Metod avtomatyzyrovannoi identyfykatsyy avtomobylnykh nomerov na osnove obrabotky odnorakursnykh izobrazhenyi" [Method for automated car numbers identification on the basis of one view image processing], *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho avtomobilno-dorozhnoho universytetu* [Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University], KhNAHU, Kharkiv, No. 61-62, pp. 292-295.
7. DSTU 4278:2012. *Znaky nomerni transportnykh zasobiv. Zahalni vymohy. Pravyla zastosuvannia* [Vehicle license plates. General requirements. Terms of Use], Derzhstandart Ukrainy, Kyiv, 2012, 22 p.

8. Podorozhniak, A.O., Liubchenko, N.Yu. and Lagoda, O.D. (2015), "Metod intelektualnoi obrobky multyspektralnykh zobrazhen" [The method of intellectual multispectral image processing], *Sistemi obrobki informatsii* [Information processing systems], KhUPS, Kharkiv, No. 10 (135), pp. 123-125.
9. Podorozhnyak, A.O., Gryb, R.M. and Domnyn, S.V. (2013), "Morfolohichna obrobka tsyfrovykh zobrazhen z teleskopiv", [Morphological processing of digital telescope images], *Suchasna spetsialna tekhnika* [Modern special technique], DNDI MVS Ukrainy, Kyiv, No. 2 (37), pp. 34-39.
10. LeCun, Y., Kavukcuoglu, K. and Farabet, C. (2010), "Convolutional Networks and Applications in Vision", *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuitsc and Systems* (ISCAS'10), IEEE, Paris, pp. 253–256.
11. LeCun, Y. and Bengio, Y. (1995), "Convolutional networks for images, speech and time series", *The handbook of brain theory and neural network*, Vol. 3361, No. 10, pp. 276-279.
12. Podorozhniak, A., Liubchenko, N. and Bondarchuk, V. (2017), "Neiromerezhevyi metod intelektualnoi obrobky multyspektralnykh zobrazhen" [Neural network method of intellectual processing of multispectral images], *Suchasni informatsiini systemy* [*Advanced information systems*], NTU "KhPI", Kharkiv, Vol. 1, No 2, pp. 39-44, http:/**doi: 10.20998/2522-9052.2017.2.07**.
13. Podorozhniak, A., Liubchenko, N. Balenko, O. and Zhuikov, D. (2018), "Neural network approach for multispectral image processing", *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering* (TCSET 2018) February 20 – 24, 2018, Lviv-Slavske, Ukraine: proc., Lviv, pp. 978-981, http:/**doi: 10.1109/TCSET.2018.8336357**.

Надійшла (received) 14.01.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 07.03.2018

**Автоматизація ідентифікації автомобільних номерів на одноракурсних зображеннях**

Н. Ю. Любченко, О. А. Наконечний, А. О. Подорожняк, Г. М. Сюлєва

**Предметом** вивчення в статті є спосіб автоматизації ідентифікації автомобільних номерів на основі обробки одноракурсних зображень, отриманих за допомогою відеорегіструючих засобів. **Мета** – забезпечення автоматизації процесу ідентифікації автомобільних номерів в широких межах зміни кутів спостереження і рівнів освітленості. **Завдання** – формулювання методу автоматизованої ідентифікації автомобільних номерів на одноракурсних зображеннях, отриманих за допомогою засобів відеофіксації в широких межах зміни кутів спостереження і рівнів освітленості. Аналіз проблем методів та алгоритмів автоматизованого виявлення і розпізнавання номерів автомобілів показав, що найбільш перспективно використовувати гнучкі алгоритми, які підлаштовуються до зміни умов спостереження засобів контролю дорожнього руху. Однією з перспективних технологій реалізації таких алгоритмів є застосування штучних нейронних мереж. Рішення завдання розпізнавання автомобільних номерів можна представити у вигляді комплексу алгоритмів обробки і аналізу зображень, що включає в себе первинну підготовку зображення, виявлення області номера на зображенні, сегментацію символів і розпізнавання символів. **Висновки:** запропонований алгоритмічно реалізований метод ідентифікації номера автомобіля, що дозволяє здійснювати пошук текстових областей під довільним кутом в різних умовах освітленості. Даний метод дозволяє автоматизувати процес ідентифікації автомобільних номерів в широких межах зміни відстані до автомобіля, кутів спостереження і рівнів освітленості. Метою подальших досліджень є вдосконалення запропонованого методу для його реалізації на сучасних програмно-технічних засобах.

**Ключові слова:** ідентифікація автомобільного номера; обробка зображень; розпізнавання символів; нейромережа; згорткова нейронна мережа.

**Автоматизация идентификации автомобильных номеров на одноракурсных изображениях**

Н. Ю. Любченко, А. А. Наконечный, А. А. Подорожняк, А. Н. Сюлева

**Предметом** изучения в статье является способ автоматизации идентификации автомобильных номеров на основе обработки одноракурсных изображений, полученных с помощью видеорегистрирующих средств. **Цель** – обеспечение автоматизации процесса идентификации автомобильных номеров в широких пределах изменения углов наблюдения и уровней освещенности. **Задача** – формулирование метода автоматизированной идентификации автомобильных номеров на одноракурсных изображениях, получаемых с помощью средств видеофиксации в широких пределах изменения углов наблюдения и уровней освещенности. Анализ проблем методов та алгоритмов автоматизированного обнаружения и распознавания номеров автомобилей показал, что наиболее перспективно использовать гибкие алгоритмы, которые подстраиваются к смене условий наблюдения средств контроля дорожного движения. Одной из перспективных технологий реализации таких алгоритмов является применение искусственных нейронных сетей. Решение задачи распознавания автомобильных номеров можно представить в виде комплекса алгоритмов обработки и анализа изображений, включающего в себя первоначальную подготовку изображения, обнаружение области номера на изображении, сегментацию символов и распознавание символов. **Выводы**: предложен алгоритмически реализуемый метод идентификации номера автомобиля, позволяющий производить поиск текстовых областей под произвольным углом в различных условиях освещенности. Данный метод позволяет автоматизировать процесс идентификации автомобильных номеров в широких пределах изменения расстояния до автомобиля, углов наблюдения и уровней освещенности. Целью дальнейших исследований является совершенствование предложенного метода для его реализации на современных программно-технических средствах.

**Ключевые слова:** идентификация автомобильного номера; обработка изображений; распознавание символов; нейросеть; сверточная нейронная сеть.

# Methods of information systems protection

УДК 004.932, 528.854 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.11**

О. В. Барабаш [1], Н. В. Лукова-Чуйко [2], А. П. Мусієнко [2], В. В. Собчук [3]

[1] *Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна*
[2] *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна*
[4] *Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна*

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ІНФОРМАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ РОЗРОБКИ МЕТОДУ ПРОТИДІЇ DDoS-АТАКАМ

**Предметом** вивчення в статті є процес забезпечення властивості функціональної стійкості інформаційних мереж. **Метою** є розробка методу протидії DDoS-атакам, що дозволяє ефективно захищати інформаційну мережу, як від атак на всьому часовому інтервалі, так і від повільних атак. **Завдання:** розробити алгоритми виявлення та блокування DDoS-атак, що описують послідовність дій при застосуванні методу протидії; провести оцінку ефективності запропонованого методу протидії DDoS-атакам. Використовуваними **методами** є: графовий підхід, математичні моделі оптимізації, методи розв'язання нелінійних задач. Отримані такі **результати.** Побудовані алгоритми виявлення та блокування DDoS-атак, що описують послідовність дій при застосуванні методу протидії. Алгоритм виявлення атак реалізується на аналізаторі вхідного трафіку, який перевіряється на предмет наявності DDoS-атак. У разі виявлення такої атаки визначається її тип. Після цього реалізується алгоритм блокування, який зчитує з бази даних джерела шкідливого трафіку та перенаправляє його на програмний шлюз, який забирає на себе подальший деструктивний вплив. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: ми запропонували метод протидії DDoS-атакам, що дозволяє ефективно захищати інформаційну мережу як від атак на всьому часовому інтервалі, так і від повільних атак. Даний метод дозволяє забезпечити функціональну стійкість інформаційної мережі та базується на використанні алгоритмів виявлення та блокування DDoS-атак, а також збору інформації про вхідний трафік із записом до бази даних «Джерела шкідливого трафіку». При виявленні атаки визначається її тип та запускається механізм її блокування, що реалізується в два етапи. На першому етапі виконується пошук джерел шкідливого трафіку, використовуючи зібрану в базі даних інформацію про вхідні пакети. На другому етапі виконується безпосереднє блокування виявлених джерел шляхом відправлення пакетів-відповідей по резервному каналу зв'язку через програмний шлюз, на якому вихідна адреса серверу у пакетах підміняється адресою шлюзу, що дає змогу замаскувати сервер від зовнішнього деструктивного впливу (у разі атаки ззовні). При атаці з внутрішньої мережі відключаються порти комутатора, до яких підключені джерела шкідливого трафіку. Після цього оповіщається системний адміністратор, який негайно приступає до пошуку та знешкодження шкідливого програмного забезпечення.

**Ключові слова:** інформаційна мережа; функціональна стійкість; DDoS-атака; системи виявлення вторгнення; база даних; аналізатор трафіку; маршрутизатори; комутатори.

## Вступ

Сучасні інформаційні технології розвиваються швидкими темпами. Надання інформаційних послуг відбувається повсякчас – це є невід'ємною частиною життя суспільства. З одного боку, отримання документів та їх відпрацювання у електронному вигляді, проведення платежів та отримання інформаційних послуг – це дуже зручно та швидко, але це вимагає проведення ряду заходів з врегулювання механізмів надання та обробки інформації у електронному вигляді [1].

Для обробки та передачі документів у електронному вигляді використовуються відкриті канали зв'язку, що у свою чергу робить можливим блокування, втрату або заволодіння інформацією для подальшого її використання у злочинних цілях.

Стрімке зростання якості та низька собівартість інформаційного обладнання дає можливість розгортання інформаційних ресурсів будь-якої складності, але саме ці причини призводять до стрімкого зростання кібернетичних загроз. За даними світових аналітичних агенцій, зростання кількості кіберзагроз відбувається у експоненційній залежності [2]. Ключову роль, на сьогодні, відіграють розподілені інформаційні системи.

Функціональна стійкість (ФС) інформаційної системи (ІС), в першу чергу, обумовлена її здатністю надавати регламентовані послуги на протязі визначеного часу [3]. Для своєчасного виявлення фактів неавторизованого доступу та (або) несанкціонованого управління інформаційною системою через мережу інтернет застосовують системи виявлення вторгнень (СВВ). У частині поняття функціональної стійкості інформаційної системи, СВВ повинна мати спроможність отримувати та обробляти сигнатурну інформацію на початковому етапі мережевої атаки. Це надасть змогу своєчасно класифікувати загрозу та виробити необхідні адміністративні впливи на систему інформаційної безпеки ІС. При цьому, збір сигнатурної інформації повинен бути прихованим [4].

**Аналіз основних публікацій.** Показники функціональної стійкості характеризують результат її забезпечення шляхом перерозподілу існуючої надмірності або ресурсів у позаштатних ситуаціях [5-7].

Дослідження показали, що функціональна стійкість інформаційної системи поєднує властивості надійності (безвідмовності), відмовостійкості і жи-

вучості. Функціональна стійкість розглядається, як властивість системи успішно завершити завдання при регламентованому числі змін в стані самої системи, тобто зберегти її працездатність після прояву припустимого числа відмов і зовнішніх збурювань [8]. Реалізація функціональної стійкості досягається за рахунок використання у складній технічній системі, до якої можна віднести інформаційні системи, різних уже існуючих видів надмірності (інформаційної, функціональної, структурної, часової, навантажувальної та ін.) шляхом перерозподілу ресурсів з метою парирування наслідків позаштатних ситуацій. Принциповим є те, що на етапі проектування не повинна вводитися додаткова надмірність, а парирування наслідків позаштатних ситуацій здійснюється перерозподілом уже існуючих ресурсів. Проблема полягає у виявленні вже наявної надмірності та формуванні сигналів у потрібний момент на її перерозподіл [9]. У цьому є основна відмінність задачі забезпечення функціональної стійкості від задачі побудови структурно надмірних систем.

Вирішенню проблеми забезпечення функціональної стійкості складних технічних систем присвячено низку наукових праць О.А. Машкова, О.В. Барабаша, Ю.В. Кравченка, С.М. Неділька, Д.М. Обідіна та інших вчених. Однак широке їх використання в практичних задачах оцінки функціональної стійкості різних варіантів побудови інформаційних систем ускладнене за багатьох причин.

**Метою роботи** є розробка методу протидії DDoS-атакам, що дозволяє ефективно захищати інформаційну мережу як від атак на всьому часовому інтервалі, так і від повільних атак.

## Основна частина

На сьогодні, існує досить велика кількість методів протидії та кібернетичним атакам. 70% таких методів гуртуються на сигнатурному пошуку загроз [10]. Це дуже зручно – не треба прописувати спеціальних алгоритмів або модулів при виявленні нових загроз, достатньо мати єдину спільну базу сигнатур пошуку, програми, що базуються на таких методах захисту є простими у реалізації, мають високу швидкодію. Але з-поміж всі переваг, мають один суттєвий недолік – вони не в змозі розпізнати загрози, сигнатури яких не містяться у базі пошуку. Щоб виправити даний недолік, створюються методи, що аналізують фактори поведінки користувачів. Існує велика кількість варіацій даних методів, але з-поміж недоліків слід виділити неможливість апріорного реагування на ситуацію.

Як правило, дані методи реагують на атаку та протидіють їй на етапі завершення. Саме цей факт викликає необхідність розробки та впровадження методу, що буде:

– не залежати від факту розкриття механізмів проведення атаки, тобто сигнатур атак;

– дозволить блокувати атаку не на кінцевому етапі її проведення, а ще до того часу, як шкідливий трафік потрапить на кінцевий мережевий пристрій. Необхідно забезпечити взаємодію та управління прикордонними маршрутизаторами;

– дозволить проводити аналітику та збереження інформації про стан системи в цілому;

– забезпечить приховане управління мережею прикордонних пристроїв;

– дозволить використати всі переваги раніше запропонованих методів пошуку аномалій.

Тобто, новий метод повинен бути уніфікованим відносно включення в себе будь-яких критеріїв пошуку кібернетичних загроз та мати широку розгалужену мережу індикаторів, що повинні базуватися на комунікаційних пристроях для фізичного розведення навантаження і трафіку.

Структуру методу протидії DDoS-атакам можна представити у вигляді рис. 1.

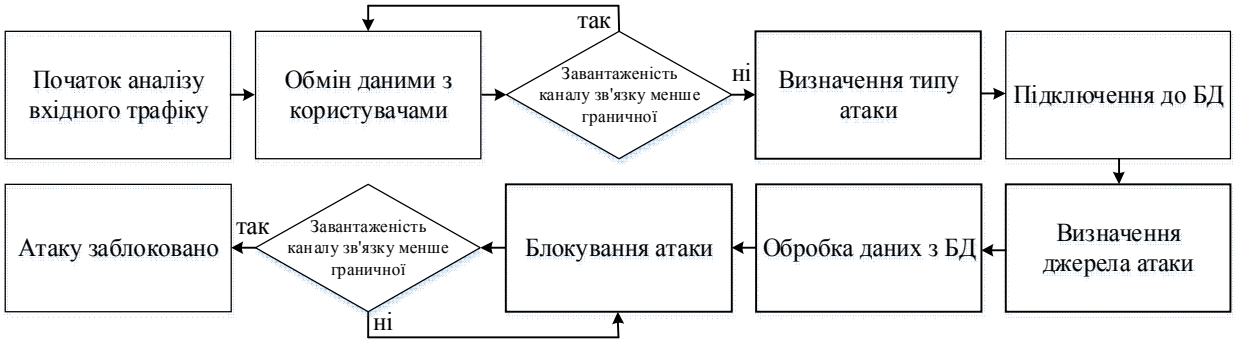



**Рис. 1.** Структура методу протидії DDoS-атакам

Даний метод базується на аналізі вхідного трафіку на предмет наявності DDoS-атаки, що реалізується шляхом постійної перевірки завантаженості каналу зв'язку під час обміну даними з користувачами системи. Якщо виявлене перевищення граничного рівня завантаженості каналу, виконується визначення типу атаки шляхом аналізу характеру перевищення. Після цього виконується підключення до бази даних, в яку записується весь вхідний трафік. Далі в залежності від джерела атаки проводиться обробка даних, отриманих з бази даних (БД). Після цього виконується блокування першого в черзі джерела шкідливого трафіку. Якщо перевищення продовжує мати місце, блокується наступне джерело. І так далі, поки завантаженість не стане менше граничної, що означає успішне блокування атаки.

Для виявлення та подальшого блокування DDoS-атак пропонується застосовувати аналізатор вхідного трафіку, що розміщується в інформаційній мережі так, як показано на рис. 2.

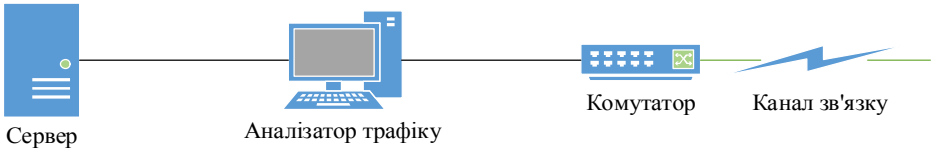



**Рис. 2.** Розміщення аналізатору трафіку в інформаційній мережі

Аналізатор трафіку представляє собою електронно-обчислювальну машину зі спеціальним програмним забезпеченням. Він аналізує трафік, що поступає на сервер, на предмет наявності DDoS-атак. Якщо такий трафік виявлений, то виконується пошук джерел шкідливого трафіку з метою їх подальшого блокування. Аналізатор трафіку функціонує наступним чином. Увесь вхідний трафік записується до бази даних «Джерела шкідливого трафіку». Під записом до бази даних розуміється занесення у відповідну таблицю бази даних вихідних програмних портів (source ports) вхідних сегментів, їх порядкових номерів, що відображають хронологію їх отримання, часу прибуття, а також вихідних IP-адрес пакетів, в які інкапсульовані дані сегменти. У разі наявності DDoS-атаки запускається механізм виявлення джерел шкідливого трафіку. При цьому запис вхідних сегментів не припиняється.

Для роботи механізму блокування джерел шкідливого трафіку необхідні вихідні дані, що збираються аналізатором трафіку в процесі його роботи, та записуються в базу даних «Джерела шкідливого трафіку», що знаходиться безпосередньо на аналізаторі. Розглянемо детальніше її структуру. Трафік, що надходить на сервер, записується у таблицю «Вихідні IP-адреси та порти відправників» з метою подальшого використання в процесі виявлення джерел шкідливого трафіку. Дана таблиця має колонки: порядковий номер вхідного пакету, що показує хронологію прибуття пакетів на сервер; вихідна IP-адреса відправника, яка зчитується з відповідного поля вхідного пакету; вихідний програмний порт відправника, який зчитується з відповідного поля вхідного сегмента; момент часу прибуття пакету на сервер.

Описані вище дії з базою даних «Джерела шкідливого трафіку» необхідні для виявлення джерел шкідливого трафіку, без чого неможливе їх блокування. Так як DDoS-атака реалізується шляхом відправлення трафіку багатьма комп'ютерами одночасно, то однозначно виявити всі джерела неможливо. Але ті джерела, з яких надійшла найбільша кількість пакетів, можливо вважати такими, з яких надходить шкідливий трафік. Тому блокується джерело, з якого отримано найбільшу кількість пакетів. Як наслідок, сумарний вхідний трафік зменшиться. Якщо при цьому рівень завантаженості каналу зв'язку зменшився та став меншим, ніж граничний, то інформаційна мережа може надавати послуги своїм легітимним користувачам з заданою якістю, а атака вважається припиненою. Якщо ж завантаженість каналу зв'язку не зменшилася до припустимого рівня, то береться наступне за кількістю вхідних пакетів джерело і блокується. І так повторюється до тих пір, поки завантаженість не стане меншою, ніж гранична.

Тепер перейдемо до безпосереднього блокування джерел шкідливого трафіку. Для подальшого блокування виявлених атак необхідно розширити представлену агент-орієнтовану систему, додавши до неї програмний шлюз. Для цього пропонується застосовувати таку структуру інформаційно-телекомунікаційної мережі, яка показана на рис. 3.

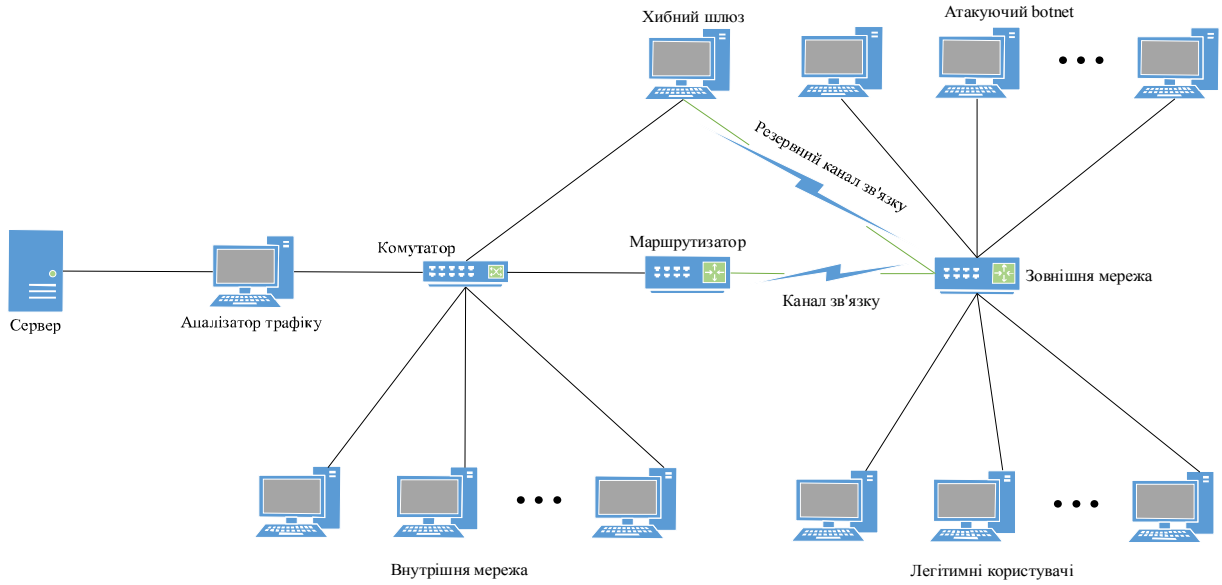



**Рис. 3.** Структура інформаційної мережі, що забезпечує блокування повільної DDoS-атаки

Представлена структура інформаційної мережі являє собою програмно-апаратний комплекс виявлення та блокування DDoS-атак, що складається з ключових елементів, представлених нижче.

Аналізатор трафіку реалізує механізм виявлення DDoS-атак, їх блокування у частині виявлення джерел шкідливого трафіку та запису і зберіганні необхідної інформації в базі даних «Джерела шкідливого трафіку». Комутатор з'єднує робочі станції, що входять до складу інформаційної мережі та сервер між собою, а також з маршрутизатором та програмним шлюзом, що з'єднують мережу з зовнішньою. Маршрутизатор є крайньою точкою інформаційної мережі та з'єднує останню з її зовнішніми користувачами. Програмний шлюз застосовується при формуванні альтернативного шляху передачі інформації та маскування під сервер для переадресації на нього шкідливого трафіку з метою ізоляції від цього трафіку серверу та основного каналу зв'язку. Він безпосередньо реалізує блокування джерел шкідливого трафіку наступним чином.

Якщо джерела шкідливого трафіку розмішені у внутрішній мережі інформаційної мережі, то використовується таблиця «Відсортовані вхідні пакети», я якої зчитується IP-адреса під номером один. Аналізатор трафіку відправляє на комутатор команду про відключення порта, до якого підключена ЕОМ з цією адресою. Якщо завантаженість каналу зв'язку стала меншою, ніж гранична, то атака вважається припинено. Якщо ні, то процес повторюється для наступної IP-адреси в таблиці. І так повторюється до припинення атаки. Після цього формується повідомлення системному адміністратору про наявність атаки, в якому вказується її тип та джерела. Останній повинен негайно прийняти міри по пошуку та знешкодженню шкідливого програмного забезпечення на відключених від мережі ЕОМ, а після його виявлення та знешкодження перевірити на предмет наявності такого програмного забезпечення решту ЕОМ мережі.

Якщо джерела шкідливого трафіку розмішені у зовнішній мережі інформаційної мережі, то використовується таблиця «Відсортовані вхідні сегменти», я якої зчитується порт під номером один. Аналізатор трафіку сегменти, що адресуються даному порту, відправляє по резервному через програмний шлюз, який підміняє вихідну IP-адресу серверу на свою, внаслідок чого наступні пакети, що містять сегменти визначеним вихідним портом, будуть адресуватися не серверу, а програмному шлюзу. Крім того, програмний шлюз дублює функціональність серверу для джерел шкідливого трафіку, що дозволяє маскуватися під сервер, захищаючи останній від деструктивних впливів ззовні. Якщо після цього завантаженість каналу зв'язку стала меншою, ніж гранична, то атака вважається припиненою. Якщо ні, то процес повторюється для наступного порта. І так повторюється до припинення атаки.

**Алгоритм виявлення DDoS-атак.** Розглянемо алгоритм виявлення DDoS-атак, схема якого представлена на рис 4. Він працює наступним чином. Інформаційна мережа постійно обмінюється пакетами зі своїми користувачами, що відображається блоком 2. При цьому виконується аналіз вхідного трафіку на предмет перевищення граничного рівня завантаженості каналу зв'язку, що вказано в блоці 3. Якщо перевищення зафіксовано в інтервалі часу до однієї секунди, то виконується перехід до блоку 4. В противному випадку – перехід до блоку 2. У блоці 4 відображена перевірка наявності перевищення граничного рівня завантаженості каналу зв'язку в інтервалі часу від першої секунди до другої. Якщо перевищення зафіксовано, то виконується перехід до блоку 5. В противному випадку – до блоку 12.

В блоці 5 виконується перевірка протоколу прикладного рівня, дані якого інкапсульовані в отримані від джерел шкідливого трафіку сегменти. Якщо дані сегменти на прикладному рівні містять протокол HTTP, то виводиться повідомлення про наявність HTTP-флуда, що відображається в блоці 6. Якщо даний протокол не знайдений отриманих сегментах, то виконується перехід до блоку 7. В цьому блоці перевіряється протокол транспортного рівня отриманих сегментів. Якщо це протокол ICMP, то робиться висновок про наявність ICMP-флуда, що відображається в блоці 8. В противному випадку

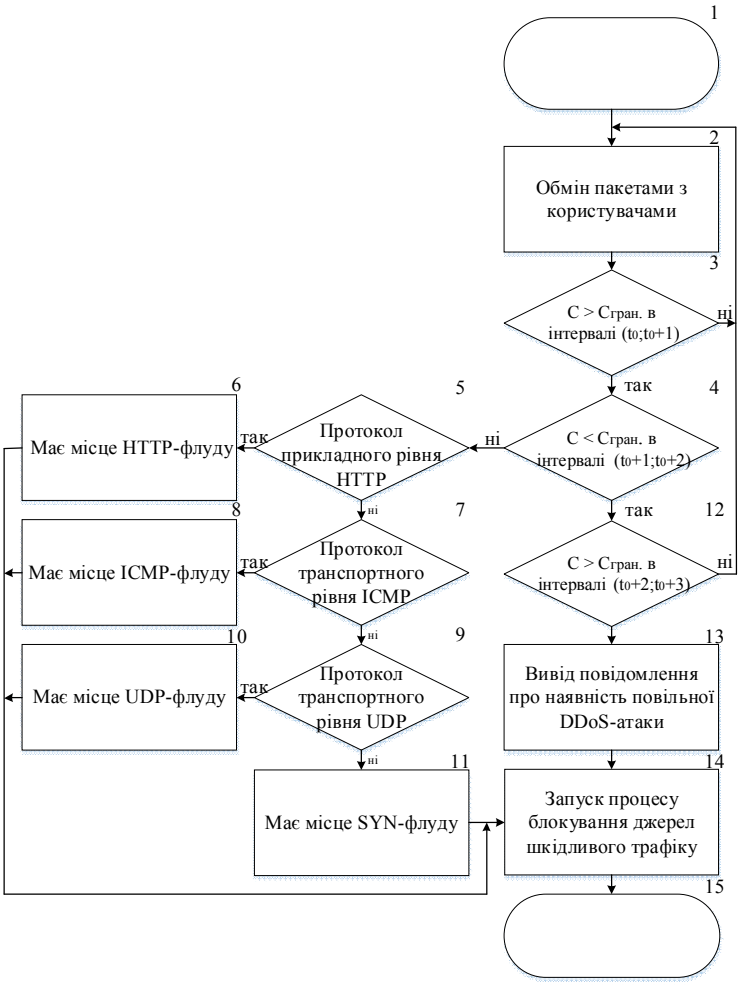



**Рис. 4.** Схема алгоритму виявлення DDoS-атак

виконується перехід до блоку 9. В даному блоці перевіряється чи протоколом транспортного рівня є UDP. Якщо так, то виконується вивід повідомлення про наявність UDP-флуда, що відображається в блоці 10. В противному випадку виконується перехід до блоку 11, де робиться висновок про наявність SYN-флуду з виводом відповідного повідомлення. Після чого робиться перехід до блоку 14. В блоці 12 перевіряється наявність перевищення граничного рівня завантаженості каналу зв'язку в інтервалі часу від другої секунди до третьої. Якщо перевищення не було зафіксовано, то виконується перехід до блоку 2, що свідчить про відсутність будь-яких атак типу «відмова в обслуговуванні» та продовження нормального обміну інформацією між сервером інформаційної мережі та її легітимними користувачами. Якщо перевищення зафіксовано, то виконується перехід до блоку 13, де виводиться повідомлення про наявність повільної DDoS-атаки. Після чого виконується перехід до блоку 14, в якому запускається процес блокування джерел шкідливого трафіку. Після цього виконується перехід до блоку 15 та завершення процесу виявлення атак.

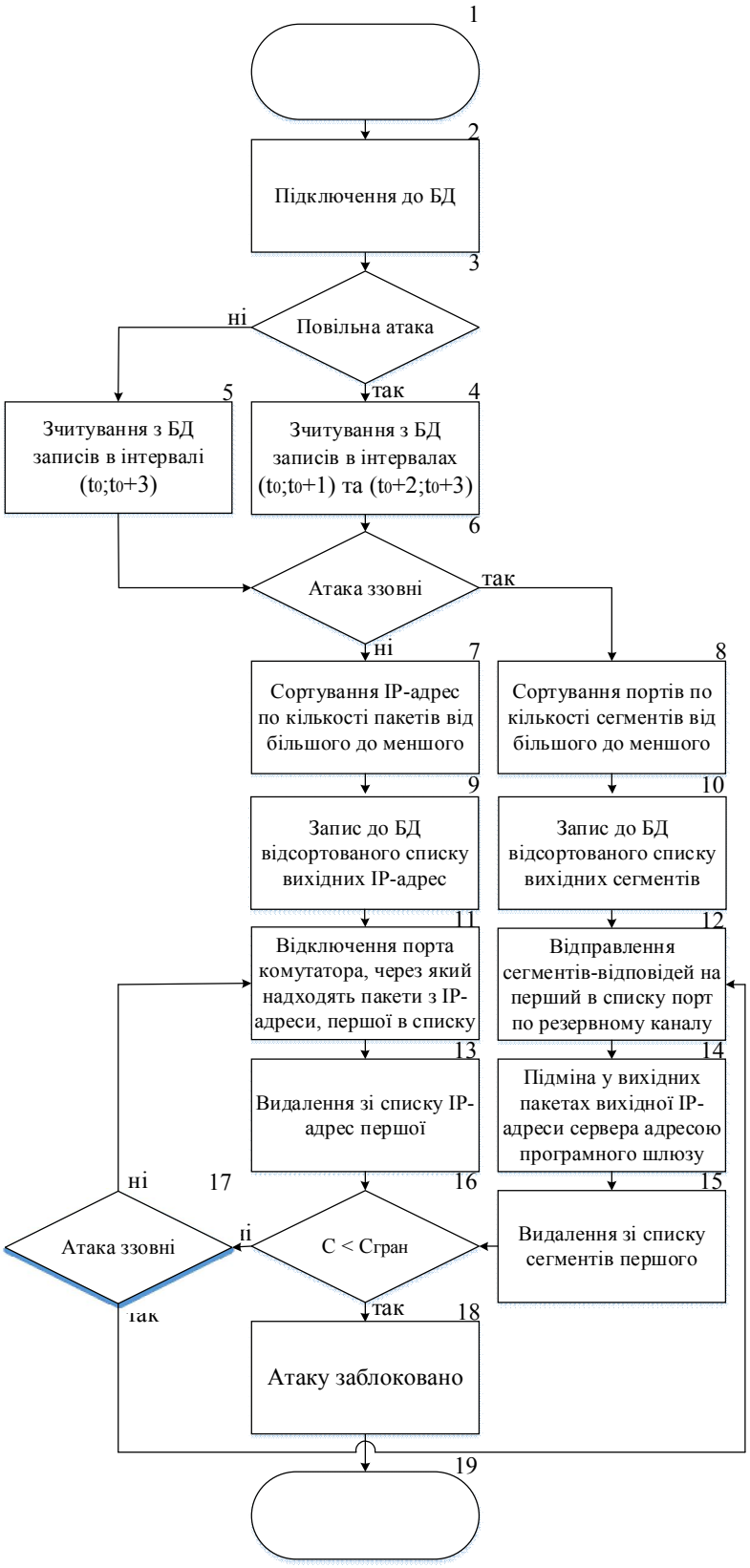



**Рис. 5.** Схема алгоритму блокування DDoS-атак

**Алгоритм блокування DDoS-атак.** Вище був розглянутий алгоритм виявлення DDoS-атак, який програмно реалізується на аналізаторі трафіку. Тепер перейдемо до розгляду алгоритму блокування даного типу атак, що реалізується як на аналізаторі трафіку, так і на програмному шлюзі. Блок-схема даного алгоритму представлена на рис. 5.

Робота даного алгоритму починається з підключення до бази даних «Джерела шкідливого трафіку», що виконується в блоці 2. Після цього в блоці 3 визначається тип атаки. Якщо має місце повільна DDoS-атака, то з бази даних зчитуються записи за першу та третю секунди від її початку (блок 4). При наявності атаки на всьому часовому інтервалі зчитуються записи за три секунди від початку атаки (блок 5). Далі визначається джерело атаки. Якщо атака з внутрішньої мережі, то в блоці 7 виконується сортування IP-адрес по кількості пакетів від більшого до меншого. Після цього в блоці 9 відсортований список вихідних адрес записується у таблицю «Відсортовані вхідні пакети» бази даних. Потім в блоці 11 виконується відключення порта комутатора, через який надходять пакети з IP-адреси, першої в списку. Далі в блоці 13 перша адреса в списку видаляється. Якщо атака ззовні, то в блоці 8 виконується сортування портів по кількості сегментів від більшого до меншого. Потім в блоці 10 відсортований список вихідних сегментів записується в таблицю «Відсортовані вхідні сегменти» бази даних. Після чого в блоці 12 викону-

ється відправлення сегментів-відповідей на перший в списку порт по резервному каналу зв'язку. Далі в блоці 14 виконується підміна у вихідних пакетах адреси серверу адресою програмного шлюзу з подальшим видаленням зі списку сегментів першого в блоці 15. Після виконання блокування першого джерела шкідливого трафіку виконується перевірка завантаженості каналу зв'язку в блоці 16. Якщо завантаженість більше граничної, то, перевіривши в блоці 17 джерело атаки, виконується блокування наступного в списку джерела, що змістилося з другого номеру на перший. Якщо завантаженість стала меншою, ніж гранична, в блоці 18 робиться висновок, що атаку заблоковано, і процес блокування завершується.

**Оцінка ефективності запропонованого методу протидії DDoS-атакам.** Перейдемо до оцінки ефективності запропонованого методу протидії DDoS-атакам, що реалізується шляхом аналізу вхідного трафіку на предмет наявності останньої і подальшого виявлення джерел шкідливого трафіку та їх блокування. Для цього застосуємо критерії ефективності, що базується на забезпеченні оперативності управління в інформаційній мережі. У якості показника ефективності застосовується час недоступності інформаційної мережі.

Було знайдено середнє значення часу кругового обігу пакетів в мережі Інтернет $RTT = 5*10^{-2}$ секунд, що дозволило оцінити час недоступності інформаційної мережі в залежності від кількості комп'ютерів в мережі, що здійснює атаку.

Залежність часу недоступності від кількості комп'ютерів в мережі, що здійснює атаку, представлена на рис. 6.

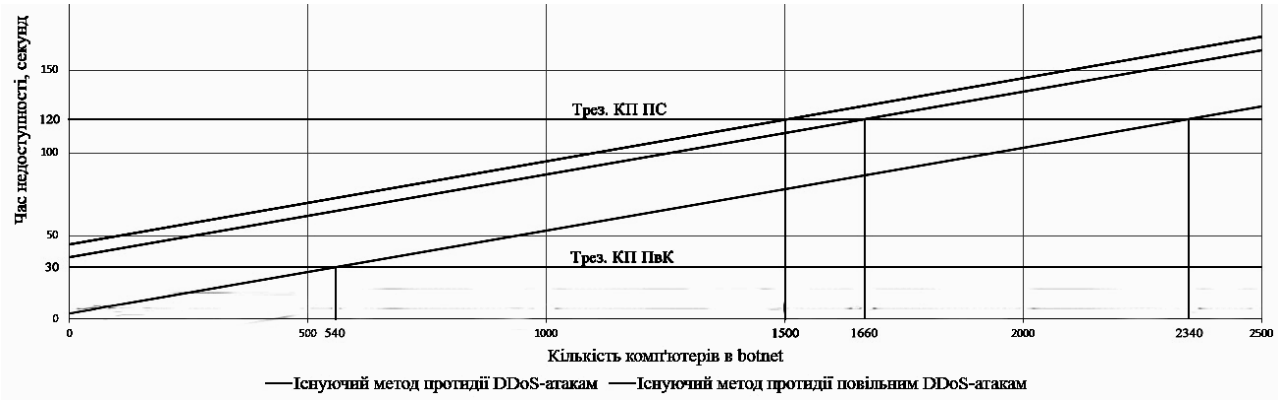



**Рис. 6.** Залежність часу недоступності від кількості комп'ютерів в мережі

На даному рисунку відображені значення резервного. Також на ньому порівняно існуючи методи протидії DDoS-атакам, як повільним, так і на всьому часовому інтервалі. Видно, що запропонований метод дозволяє забезпечити однакову з існуючими оперативність управління при можливості блокування атаки значно більшою за розміром мережі.

Було проведено експериментальне дослідження ефективності роботи запропонованого методу протидії повільним DDoS-атакам, результати якого приведені у табл. 1.

*Таблиця 1* – **Експериментальне дослідження ефективності запропонованого методу при наявності DDoS-атаки**

| Кількість випробувань | Кількість вірних рішень | Кількість невірних рішень | |
|---|---|---|---|
| | | Неспрацювання | Хибне спрацювання |
| 10000 | 9696 | 203 | 101 |

Випробування проводилися на імітаційній моделі інформаційної мережі під впливом повільної DDoS-атаки та атаки на всьому часовому інтервалі. Кількість випробувань була обмежена 10000, в зв'язку з тим, що результати дослідження по досягненні даного числа випробувань проявляли стійку тенденцію.

Можна розрахувати, що ймовірності прийняття вірного рішення про наявність або відсутність повільної DDoS-атаки та її успішного блокування, а також ймовірності помилок. Ймовірність прийняття вірного рішення становить 97%, помилки першого роду – 2 % та помилки другого роду – 1 %.

Таким чином, запропонований метод протидії DDoS-атакам дозволяє значно скоротити час недоступності інформаційної мережі (28 секунд) у порівнянні з існуючими (45 секунд), показує значний відсоток успішних спрацьовувань (97 %), що гарантує забезпечення заданих вимог до оперативності управління в інформаційній мережі під впливом DDoS-атаки.

## Висновки

Запропоновано метод протидії DDoS-атакам, що дозволяє ефективно захищати інформаційну мережу як від атак на всьому часовому інтервалі, так і від повільних атак. Даний метод дозволяє забезпечити функціональну стійкість інформаційної мережі та базується на використанні алгоритмів виявлення та блокування DDoS-атак, а також збору інформації про вхідний трафік з записом до бази даних «Джерела шкідливого трафіку». При виявленні атаки визначається її тип та запускається механізм її блокування, що реалізується в два етапи.

На першому етапі виконується пошук джерел шкідливого трафіку, використовуючи зібрану в базі даних інформацію про вхідні пакети.

На другому етапі виконується безпосереднє блокування виявлених джерел шляхом відправлення

пакетів-відповідей по резервному каналу зв'язку через програмний шлюз, на якому вихідна адреса серверу у пакетах підміняється адресою шлюзу, що дає змогу замаскувати сервер від зовнішнього деструктивного впливу (у разі атаки ззовні).

При атаці з внутрішньої мережі відключаються порти комутатора, до яких підключені джерела шкідливого трафіку. Після цього оповіщається системний адміністратор, який негайно приступає до пошуку та знешкодження шкідливого програмного забезпечення.

Отримані алгоритми виявлення та блокування DDoS-атак, що описують послідовність дій при застосуванні методу протидії. Алгоритм виявлення атак реалізується на аналізаторі вхідного трафіку, який перевіряється на предмет наявності DDoS-атак. У разі виявлення такої атаки визначається її тип. Після цього реалізується алгоритм блокування, який зчитує з бази даних джерела шкідливого трафіку та перенаправляє його на програмний шлюз, який забирає на себе подальший деструктивний вплив. Таким чином, алгоритм блокування атаки реалізується частково на аналізаторі трафіку та частково на програмному шлюзі.

Проведена оцінка ефективності запропонованого методу протидії DDoS-атакам. В якості показника ефективності обрано час недоступності інформаційної мережі для її користувачів. В порівнянні з існуючим методом протидії DDoS-атакам, запропонований метод здатний істотно скоротити час виявлення та блокування атаки. При цьому ймовірність прийняття вірного рішення при виявленні атаки становить 97 %, помилки першого роду – 2 % та помилки другого роду – 1 %.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ


1. Математична модель структури розгалуженої інформаційної мережі 5 покоління (5G) на основі випадкових графів / І. П. Саланда, О. В. Барабаш, А.П. Мусієнко, Н.В. Лукова-Чуйко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2017. – Вип. 6 (46). – С. 118–121.
2. Аналіз кібернетичних атак як істотних загроз інформаційній безпеці / І. В. Рубан, Є. С. Лошаков, Д. В. Прибильнов, О. П. Давікоза // Системи управління, навігації та зв'язку. – К., 2012. – № 4(24). – С. 102–105.
3. Саланда І. П. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж / І. П. Саланда, О. В. Барабаш, А. П. Мусієнко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2017. – Вип. 1 (41). – С. 122 – 126.
4. Рубан І. В. Аналіз основних аспектів впливу DOS атак на працездатність мережі / І. В. Рубан, Є. С. Лошаков, Д. В. Прибильнов // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – К., 2013. – № 3 (18). – С. 90–92.
5. Mashkov V. A. Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel / V. A. Mashkov, O. V. Barabash // Engineering Simulation. – Amsterdam: OPA, 1998. – Vol. 15. – P. 43-51.
6. Барабаш О.В. Інформаційний підхід до забезпечення функціональної стійкості складних організаційних ерготехнічних систем / О. В. Барабаш, Д. П. Пашков, О. М. Горський // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 86–89.
7. Барабаш О. В. Методология построения функционально-устойчивых распределенных информационных систем специального назначения / О. В. Барабаш. – Киев: НАОУ, 2004. – 224 с.
8. Барабаш О. В. Методика накопичення діагностичної інформації в системах інтелектуального відеоконтролю / О. В. Барабаш, С. В. Бодров, А. П. Мусієнко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2015. – Вип. 1 (33). – С. 118–121.
9. Барабаш О. В. Алгоритм самодіагностування технічного стану вузлів комутації інформаційних систем / О. В. Барабаш, Д. М. Обідін, А. П. Мусієнко // Сучасний захист інформації. – К., 2014. – № 2. – С. 114–121.
10. Рубан І. В. Обгрунтування вибору інтервалу спостереження при очікуванні повільної DoS-атаки / І. В. Рубан, Є. С. Лошаков, Д. В. Прибильнов // Системи обробки інформації. – Х., 2014. – Вип. 8 (124). – С. 135–137.


## REFERENCES


1. Salanda, I.P., Barabash, O.V., Musienko, A.P. and Lukova-Chuiko, N.V. (2017), "Mathematical model of the structure of the 5th generation branched information network (5G) on the basis of random graphs", *Control systems, navigation and communication*, PNTU, Poltava, No. 6 (46), pp. 118-121.
2. Ruban, I.V., Loshakov, Ye.S., Pribilnov, D.V. and Davikoza O.P. (2012), "Analysis of cybernetic attacks as significant threats to information security", *Control, navigation and communication systems*, PNTU, Poltava, No. 4 (24), pp, 102-105.
3. Salanda, I.P., Barabash, O.V. and Musienko, A.P. (2017), "The system of indicators and criteria for formalizing the processes of ensuring the local functional stability of the branched information networks", *Control, navigation and communication systems*, PNTU, Poltava, No. 1 (41), pp, 122-126.
4. Ruban, I.V., Loshakov, Ye.S. and Pribilnov, D.V. (2013), "Analysis of the main aspects of the impact of DOS attacks on network performance", *Modern information technologies in the field of security and defense*, Kyiv, No. 3 (18), pp. 90-92.
5. Mashkov, V.A. and Barabash, O.V. (1998), "Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking Diagnostic Kernel", *Engineering Simulation*, OPA, Amsterdam, Vol. 15, pp. 43-51.
6. Barabash, O.V., Pashkov, D.P. and Gorsky, O.M. (2016), "Informational approach to ensuring the functional stability of complex organizational ergot systems", *Information Processing Systems*, KhUPS, Kharkiv, No. 9 (146), pp. 86-89.
7. Barabash, O.V. (2004), *Methodology for constructing functionally stable distributed information systems for special purposes*, NAOU, Kyiv, 224 p.
8. Barabash, O.V., Bodrov, S.V. and Musienko, A.P. (2015), "Method of accumulation of diagnostic information in systems of intellectual video control", *Control systems, navigation and communication*, PNTU, Poltava, No. 1 (33), pp. 118-121.

9. Barabash, O.V., Obidin, D.M. and Musienko, AP (2014), "The algorithm of self-diagnostics of the technical condition of the switching nodes of information systems", *Modern Information Protection*, Kyiv, No. 2, pp. 114-112.
10. Ruban, I.V., Loshakov, Ye.S. and Pribilnov, D.V. (2014), "Justification of the choice of the interval of observation in anticipation of a slow DoS-attack", *Information Processing Systems*, KhUPS, Kharkiv, No. 8 (124), pp. 135-137.

Надійшла (received) 21.02.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 11.04.2018

**Обеспечение функциональной устойчивости информационных сетей на основе разработки метода противодействия DDOS -атакам**

О. В. Барабаш, Н. В. Лукова-Чуйко, А. П. Мусієнко, В. В. Собчук

**Предметом** изучения в статье является процесс обеспечения свойства функциональной устойчивости информационных сетей. **Целью** является разработка метода противодействия DDoS-атакам, что позволяет эффективно защищать информационную сеть, как от атак на всем временном интервале, так и от медленных атак. **Задача:** разработать алгоритмы обнаружения и блокирования DDoS-атак, описывающих последовательность действий при применении метода противодействия; провести оценку эффективности предложенного метода противодействия DDoS-атакам. Используемыми **методами** являются: графов подход, математические модели оптимизации, методы решения нелинейных задач. Получены следующие **результаты**. Построены алгоритмы обнаружения и блокирования DDoS-атак, описывающих последовательность действий при применении метода противодействия. Алгоритм обнаружения атак реализуется на анализаторе входящего трафика, который проверяется на предмет наличия DDoS-атак. В случае выявления такой атаки определяется ее тип. После этого реализуется алгоритм блокировки, который считывает из базы данных источника вредного трафика и перенаправляет его на программный шлюз, который берет на себя дальнейшее деструктивное влияние. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: мы предложили метод противодействия DDoS-атакам, что позволяет эффективно защищать информационную сеть как от атак на всем временном интервале, так и от медленных атак. Данный метод позволяет обеспечить функциональную устойчивость информационной сети и базируется на использовании алгоритмов обнаружения и блокирования DDoS-атак, а также сбора информации о входящем трафике с записью в базу данных «Источники вредоносного трафика». При обнаружении атаки определяется ее тип и запускается механизм ее блокировки, который реализуется в два этапа. На первом этапе выполняется поиск источников вредоносного трафика, используя собранную в базе данных информацию о входящих пакетах. На втором этапе выполняется непосредственная блокировка выявленных источников путем отправки пакетов-ответов по резервному каналу связи через программный шлюз, на котором исходный адрес сервера в пакетах подменяется на адрес шлюза, что позволяет замаскировать сервер от внешнего деструктивного воздействия (в случае атаки извне). При атаке с внутренней сети отключаются порты коммутатора, к которым подключены источники вредоносного трафика. После этого оповещается системный администратор, который немедленно приступает к поиску и обезвреживанию вредоносных программ.

**Ключевые слова:** информационная сеть; функциональная устойчивость; DDoS-атака; системы обнаружения торжения; база данных; анализатор трафика; маршрутизаторы; коммутаторы.

**Providing functional stability of information networks Based on the development of method for countering ddos-attacks**

O. Barabash, N. Lukova-Chuiko, A. Musienko, V. Sobchuk

**The subject** of study in the paper is the process of providing the property of the functional stability of information networks. **The goa**l is to develop the method of countering of DDoS- attacks, which allows to effectively protect the information network, both from attacks on the overall time interval, and from slow attacks. **The problem** is to develop algorithms for detecting and blocking of DDoS - attacks, which describe the sequence of actions when applying the method of countering of DDoS- attacks, to evaluate of the efficiency of the proposed method. The methods, which used are graph approach, mathematical models of optimization, methods of solving nonlinear problems tasks. The following **results** are obtained. Algorithms are constructed for detecting and blocking DDoS-attacks which describing the sequence of actions when applying the method of countering. The algorithm for detecting attacks is implemented on the analyzer of incoming traffic, which is checked for the presence of DDoS attacks. In case of detecting such an attack, its type is determined. After that, the blocking algorithm is implemented, which reads from the database of malicious traffic source and redirects it to the software gateway, which takes on itself the further destructive influence. **Conclusions.** Scientific novelty of the obtained results is as follows, we have proposed the method of countering of DDoS- attacks, which effectively protects the information network, both from attacks on the overall time interval, and from slow attacks. This method allows ensuring the functional stability of the information network and is based on the use of algorithms for detecting and blocking DDoS-attacks, and also collection of information about incoming traffic with the record in the database of "Sources of Malicious Traffic". When an attack is detected, it is determined her type it is started the mechanism for her blocking, which is realized in two stages. At the first stage, it is executed searching of sources of malicious traffic using the collected information about incoming packages in the database. At the second stage, it is performed direct blocking of detected sources by sending packets of replies on the backup channel through the software gateway on which, the outgoing address of server in packages replaced by the address of the gateway which it is allows to disguise the server from external destructive effects (in the case of the outside attack). When the attack from the internal network, switches ports to which connected sources of malicious traffic are disconnected. After that, the system administrator is notified, who immediately starts to search and eliminate of malicious software.

**Keywords:** information network; functional stability; DDoS-attack; systems of detecting an intrusion; database; analyzer of traffic; routers; switches.

UDC 004.6 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.12**

O. Illiashenko [1], V. Kharchenko [1,2], A. Kor [3]

[1] National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] Research and Production Company Radiy, Kropyvnytskyi, Ukraine
[3] Leeds Beckett University, LS1 3HE, Leeds, Great Britain

# GAP-ANALYSIS OF ASSURANCE CASE-BASED CYBERSECURITY ASSESSMENT: TECHNIQUE AND CASE STUDY

The **subject matter** of the article is the processes of cybersecurity assessment. The **goal** is to develop technique for gap-analysis of cybersecurity analysis process. The **task** to be solved is to develop a method for analyzing gaps in the process of assessment of non-functional requirements for safety and cybersecurity of ICS. It is based on the classification of requirements, taking into account the possibility of their decomposition, which includes the construction of an advanced security assurance and determination of counter-measures to address detected gaps. **Conclusions**. The scientific novelty of the results obtained is as follows: the method for ensuring the information security of digital components of the I&Cs was further developed by analyzing the discrepancies of requirements using vulnerability description procedures and assessing the severity of the intrusions consequences, as well as determining the set of countermeasures by the "security-cost" criterion, which makes it possible to reduce risks to an acceptable level.

**Keywords:** Advanced Security Assurance Case (ASAC); gap-analysis; cybersecurity; assessment; requirement; conformance.

## Introduction

**MOTIVATION.** With the continuous emergence of new technologies and the improvement of the old ones, new challenges arise for trusting the devices used, especially if these devices perform security functions or access to confidential data. The problems of safety, security and particularly cybersecurity assessment and assurance of such systems became even more crucial when the peculiarities of technologies used during the process of development of the final product should be addressed.

Modern companies are paying the most attention to the issues of ensuring the cyber security of their IT systems during last years. However, in fact, it turns out that even compliance with all requirements to cybersecurity could not ensure the absolute protection of digital assets. The Cisco 2017 Annual cybersecurity report [1] (which is based on the research done in 13 countries with more than 2900 participants from 130 companies in different branches of economy) contains information that among the processed alerts about threats, only every second one (28%) is justified. Real countermeasures, which are implemented to mitigate the threats, are taken only with respect to half of the reasoned cases (46%). The bad consequences of this situation are as follows: over a third of the companies affected by the attack lost at least 20% of their income.

Unfortunately, existing regulatory documents (both local and international) trying to cover the intended areas of technologies and, which are particularly important, critical applications, are insufficiently structured. They are developed without sufficient consideration of related technologies and should be more detailed in the terms of description of appropriate approaches for assessment and assurance of cybersecurity requirements and their relationship with the technologies used [2]. The problem of "branch customization" of the regulation documents is still challenging.

Based on the developed taxonomy of used notions [3] the main notions in accordance with product-process approach of cybersecurity assessment are *process, product and intrusion*. Processes are being implemented through the development stages of Instrumentation and Control systems (I&Cs)' life cycle in order to produce products.

The products can be vulnerable to intrusions of various types that can affect the product itself. Results of the implementation of the processes (i.e., all the processes that led to the creation of the product) can have effects on possible consequential changes in such processes. Each process comprises activities, and, in case of "non-ideal" process, some of them can contain discrepancies, e.g. anomalies. In terms of cybersecurity some of the anomalies can be vulnerabilities of the product. Vulnerabilities, in turn, can be exploited by an adversaries during intrusion into the product to implement an by adversaries attack in order to introduce some unintended functionality into the product. And thereby, the gaps are introduced in the process of the cybersecurity assessment and, finally, in the product.

One of the main milestones in achieving security objectives is the unification of the process of analyzing and ensuring the cybersecurity of complex systems. Another problem is the correctness and validity of the assessment process itself, which can potentially harm the assessment result at the end of the day. Thus, both industry and the academic sector need to have cybersecurity assurance technique that will take into account all the features of the technologies used in the product and possible gaps in the assessment process of assurance the cybersecurity of such systems.

**WORK-RELATED ANALYSIS.** There are several different ways of constructing the cases [4]. They can be characterized in terms of a safety justification "triangle" [5]: claims – standards – vulnerabilities. As soon as safety plays master role in safety-critical systems the adaptation of this triangle to the cybersecurity assurance was made as follows:

- claims (or positive properties) about the systems' cybersecurity behavior. Here the specific claims for the I&Cs are supported by arguments and evidences at progressively more detailed level;
- the use of accepted standards and guidelines which is connected with demonstrating compliance to a known safety standard [6];
- vulnerabilities analysis (or negative properties) where it is demonstrated that potential vulnerabilities within a system do not constitute a problem.

The basic understanding of assurance in this paper is treated from [7]. The case-based assessment practices for different domains can be found in [8]-[9].

**OBJECTIVES AND STRUCTURE.** The objective of the paper is to briefly describe the results of development and application of the technique for providing the gap-analysis of assurance case-based cybersecurity assessment

The structure of the paper is as follows. Section II presents description of main entities, which can play role of possible gaps during the cybersecurity analysis and describes main stages of gap-analysis of assurance case-based cybersecurity assessment. Section III contains the example of the gaps which could possibly arise during stages of cybersecurity analysis. Section IV contains conclusions and future work directions.

## Description of the Cybersecurity Assurance Case-oriented Technique

The main stages of the overall cybersecurity assurance case-based technique are depicted on the fig. 1. The brief description of the main stages is as follows:

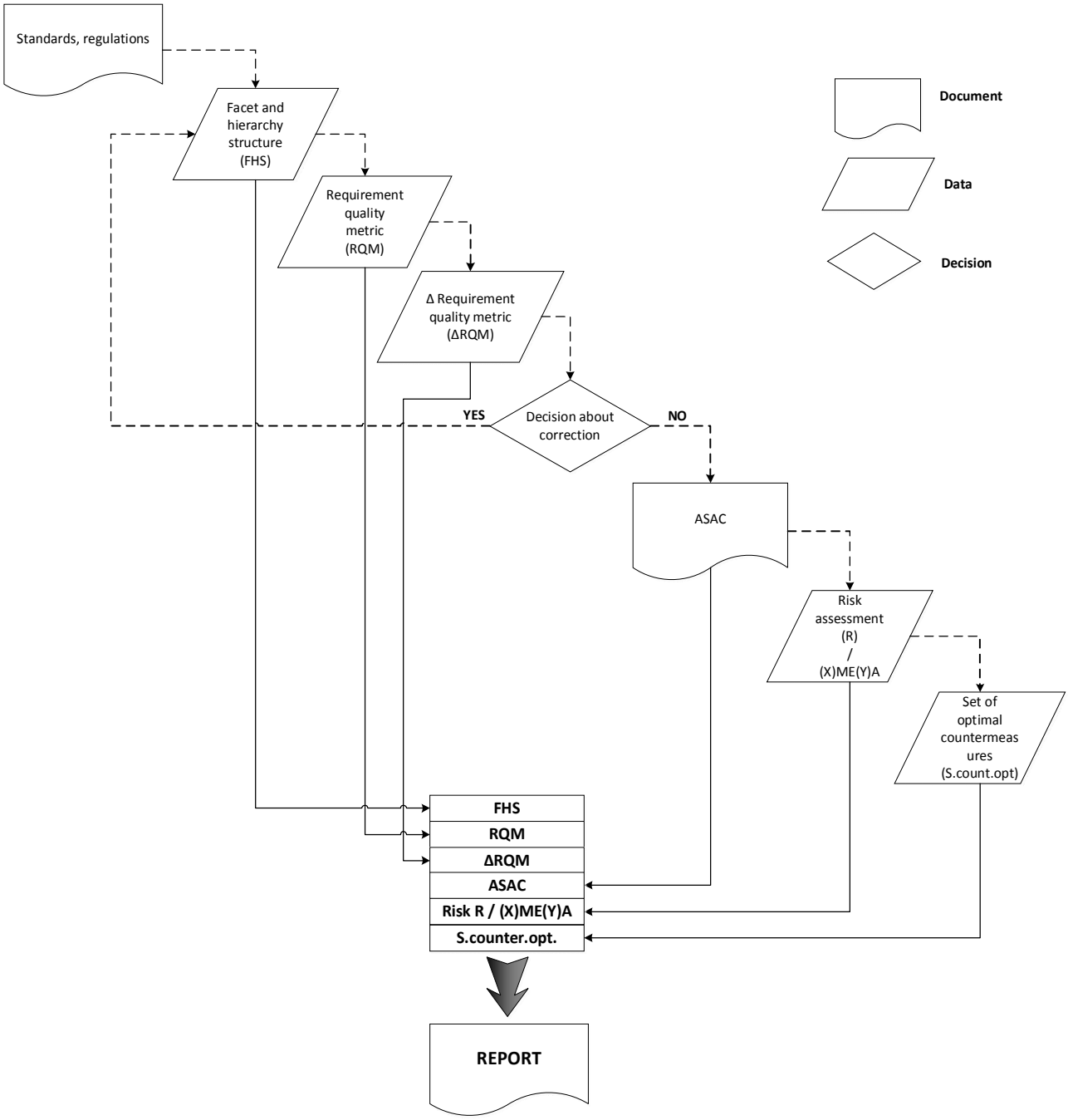



**Fig. 1.** The overall picture of assurance case-based cybersecurity assessment

- Building the **requirements profile** for the particular product and requirements for its cybersecurity assessment and assurance. The requirement profile should take into account international standards, local regulations, best practices with the detailed description of the technologies used.
- Building the **facet and hierarchical structure** of the requirements profile. This stage allows establishing the interrelations of the requirements, which are "located" at different levels of abstraction (which were initially taken from different levels of the normative documents, e.g. international and local level) or represent different branches. FHS allows representing the requirement profile in way that is more convenient for understanding. It implies the analysis of semantics and classification of requirements.
- It is especially crucial because for complex systems, e.g. safety-critical, mission-critical systems the amount of requirements and thus the size of the resulting requirement profile can be extremely huge in its size and its interpretation is a separate and complex issue. The requirements for cybersecurity assessment and assurance process should be addressed carefully.
- Assessment of the corresponding **Requirement Quality Metric (RQM).** It implies analysis of semantics and classification of requirements, representation of FHS in the form of multigraph, determination of weighting coefficients and calculation of the fuzzy / entropy coefficient, which is named Requirement Quality Metric ("actual").
- Assessment of the **delta-RQM** to the required level. During this stage, the determination of the requirements for RQM important for cybersecurity ("ideal") should be done. After this the delta-RQM should be calculated by comparison of RQM "ideal" with RQM "actual".
- Decision **about correction**. At this stage the person or group of persons conducting the cybersecurity assurance analysis should make a decision about correction of the FHS (which was built earlier) on the basis of delta measure of effectiveness. If the decision is affirmative then the facet and hierarchical structure should be modified and the process of RQM assessment will start again.
- If the decision to amend the system was not made then the **Advanced Security Assurance Case (ASAC)** should be developed. The process of development of ASAC is described in detail in [10]. The example application of ASAC in the process of cybersecurity assurance of multi-version safety-critical I&Cs based on Field Programmable Gate Arrays (FPGA) is described in [11].
- For assessment of risks related with the intrusion to the system (e.g. unrealized countermeasures) the Intrusion Modes, Effects and Criticality Analysis **IMECA** should be executed. IMECA is a modification of FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) which takes into account possible intrusions to the system [12]. Since any vulnerability can become a failure if an intrusion occurs, the IMECA should be used. It allows taking into account failures caused by intrusions "using" system vulnerabilities. During this stage the *(X)ME(Y)A* modifications of FMEA family can be used depending on the task as well, where $X \in \{Concept, Design, Failure, Intrusion, Process, Product, Software, System\}$ and $Y \in \{Criticality, Diagnostic\}$. At this stage the level of acceptable risk is assessed. All related risks are calculated, studied and ranged according with their criticality using criticality matrixes. Here the joint use of gap-analysis together with IMECA is also possible. It is based on the identification of all possible discrepancies which can be introduced by intrusions that in its turn could arise during the cybersecurity assessment stages. Ranging of gaps (which arise during the I&Cs' development process) which could lead to intrusions is made by its criticality of using them by an intruder to perform successful attack. The joint application of gap-analysis together with IMECA provided for cybersecurity assessment of I&Cs used in nuclear power plant is presented in [3].
- To eliminate the identified (or even possible) vulnerabilities (furthermore attacks and threats) or make them difficult (or even impossible) to exploit by an intruder/attacker the determination of both sufficient and cost-effective countermeasures should be done. The **set of countermeasures** is developed during this step taking into account maximum of effectiveness (maximum level of cybersecurity) and minimum costs.

All data from previous steps are convoluted into the case report, which contain the resulting data received from all steps and description of the corresponding identified gaps in order to make them traceable, verifiable and justifiable.

It allows both developers, evaluators, owners and any kind of parties involved implement changes to the system within their competencies and thus this mechanism itself provide confident and scalable solution.

All abovementioned steps are forming the overall picture of gap-analysis of assurance case-based cybersecurity assessment.

## Gap-analysis of Assurance case-based cybersecurity assessment technique

The gaps could be introduced into the result of cybersecurity assessment (final product of the cybersecurity assessment) through imperfection of the following entities:

- *human* (process developer). Gaps of such type can appears in the final product due to insufficient knowledge of the developer, validator, owner, etc. or due to the fact that the person or group of persons conducting the cybersecurity analysis are insiders pursuing destructive purposes;
- *technique*. Usage of inappropriate techniques during cybersecurity analysis or incorrect interpretation of the results obtained could possible lead to the gaps of such type;
- inappropriate *tools*, which are used during the cybersecurity assessment process.

Each stage of the assurance case-based cybersecurity analysis technique can possibly contain gaps itself. So, in order to obtain the correct results of cybersecurity assessment the developer, validator, owner or any stakeholder should be confident that no gaps were introduced during the cybersecurity analysis stages.

The example of results of the gap-analysis for each stage of the algorithm is represented in Table I.

*Table I.* **Identification of Gaps**

| Stage | Identified gaps |
|---|---|
| **Standards, regulations** | Not all standards and regulations are taken into account<br>Standards do not include all the features of used technologies<br>Not all requirements are included in the profile of requirements (the requirements profile is incomplete)<br>Implementation of unnecessary requirements (unimportant for security)<br>Standards do not include all the features of used technologies |
| **Facet and hierarchy structure (FHS)** | The facet and hierarchy structure is made incorrectly<br>Not all requirements are included in the structure (the FHS is incomplete) |
| **Requirement Quality Metric (RQM)** | The weights for the requirements are defined inaccurately<br>Classification of requirements is made incorrectly (e.g. Boolean - like not Boolean; Not Boolean - like Boolean) |
| **Requirement Quality Metric (ΔRQM)** | The requirements for Δ Effectiveness criterion (ΔEf.cr.) are determined incorrectly (overestimated / underestimated) |
| **Decision about correction** | Decisions about correctness of the requirements are erroneous (incomplete, inaccurate) |
| **ASAC** | ASAC is built erroneously (incomplete, inaccurate)<br>Expert' activities algorithm is determined erroneously (incomplete, inaccurate, not in detail)<br>The final results of conformity is determined erroneously |
| **Risk assessment (R) / (X)ME(Y)A** | The list of gaps is incomplete<br>Not all gaps are itemized and included to (X)ME(Y)A / IMECA<br>The probability and severity of the non-conformity of the system with the requirements is determined inaccurately<br>The risk is calculated inaccurately |
| **Set of optimal countermeasures (S.count.opt)** | The list of countermeasures is incomplete<br>The coverage of the system by countermeasures is done erroneously (incomplete, inaccurate, incorrect)<br>Generalized indicators of countermeasures optimality were calculated erroneously<br>The optimization procedure is not implemented correctly |
| **REPORT** | Negotiation of results is not traced back<br>The report is made with errors |

## Conclusions and Future Work

To sum up, the cybersecurity analysis process using the case approach may have inconsistencies that need to be evaluated and accounted for so that their impact on the outcome of the assessment is minimal.

The development and implementation of methods and tools for cyber security analysis can improve the reliability of evaluation and enforcement of cyber security requirements. The use of ASAC as an algorithmic mechanism for representing the requirements for cybersecurity allows the analysis process to be conducted in an understandable and reproducible way by any party involved. Thus, the subjectivity of evaluating cybersecurity is reduced.

The paper discusses the main elements of performed gap-analysis for assurance case-based cybersecurity assessment using ASAC. The application of such technique allows decreasing a probability of discrepancies (furthermore vulnerabilities) exploitation and appearance of security flaws of the cybersecurity assessment technique itself.

The proposed cybersecurity assessment approach and technique were applied to cyber security assessment of RadICS FPGA-based I&C platform, developed by Research and Production Corporation Radiy. Gap-analysis and IMECA were applied in development of a company standard in Research and Production Corporation Radiy that is harmonized with international standards.

This normative document is used during implementation of development and verification activities for safety-critical systems for nuclear power plants in Ukraine.

Future steps of the research will be dedicated to more careful determination of gaps during the stages of assurance-based cybersecurity analysis as well as development of the tool for automation of the described technique.

## Acknowledgment

This paper is based on the experience obtained during constant work within of the EU-funded projects, namely in the frame of the educational project: SEREIN project funded under Tempus programme – «Modernization of postgraduate studies on SEcurity and REsilience for human and INdustry related domains» (543968-TEMPUS-1-2013-1-EE-TEMPUS-JPCP) [13].

REFERENCES

1. *Cisco 2017 Annual cybersecurity report*, available at: https://www.cisco.com/c/m/en_au/products/security/offers/annual-cybersecurity-report-2017.html (last accessed March 4, 2018).
2. Illiashenko, O., Kharchenko, V. and Jervan, G. (2013), "Security of industrial FPGA-based I&C systems: normative base and sis approach", *Radioelectronic and computer systems*, No. 3 (62), pp. 86-91.
3. Illiashenko, O., Kharchenko V., Kovalenko, A., Sklyar, V. and Boyarchuk, A. (2014), "Security informed safety assessment of NPP I&C systems: GAP-IMECA technique", *Proceedings of the 22nd International Conference on Nuclear Engineering ICONE 22*, Czech Republic.
4. Bishop, P.G., Bloomfield, R.E. and Guerra, S. (2004), "The future of goal-based assurance cases", Workshop on Assurance Cases, *2004 International Conference on Dependable Systems and Networks*, Florence.
5. Bloomfield, R., Netkachova, K. and Stroud, R. (2013), "Security-Informed Safety: If It's Not Secure, It's Not Safe", A. Gorbenko, A. Romanovsky, V. Kharchenko (Eds.): *SERENE 2013, LNCS 8166*, pp. 17-32.
6. Cyra, L. and Gorski, J. (2011), *SCF - A Framework Supporting Achieving and Assessing Conformity with Standards*. Special Issue: Secure Semantic Web. 33(1), 80 p.
7. Williams, J.R. and George, F.J. (1998), *A Framework for Reasoning about Assurance*, Document Number ATR 97043, Arca Systems, Inc. 23 April 1998.
8. *Towards an Assurance Case Practice for Medical Devices, Carnegie Mellon University*, available at: http://www.sei.cmu.edu/reports/09tn018.pdf (last accessed March 4, 2018).
9. *A Method of Trust Case Templates to Support Standards Conformity Achievement and Assessment*, available at: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.163.906&rep=rep1&type=pdf (last accessed March 4, 2018).
10. Illiashenko, O., Potii, O. and Komin D. (2015), "Advanced security assurance case based on ISO/IEC 15408", Conference: *DepCoS - RELCOMEX 2015, At Brunow Palace*, Vol.: Theory and Engineering of Complex Systems and Dependability, Proc. of the Tenth Int. Conf. on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, Brunów, Poland, pp 391-401.
11. Illiashenko, O., Broshevan, Ye. and Kharchenko, V. (2016), "Cybersecurity Case for FPGA-Based NPP Instrumentation and Control Systems", Paper No. ICONE24-60440, pp. V005T15A027, *24th International Conference on Nuclear Engineering*, Vol. 5: Student Paper Competition; Charlotte, North Carolina, USA, **doi: 10.1115/ICONE24-60440**.
12. Babeshko, E. (2008), "Applying F(I)MEA technique for SCADA-based industrial control systems dependabilty assessment and ensuring", *Proc. of Int. Conf. on Dependability of Computer Systems DepCoS-Relcomex 2008*, Academic Press, 5.
13. Tempus SEREIN. Modernization of postgraduate studies on security and resilience for human and industry related domains, available at: http://serein.eu.org/ (last accessed March 4, 2018).


Надійшла (received) 7.03.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 25.04.2018

**Геп-аналіз оцінювання кібербезпеки за допомогою кейсів запевнення: техніка та приклад використання**

О. О. Ілляшенко, В. С. Харченко, А. Кор

**Предметом** вивчення в статті є процеси оцінювання кібербезпеки інформаційно-керуючих систем (ІКС). **Метою** є розробка техніки аналізу розрив процесу проведенні аналізу кібербезпеки. **Завдання:** розробити метод аналізу розривів у процесі оцінювання нефункціональних вимог до функціональної та кібербезпеки ІКС, заснований на класифікації вимог з урахуванням можливості їх декомпозиції, який включає в себе побудову поліпшеного кейса запевнення інформаційної безпеки і визначення контрзаходів щодо усунення виявлених розривів. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: отримав подальшого розвитку метод забезпечення інформаційної безпеки цифрових компонентів ІКС шляхом проведення аналізу невідповідностей вимог з використанням процедур опису вразливостей і оцінки критичності наслідків вторгнень, а також визначення множини контрзаходів за критерієм «безпека-вартість», що дозволяє зменшити ризики до прийнятного рівня.

**Ключові слова:** Покращений Кейс Запевнення Інформаційної Безпеки (ПКЗІБ); аналіз розривів; кібербезпека; оцінювання; вимога; відповідність.

**Геп-анализ оценки кибербезопасности с помощью кейсов заверения: техника и пример использования**

О. А. Ильяшенко, В. С. Харченко, А. Кор

**Предметом** изучения в статье являются процессы оценивания кибербезопасности информационно-управляющих систем (ИУС). **Целью** является разработка техники анализа разрывов процесса анализа кибербезопасности. **Задачи:** разработать метод анализа разрывов в процессе оценивания нефункциональных требований к функциональной и кибербезопасности ИУС, основанный на классификации требований с учетом возможности их декомпозиции, который включает в себя построение улучшенного кейса заверения информационной безопасности и определение контрмер по устранению выявленных разрывов. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: получил дальнейшее развитие метод обеспечения информационной безопасности цифровых компонентов ИУС путем проведения анализа разрывов требований с использованием процедур описания уязвимостей и оценки критичности последствий вторжений, а также определения множества контрмер по критерию «безопасность-стоимость», что позволяет уменьшить риски до приемлемого уровня.

**Ключевые слова:** Улучшенный Кейс Заверения Информационной Безопасности (УКЗИБ); анализ разрывов; кибербезопасность; оценивание; требование; соответствие.

UDC 004.658.2 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.13**

V. Pevnev, S. Kapchynskyi

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

# DATABASE SECURITY: THREATS AND PREVENTIVE MEASURES

The **subject matter** of the article is the variety of different threats and vulnerabilities which can occur while developing, managing and maintaining different databases and database management systems. The **goal** is to analyze the described threats and provide the most appropriate solutions. The **tasks** to be solved are: analyze the variety of different threats and vulnerabilities and select the most common and problematic ones, propose the most appropriate preventive measures or solutions for each of items selected. Ensuring database security is very critical for the organizations. As the complexity of the databases increases, we may tent to have more complex security issues of database.

**Keywords:** security; threats; risks; preventive measures; database; database management systems.

## Introduction

In recent years, security incidents, including sensitive data leakage, has been seen more frequently. Much of this sensitive data is processed and maintained using the help of database management systems (DBMS). Considering that, for the different organizations, their data security is crucial, it is essential to take different actions and use various practices in order to protect the data present in the database. Secure databases are the ones who's been ready to take appropriate measures in case of possible database attacks. There are variety of security models required to maintain stored data in integrity [1][2]. They may be different in many aspects as they are targeted on prevention of the different problems in database security. Also, they can differ because the definition of database security is not strict, which leads to many various issues for engineers, who seek for creation of the secure infrastructure for sensitive data storage.

Database is a collection of data that is stored somewhere on the physical machine [3]. Any user, who is authorized to communicate with database can perform different read-write on the data stored within. Databases could not manage themselves, as they are responsible only for the data storage. Systems, which are created especially for database management and maintenance are called database management systems (DBMS).

DBMS interacts with authorized users, other applications and database itself to capture and analyze the data. It is responsible for restructuring the data for better performance and to lower the storage consumption.

DBMS can be accessed in parallel way and it should handle all the requests correctly and without any issues. Also, it can be responsible for storing snapshots for the databases using the "backup and restore" functionality.

Now a day's the databases are required to store any type of data needed, because they are much more efficient in terms of processing speed. Also, the costs for database maintenance is more than affordable for any kind of business. Modern databases could handle the bulk operations with millions of data items in a second [4]. For example, there is no need to manually write and calculate the warehouse re-stock report, because hand held barcode scanners can be used to write information directly into the database.

When the database is used in offline mode only, with only one concurrent connection at max, then there is no need perform any actions to ensure database security.

But in cases, when the database communicates with many different concurrent connections and external applications, the next question arises: "Is data secured using the database?". Security in today's world is one of the most important and challenging tasks that people are facing all over the world in any aspects of their lives.

With passage of time, the databases become much more complex to maintain.

Without up-to-date documentation, database engineer will hardly keep up with all places, where the sensitive data is contained.

Database security is the use of a wide range of data security controls to protect databases against any attacks (internal or external), against compromises of database confidentiality, integrity and availability.

The **goal** of this article is to perform analysis for different existing vulnerabilities related to databases and to propose appropriate counter measures for them.

## Database Threats

Modern databases are subjects to breach using various attack, aimed to receive unauthorized access or to corrupt the date integrity or availability. Before we start describing the preventive measures of different attacks and vulnerabilities, there is necessary to describe some of the risks related to them, and, if there are an ability to, provide examples of the consequences.

**Excessive privileges.** When users (or applications) are granted database access privileges that exceed the requirements of their job function, these privileges may be abused for malicious purpose. For example, a university administrator whose job requires only the ability to change student contact information may take advantage of excessive database update privileges to change grades. A given database user ends up with excessive privileges for the simple

reason that database administrators do not have the time to define and update granular access privilege control mechanisms for each user. As a result, all users or large groups of users are granted generic default access privileges that far exceed specific job requirements [5].

**Countermeasures.** Do not grant access privileges that far exceed specific job requirements for the user. Implement good audit trails, so database administrators could handle with privilege abuses in timely manner.

**Example.** According to a survey from security firm BeyondTrust, which focuses on privilege management issues, more than 47 percent of the 728 survey participants said users in their organizations have elevated privileges not necessary for their roles.

Twenty percent reported that more than three-quarters of their user base run as administrators. In addition, 33 percent said their organizations had no policies for privileged password management [5].

**Input injections.** Input injections is a code injection technique, used to attack data-driven applications, in which nefarious database query statements are inserted into an entry field for execution (e.g. to dump the database contents to the attacker).

**Countermeasures.** Validate input data received from the user. Do not blindly use the input data provided.

This may be achieved by adding an additional interpretation level into the application, which will handle the database query construction.

Use parametrized statements if it's possible.

Use Data Access Control policies to manage the database user privileges (e.g. deny any modification requests for the certain resource).

**Example.** On October 1, 2012, a hacker group called "Team GhostShell" published the personal records of students, faculty, employees, and alumni from 53 universities including Harvard, Princeton, Stanford, Cornell, Johns Hopkins, and the University of Zurich on pastebin.com. The hackers claimed that they were trying to "raise awareness towards the changes made in today's education", bemoaning changing education laws in Europe and increases in tuition in the United States [6]. In October 2015, an SQL injection attack was used to steal the personal details of 156,959 customers from British telecommunications company TalkTalk's servers, exploiting a vulnerability in a legacy web portal [7].

**Malware.** Cybercriminals, state-sponsored hackers, and spies use advanced attacks that blend multiple tactics – such as spear phishing emails and malware – to penetrate organizations and steal sensitive data. Unaware that malware has infected their device; legitimate users become a conduit for these groups to access your networks and sensitive data.

**Countermeasures.** Do not install any additional software without formal verification (antimalware tools, sandboxes, etc.) or services onto your database server. Provide an explicit and well-documented software installation policy for your organization members.

**Weak audit trail.** Automated recording of all sensitive and/or unusual data base transactions should be the part of the foundation underlying any database deployment. Weak database audit policy represents a serious organizational risk on many levels.

**Counteremeasures.** Configure your DBMS to generate log for desired security events. Use third-party network-audit tools.

**Backup exposure.** Backup database storage media is often completely unprotected from attack. As a result, several high-profile security breaches have involved theft of database backup tapes and hard disks [8].

**Countermeasures.** All database backups should be encrypted. In fact, some vendors have suggested that future DBMS products may not support the creation of unencrypted backups.

Encryption of on-line production database information is often suggested, but performance and cryptographic key management drawbacks often make this impractical and are generally acknowledged to be a poor substitute for granular privilege controls described above [7].

**Weak authentication.** Weak authentication schemes allow attackers to assume the identity of legitimate database users by stealing or otherwise obtaining login credentials. An attacker may employ any number of strategies to obtain credentials.

**Countermeasures.** Use strong authentication: two-factor mobile authentication, certificates, biometrics. In cases where additional authentication options are unavailable, enforce strong username/password policies (minimum length, character diversity, obscurity, etc.).

**Example.** Millions of accounts associated with video-sharing site Dailymotion, one of the biggest video platforms in the world, have been stolen. A hacker extracted 85.2 million unique email addresses and usernames from the company's systems, but about one-in-five accounts — roughly 18.3 million– had associated passwords, which were scrambled with the bcrypt hashing function, making the passwords difficult to crack. The hack is believed to have been carried out on Oct. 20 by a hacker, whose identity isn't known, according to LeakedSource, a breach notification service, which obtained the data [9].

**DB vulnerabilities & misconfiguration.** It is common to find vulnerable and un-patched databases or discover databases that still have default accounts and configuration parameters. Attackers know how to exploit these vulnerabilities to launch attacks against your organization.

**Countermeasures.** Do not use default credentials/accounts for the database communication. Integrate your database server authentication system with organization's domain system.

**Example.** MacKeeper Security Researcher Chris Vickery contacted DataBreaches.net to report that he had discovered yet another misconfigured MongoDB database. This one, 132 GB in size, appeared to contain voter registration data from 93,424,710 Mexican citizens [10].

**Denial of service.** Denial of Service is a general attack category in which access to network applications or data is denied to intend to user.

**Countermeasures.** Harden the TCP/IP stack by applying the appropriate registry settings to increase the size of the TCP connection queue, decrease the connection establishment period, and employ dynamic backlog mechanisms to ensure that the connection queue is never exhausted.

Use a network Intrusion Detection System (IDS) because these can automatically detect and respond to SYN attacks.

**Example.** On March 26, 2015, a very well-coordinated distributed denial of service (DDoS) attack was waged on GitHub, the heir apparent to the now-closing Google Code. GitHub characterized this as the largest DDoS in its history. The Electronic Frontier Foundation (EEF) and security researchers Netresec name the Chinese government as the culprits of the attack, which lasted until March 31, 2015 [12].

**Loss of outdated storage devices.** Because of rapid growth of computing power, different storage devices (hard disk drives, solid state drives and other data storage hardware) become outdated every 5-7 years and so they are replaced with new ones. Usage of embedded data destruction tool does not guarantee the inability to restore the data.

**Countermeasures.** Always perform full recycling of outdated storage devices with respect to the rules and standards of this process.

**Limited security expertise & education.** Non-technical security is also play an important role. Internal security controls are not keeping pace with data growth and many organizations are ill-equipped to deal with a security breach. Often this is due to the lack of expertise required to implement security controls, enforce policies, or conduct incident response processes.

**Countermeasures.** Hire or cultivate an experienced security professional.

## Summary

Databases are the core part for any modern information system. It is crucial to create environment, which will protect the data and the database itself. With the passage of time it becomes harder and harder to achieve this goal.

With the rapid growth of data production and consumption lead to an increase of data breaches and uncovered vulnerabilities [13].

This article aims to popularize the idea of data security as well as to provide a cumulative set of rules and actions which can decrease the risks related to data confidentiality, integrity and availability violations. Also, it covers different types of vulnerabilities which can occur while working with modern databases and database management systems.

As it follows from a brief review of the list of presented vulnerabilities, it's not hard to declare that the most crucial point of database security is the personnel which is responsible for managing and developing the database. This work had covered some of vulnerabilities related to databases and described the counter measures for them.

Usage of described recommendations will help to avoid the impact of the threats listed while developing, managing and using the databases. The threats described are not covering all the opportunities of potential violators.

In particular, various insider threats that occupy a sufficiently large niche in the list of threats to the database.

## References


1. Common Criteria DBMS Working Group Technical Community (2015), *Base Protection Profile for Database Management Systems (DBMS PP) V 2.07, BSI-CC-PP-0088*, available at: https://www.commoncriteriaportal.org/files/ppfiles/pp0088b_pdf.pdf (last accessed January 29, 2018).
2. Database Security Consortium Security Guideline WG (2009), *Database Security Guideline V 2.0*, available at: http://www.db-security.org/report/dbsc_guideline_ver2.0_e.pdf (last accessed January 29, 2018).
3. Mubina Malik and Trisha Patel (2016), *Database Security – Attacks And Control Methods*, International Journal of Information Sciences and Techniques (IJST) Volume 6, No. 1 (2), Department of Computer Science & Applications, Kurukshetra University, Kurukshetra, available at: https://www.ijser.org/researchpaper/Database-Security--Attacks-and-Techniques.pdf (last accessed January 29, 2018).
4. Eugene Philipov (2016), "Comparing multiple rows insert vs single row insert with three data load methods", available at: https://www.red-gate.com/simple-talk/sql/performance/comparing-multiple-rows-insert-vs-single-row-insert-with-three-data-load-methods/ (last accessed January 29, 2018).
5. Andras Cser, Stephanie Balaouras, Laura Koetzle, Merritt Maxim, Salvatore Schiano, and Peggy Dostie (2016), *The Forresetr Wave: Privileged Identity Management*, Forrester Research, Inc., Cambridge. available at: https://www.beyondtrust.com/wp-content/uploads/forrester-wave-for-privilege-identity-management-2016.pdf?1467996373 (last accessed January 29, 2018).
6. Nicole Perloth (2012), "Hackers Breach 53 Universities and Dump Thousands of Personal Records Online", New York Times, New York, available at: https://bits.blogs.nytimes.com/2012/10/03/hackers-breach-53-universities-dump-thousands-of-personal-records-online/ (last accessed January 29, 2018).
7. ICO (2016), "TalkTalk gets record £400,000 fine for failing to prevent October 2015 attack", Information Commissioner's Office, Wilmslow, available at: https://ico.org.uk/about-the-ico/news-and-events/news-and-blogs/2016/10/talktalk-gets-record-400-000-fine-for-failing-to-prevent-october-2015-attack/ (last accessed January 29, 2018).
8. Amichai Shulman (2008), "Top Ten Database Security Threats: How to Migitate The Most Significant Database Vulnerabilities", available at: http://schell.com/Top_Ten_Database_Threats.pdf (last accessed January 29, 2018).

9. Dean Alvarez (2016), "Dailymotion loses 85 million users` details in data breach – Industry Reaction", available at: http://www.itsecurityguru.org/2016/12/06/dailymotion-loses-85-million-users-details-data-breach-industry-reaction/ (last accessed January 29, 2018).
10. Chris Vickery (2016), "Massive Breach of Mexican Voter Data", available at: https://mackeeper.com/blog/post/217-breaking-massive-data-breach-of-mexican-voter-data (last accessed January 29, 2018).
11. Mazhar Farooqui (2016), "Data of 34 million Keralites leaked in massive breach", available at: http://gulfnews.com/xpress/news/data-of-34-million-keralites-leaked-in-massive-breach-1.1930317 (last accessed January 29, 2018).
12. James Sanders, "Chinese government linked the largest DDoS attack in GitHub history", https://www.techrepublic.com/article/chinese-government-linked-to-largest-ddos-attack-in-github-history/ (last accessed January 29, 2018).
13. Michelle Leech (2017), "Data breach statistics 2017: First half results are", available at: https://blog.gemalto.com/security/2017/09/21/new-breach-level-index-findings-for-first-half-of-2017/ (last accessed January 29, 2018).

Надійшла (received) 24.02.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 11.04.2018

**Безпека баз даних:**
**загрози та превентивні заходи**

В.Я. Пєвнєв, С.Д. Капчинський

Є велика кількість різноманітних загроз та вразливостей, які можуть виникнути під час розробки, управління та підтримки різних баз даних та систем управління базами даних. **Метою** статті є проведення поглибленого аналізу описаних загроз та визначення найбільш оптимальних заходів для їх усунення. **Завдання:** провести поглиблений аналіз різноманітних загроз і вразливостей та вибрати найбільш розповсюджені та найпроблематичніші з них, проаналізувати та запропонувати оптимальніші з превентивних заходів або рішень для кожної з переглянутих загроз. Серед **проаналізованих загроз** були обрані: надмірні привілеї (excessive privileges), вхідні ін'єкції (input injections), зловмисне програмне забезпечення (malware), слабкий аудиторський слід (weak audit trail), недостатній рівень безпеки резервних копій (backup exposure), слабка аутентифікація (weak authentication), внутрішні вразливості баз даних та неправильна конфігурація (DB vulnerabilities & misconfiguration), некеровані конфіденційні дані (unmanaged sensitive data), відмова в обслуговуванні (denial of service), втрата списаних носіїв інформації (loss of outdated storage devices), низький рівень експертизи з безпеки та низький рівень освіти працівників (limited security expertise & education). Для кожної з перерахованих загроз проаналізовані та визначені оптимальні заходи для їх усунення. **Висновки.** Бази даних є основною частиною будь-якої сучасної інформаційної системи. Дуже важливо створити середовище, яке зможе захистити дані та саму базу даних. З часом стає важче досягти цієї мети. Швидке зростання створення та споживання даних призводить до збільшення порушення даних та виявлення нових вразливостей. Дана стаття націлена на популяризацію ідеї безпеки баз даних а також пропонує чіткий набір правил та дій, спрямованих на зниження ризиків, пов'язаних з конфіденційністю, цілісністю та доступністю даних. Як випливає з огляду переліку представлених вразливостей, не важко замітити, що найважливішим пунктом безпеки баз даних є персонал, який відповідає за управління та розробку бази даних.

**Ключові слова**. безпека; загрози; ризики; превентивні заходи; система управління базами даних.

**Безопасность баз данных:**
**угрозы и превентивные меры**

В.Я. Певнев, С.Д. Капчинский

Есть большое количество угроз и уязвимостей, которые могут возникнуть при разработке, управления и поддержки различных баз данных и систем управления базами данных. **Целью статьи** является проведение углубленного анализа описанных угроз и определение наиболее оптимальных мер для их устранения. **Задача:** провести углубленный анализ угроз и уязвимостей и выбрать наиболее распространенные и самый проблематичные из них, проанализировать и предложить оптимальные из превентивных мер или решений для каждой из просмотренных угроз. Среди **проанализированных угроз** были выбраны: чрезмерные привилегии (excessive privileges), входящие инъекции (input injections), вредоносное программное обеспечение (malware), слабый аудиторский след (weak audit trail), недостаточный уровень безопасности резервных копий (backup exposure), слабая аутентификация (weak authentication), внутренние уязвимости баз данных и неправильная конфигурация (DB vulnerabilities & misconfiguration), неуправляемые конфиденциальные данные (unmanaged sensitive data), отказ в обслуживании (denial of service), потеря списанных носителей информации (loss of outdated storage devices), низкий уровень экспертизы безопасности и низкий уровень образования работников (limited security expertise & education). Для каждой из перечисленных угроз проанализированы и определены оптимальные меры для их устранения. **Выводы**. Базы данных является основной частью любой современной информационной системы. Очень важно создать среду, которая сможет защитить данные и саму базу данных. Со временем становится труднее достичь этой цели. Быстрый рост создания и потребления данных приводит к увеличению нарушений данных и выявлению новых уязвимостей. Данная статья нацелена на популяризацию идеи безопасности баз данных и предлагает четкий набор правил и действий, направленных на снижение рисков, связанных с конфиденциальностью, целостностью и доступностью данных. Как следует из обзора перечня представленных уязвимостей, нетрудно заметить, что важнейшим пунктом безопасности баз данных является персонал, отвечающий за управление и разработку базы данных.

**Ключевые слова:** безопасность; угрозы; риски; превентивные меры; система управления базами данных.

УДК 004.415:621.39:510.589 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.14**

С. Г. Семенов, О. В. Ліпчанська, М. В. Ліпчанський

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

# УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ДЕКОДУВАННЯ МУЛЬТИМЕДІА ДАНИХ, ЗАКОДОВАНИХ АЛГОРИТМОМ ШОКРОЛАХІ

**Предметом вивчення** в статті є процеси передавання даних в системах критичного застосування. **Метою** є розробка вдосконаленого алгоритму декодування мультимедіа даних, закодованих завадостійким фонтанним кодом Шокролахі. **Задачі**: підвищити достовірність і оперативність декодування мультимедіа даних, переданих по бездротових каналах зв'язку, розглянути існуючі алгоритми кодування і декодування Шокролахі для передачі мультимедіа даних по каналах зі стиранням, адаптувати існуючий код до підвищених вимог оперативності та достовірності шляхом удосконалення процедури декодування відеоінформації, провести порівняльний аналіз ефективності роботи запропонованої процедури по відношенню до існуючої стандартної процедур . **Використаними методами** є: фонтанний код Шокролахі, метод Гауса, алгоритм поширення довіри, LT код. Отримані наступні результати: сформульовано задачу підвищення достовірності і оперативності декодування мультимедіа даних, удосконалено процедуру декодування мультимедіа даних, закодованих фонтанним кодом Шокролахі, показана ефективність роботи даної процедури у порівнянні з існуючим алгоритмом декодування. **Висновки**: наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: ми вдосконалили стандартну процедуру декодування Шокролахі шляхом організації можливості продовжувати декодування при виникненні збою з моменту збою, не повертаючись до початку першого етапу. Виграш у часі становить від 1,3 до 1,7 разів в залежності від розміру переданих символів і кількості символів в кодованих блоках. Отриманий результат є важливим в силу того, що час є однією з основних характеристик показників якості при передаванні даних.

**Ключові слова**: фонтанні коди; декодування мультимедіа даних; системи критичного застосування; оперативність і достовірність передачі даних.

## Вступ

На сьогоднішній день в Україні задача забезпечення захисту інфраструктури критичного застосування від різних видів загроз і їх комбінацій є актуальною і важливою [1 – 5]. Одним з найбільш важливих об'єктів критичної інфраструктури України є залізничний транспорт. У нормативних документах, що відносяться до управління залізничним транспортом [6, 7], зафіксовано, що основними принципами забезпечення безпеки є вдосконалення системи управління безпекою руху поїздів шляхом впровадження сучасних комп'ютерних інформаційних технологій і засобів. Одним з таких шляхів є використання систем відео контролю на найбільш важливих ділянках руху залізничного транспорту із надсиланням відеоданих на засоби відображення у кабіні машиніста. Розглянутий тип даних вимагає передачі із заданою якістю забезпечення послуг. При цьому однією з основних характеристик якості послуг, що надаються при передачі мультимедійних даних є достовірність і оперативність.

**Актуальність.** Аналіз літературних джерел [8 – 10] показав, що в даний час питання підвищення оперативності і достовірності передачі мультимедійних даних залишаються актуальними та їм приділяється багато уваги фахівців. Так в роботах [11, 12] вирішення завдання якісної передачі відеоінформації пов'язують із використанням фонтанних кодів. Це дозволяє відправляти дані по каналах зв'язку з низькими якісними характеристиками і відновлювати інформаційні пакети у разі втрати частини з них. Це дає можливість не покладатися на знання рівня втрати пакетів. Проведені дослідження [11 – 14] показали, що в умовах використання переважно методів і засобів бездротового зв'язку для забезпечення якості передачі мультимедійної інформації, найбільш ефективним є фонтанний код Шокролахі, в першу чергу це пов'язано з можливістю його практичної реалізації, відносно невеликого часу кодування, а також його здатності відновити пакет цілком у разі його втрати.

Однак в умовах постійного зростання швидкостей рухомого складу залізничного транспорту, динамічної зміни навколо транспортної обстановки, а також наявності об'єктивно існуючих факторів зниження вірогідності передачі мультимедіа даних дуже важливим завданням залишається адаптація існуючих кодів до підвищених вимог оперативності та достовірності.

Тому актуальним завданням є удосконалення існуючих методів і алгоритмів кодування Шокролахі та їх адаптація до підвищених вимог оперативності і достовірності при передачі мультимедійної інформації.

## Виклад основного матеріалу

**1. Опис стандартних процедур кодування та декодування кодом Шокролахі.**

Принцип коду Шокролахі полягає в кодуванні по одному блоку вихідних символів, розмір кожного вихідного символу $l$ лежить в межах від 1 до 1024 байт. Різні блоки вихідних символів можуть складатися з різної кількості $K$ вихідних символів [15].

Кодування інформації кодом Шокролахі проводиться в два етапи.

На першому етапі процесу кодування відбувається отримання попереднього зовнішнього коду $A$ – попереднього коду, який представляє собою двійкову матрицю, що складається із породжувальної матриці з низькою щільністю перевірки на парність

($G_{LDPC}$), яка породжує матриці з високою щільністю перевірки на парність ($G_{Half}$) і матриці LT ($G_{LT}$).

Попередній код $[A]_{L\times L}$ виконує дві функції. Матриці $A$, $G_{LDPC}$ і $G_{Half}$ гарантують, що кожен вихідний символ кодується, щонайменше, один раз, і це дозволяє декодеру відновити кожен вихідний символ. Попередній код $[A]_{L\times L}$ містить перші $K$ рядків породжувальної матриці $[G_{LT}]_{N\times L}$, що означає, що перші $K$ вихідних символів $LT$–кодера відповідають $K$ вихідним символам.

В першу чергу кодер кодує $K$ вихідних символи $S[j],\ \ j=0,...,K-1$ в $L$ проміжних символи $C[i],\ \ i=0,...,L-1$, використовуючи попередній код $A$. Символи $C[i]$, згенеровані $G_{LDPC}$ і $G_{Half}$, називаються надлишковими символами і обчислюються за виразом (1).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} C[0] \\ \vdots \\ C[L-1] \end{bmatrix}}_{[C]_{L\times 1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} [G_{LDPC}]_{S\times K} & I_{S\times S} & Z_{S\times H} \\ [G_{Half}]_{H\times(K+S)} & I_{H\times H} & \\ & [G_{LT}]_{K\times L} & \end{bmatrix}^{-1}}_{[A]_{L\times L}} \bullet \underbrace{\begin{bmatrix} Z_{S\times 1} \\ Z_{H\times 1} \\ S[0] \\ \vdots \\ S[k-1] \end{bmatrix}}_{[S_R]_{L\times 1}}, \quad (1)$$

де $S$ – кількість LDPC символів, $H$ – кількість Half символів, $L$ – кількість проміжних символів, $L=K+S+H$.

На другому етапі кодування відбувається отримання внутрішнього коду Лабі. При цьому застосовується кодувальник LT коду, який використовує проміжні символи для генерації $N$ закодованих символів $E[i],\ \ i=0,...,N-1,\ \ N\geq K$, відповідно до виразу (2).

$$\underbrace{\begin{bmatrix} E[0] \\ \vdots \\ E[N-1] \end{bmatrix}}_{[E]_{N\times 1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N1} & \cdots & g_{NL} \end{bmatrix}}_{[G_{LT}]_{N\times L}} \bullet \underbrace{\begin{bmatrix} C[0] \\ \vdots \\ C[L-1] \end{bmatrix}}_{[C]_{L\times 1}}, \quad (2)$$

де $N$ – кількість закодованих символів і $N=K(1+\varepsilon)$, $\varepsilon$ – надмірність кодування в процентах.

Кожному закодованому символу присвоюється власний ідентифікатор.

Підматриця $[G_{LT}]_{K\times L}$ з матриці $A$ включається в якості перших $K$ рядків $[G_{LT}]_{N\times L}$, що призводить до того, що перші $K$ закодованих символів відповідають $K$ вихідним символам, тобто $E[i]=S[i],\ \text{для}\ i=0,...,K-1$.

Процес декодування також виконується в два етапи [15]. На першому етапі для відновлення проміжних символів $C[j],\ \ j=0,...,L-1$ необхідно отримати попередній код $[A]_{M\times L}$, використовуючи $N'$ отриманих закодованих символів ($N'\geq K$), де $M$ – кількість рядків в попередньому коді $A$, $M=S+H+N'$, як показано у виразі (3). Перші $S+H$ рядків в попередньому коді $[A]_{M\times L}$ відповідають рядкам в матриці $A$ з виразу (1). Для $N'$ прийнятих закодованих символів генерується підматриця $[G_{LT}]_{N'\times L}$ із використанням значень ідентифікаторів закодованих символів. Рядки в підматриці $[G_{LT}]_{N\times L}$, відповідні втраченим закодованим символам, виключені з підматриці $[G_{LT}]_{N'\times L}$.

$$\underbrace{\begin{bmatrix} [G_{LDPC}]_{S\times K} & I_{S\times S} & Z_{S\times H} \\ [G_{Half}]_{H\times(K+S)} & I_{H\times H} & \\ & [G_{LT}]_{N'\times L} & \end{bmatrix}}_{[A]_{M\times L}} \bullet \underbrace{\begin{bmatrix} C[0] \\ \vdots \\ C[L-1] \end{bmatrix}}_{[C]_{L\times 1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} Z_{S\times 1} \\ Z_{H\times 1} \\ E'[0] \\ \vdots \\ E'[N'-1] \end{bmatrix}}_{[D]_{M\times 1}}, \quad (3)$$

де $D$ містить отримані закодовані символи для $i=0,...,S+H-1$ і нульові символи для $i=S+H,...,M$.

На другому етапі процесу декодування після отримання проміжних символів відбувається відновлення $K$ вихідних символів $S[j]$ для $j=0,...,K-1$, з використанням породжувальної матриці $LT$ розміром $K\times L$:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} S[0] \\ \vdots \\ S[K-1] \end{bmatrix}}_{[S]_{K\times 1}} = \underbrace{\begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{N1} & \cdots & g_{NL} \end{bmatrix}}_{[G_{LT}]_{K\times L}} \bullet \underbrace{\begin{bmatrix} C[0] \\ \vdots \\ C[L-1] \end{bmatrix}}_{[C]_{L\times 1}} \quad (4)$$

Декодування вихідних символів відбувається безпосередньо із відповідних прийнятих закодованих символів з власним ідентифікатором закодованого символу. Декодування відсутніх вихідних символів відбувається із відновлених проміжних символів $C$ відповідно до виразу (4). Щоб отримати $C$ із формули (3), стандартний алгоритм декодування передбачає, що підматриця $[A]_{M\times L}$ має повний ранг стовпця [13, 14].

Слід зазначити, що всі вихідні символи не можуть бути відновлені, навіть якщо ($N'\geq K$). За умови, що ($N'<K$), декодер також не може декодувати всі проміжні і вихідні символи, він відновлює вихідні символи із відповідних прийнятих закодованих символів з відповідним ідентифікатором.

Алгоритм стандартного процесу декодування коду Шокролахі, описаний в [15], використовує метод Гауса і алгоритм поширення довіри для перетворення матриці $A$ в одиничну матрицю розміром $L \times L$ після відкидання останніх рядків $M - L$, так як ефективність обчислень методом Гауса залежить від розрідженості матриці $A$, то для підтримки її розрідженості використовується алгоритм поширення довіри. Процес перетворення матриці $A$ в одиничну матрицю складається з чотирьох етапів, рис. 1 – 4 [15].

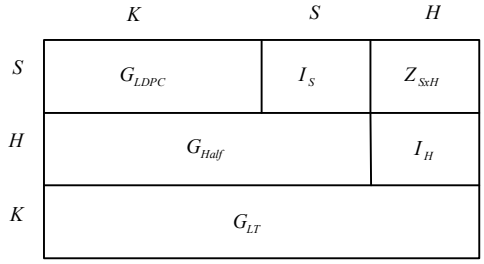



**Рис 1.** Матриця $A$

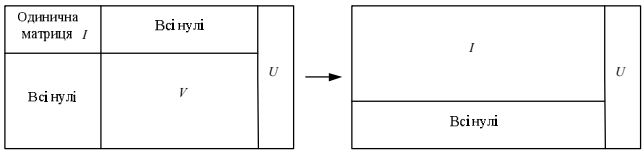



**Рис 2.** Підматриця матриці $A$.
Перший етап перетворення в одиничну матрицю $I$

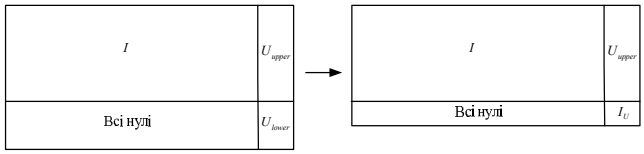



**Рис 3.** Другий етап перетворення матриці $A$
в одиничну матрицю $I$

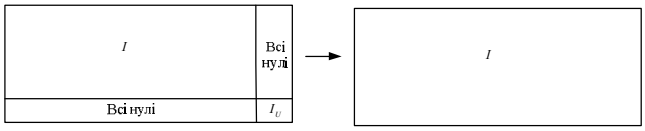



**Рис. 4.** Третій і четвертий етапи перетворення матриці $A$
в одиничну матрицю $I$

На першому етапі матриця $A$ перетворюється в три підматриці: $I$, нульову підматрицю та $U$. На початку першої фази $V = A$, де $V$ – проміжна матриця, а підматриці $I$ та $U$ є нульовими матрицями. При кожній ітерації вибирається рядок із матриці $V$ з мінімальним ненульовим ступенем $r$. Потім обраний рядок обмінюється місцями із першим рядком в матриці $V$. Всі стовпчики $V$ переставляються так, щоб перший і останній $r-1$ елементи першого рядка були одиницями. Потім над рештою рядків, в першому стовпці яких є одиниці, проводиться операція «XOR» з першим рядком, в результаті чого стовпці стають нульовими.

При цьому ранг підматриці $I$ збільшується на одиницю, а число стовпців в матриці $U$ збільшується на $r-1$. Цей процес повторюється доти, поки сума стовпців $I$ і $U$ не стане дорівнювати $L$. Перший етап може припинитися через виникнення збою, якщо в $V$ не залишається жодного ненульового рядка до моменту виродження $V$, тобто сума стовпців $I$ та $U$ буде менше за $L$, а елементи у всіх рядках $V$ дорівнювати нулю.

На другому етапі підматриця $U$ розбивається на $U_{upper}$ і $U_{lower}$, при цьому $U_{upper}$ складається із перших $i$ рядків, $U_{lower}$ містить останні рядки $M - i$. Якщо ранг $U_{lower}$ менше ніж $u$, виникає збій, другий етап процесу декодування припиняється. В іншому випадку $U_{lower}$ трансформується в одиничну матрицю із рангом $u$, а останні $M - L$ рядки з $[A]_{M \times L}$ відкидаються.

На третьому етапі процесу декодування на основі матриці $I_U$ генерується матриця $U'$.

На четвертому етапі для обнуління матриці $U_{upper}$ використовується матриця $U'$, та відбувається повне перетворення матриці $A$ в одиничну матрицю розміром $L \times L$.

Успішне завершення процесу декодування залежить від процесу перетворення матриці $A$ в одиничну матрицю розміром $L \times L$. Проміжні символи $C$ можуть бути декодовані на основі операцій з рядками й обміні рядків та стовпців.

На рис. 5 наведено приклад застосування алгоритму поширення довіри і методу Гауса для трансформації матриці $A$ в одиничну матрицю.

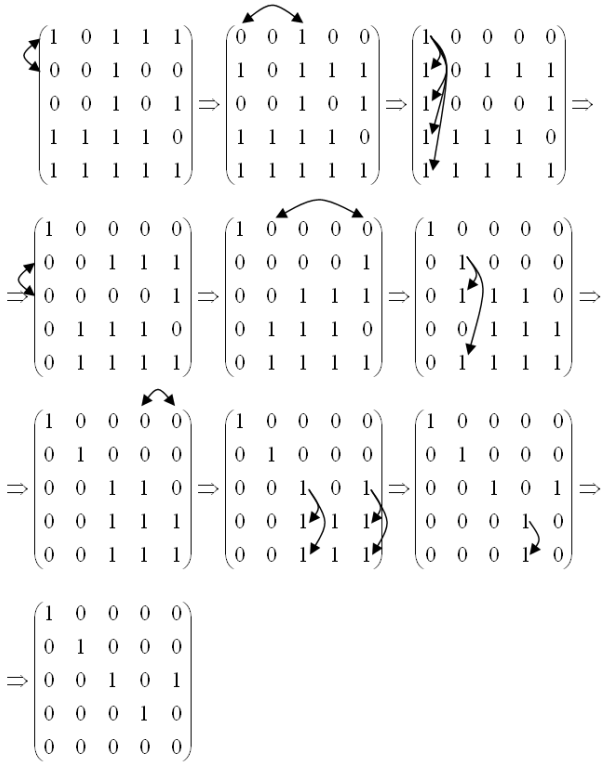


**Рис. 5.** Приклад використання алгоритму поширення довіри і методу Гауса для трансформації матриці $A$

Стрілочками позначається обмін стовпців та строк. При застосуванні алгоритму поширення довіри і методу Гауса індекси стовпців, які беруть участь в перестановці, зберігаються. На останній

матриці видно, що при декодуванні на другому етапі виник збій, оскільки ранг $U_{lower}$, де $U_{lower}$ є останнім рядком підматриці $U$ в цьому прикладі, дорівнює 0, що менше числа стовпців в $U$ ($u = 1$).

**2. Удосконалений алгоритм для прискореного декодування коду Шокролахі.**

Удосконалений алгоритм дозволяє значно скоротити час обчислень на першому і другому етапах декодування, в порівнянні з алгоритмом, що описано в [15]. Удосконалений алгоритм включає в себе процедуру відтворення декодування з моменту виникнення збою на першому або другому етапах.

Стандартний процес декодування [15] може припинитися через збій, що виникає на першому етапі, якщо в підматриці $V$ всі рядки стали нульовими до того, як підматриця $V$ виродилася, і на другому етапі, якщо ранг матриці $U_{lower}$ менше ніж $u$. Якщо процес декодування припиняється через збій на перших двох етапах, декодеру необхідно отримати достатньо нових закодованих символів, щоб запустити декодування з початку.

При використанні процедури відтворення декодування з моменту виникнення збою зберігаються індекси стовпців, які беруть участь в перестановках, що відбуваються при застосуванні методу Гауса для перетворення $U_{lower}$ в одиничну матрицю з рангом $u$. Коли $i$-й та $i'$-й стовпці матриці $A$ обмінюються місцями, відбувається запис пари їх індексів. Якщо декодування припиняється через збій на першому або другому етапах, то $n$ додатково отриманих закодованих символів додаються в $D$ у виразі (3), а $n$ нових рядків породжувальної матриці $[G_{LT}]_{n\times L}$ додаються в нижню частину матриці $A$.

По останній матриці на рисунку 5 видно, що виник збій при декодуванні. Відповідно запропонованого алгоритму стовпці, засновані на записаних індексах для підматриці $[G_{LT}]_{n\times L}$, повинні обмінятися місцями. Після цього між кожним рядком оновленої підматриці $[G_{LT}]_{n\times L}$ і кожним рядком одиничної підматриці $I$ в матриці $A$ проводиться операція «XOR». За рахунок даної процедури досягаються результати, аналогічні результатам при застосуванні алгоритму поширення довіри та методу Гауса, але декодування не переривається та не починає працювати з самого початку, а декодувальний процес продовжується. Далі застосовуються метод Гауса та алгоритм поширення довіри, які трансформують оновлену матрицю $A$ в одиничну матрицю, починаючи з моменту виникнення збою в процесі декодування.

Через те, що при декодуванні виник збій, до матриці додається новий рядок на основі значення ідентифікатора закодованого символу. Згідно алгоритму нової запропонованої процедури стовпці нового доданого рядка обмінюються місцями на основі індексів записаних стовпців, наведених на рисунку 5. Після цього проходить операція «XOR» з рядками одиничної матриці $I$ та отриманим новим рядком, щоб виключити одиницю з нового рядка від 0 до ($i-1$)). В результаті даних операцій отримаємо остаточну одиничну матрицю.

У коді Шокролахі ймовірність збою $P_e(\cdot)$ при декодуванні вихідного блоку, тобто ймовірність того, що щонайменше один вихідний символ у вихідному блоці не відновиться, може бути обчислена [16] виразом (5).

$$P_e((K)) = \begin{cases} 1, & if\ \varepsilon(K) < 0; \\ 0.85 \times 0.567^{\varepsilon(K)}, & if\ \varepsilon(K) \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Середнє число додаткових (надлишкових) даних $\overline{R}_\varepsilon(K)$, необхідних для успішного декодування після кожного виникнення збою обчислюється за формулою (6) [16]:

$$\overline{R}_\varepsilon(K) = \frac{1}{K}\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot (P_e(i-1) - P_e(i)) =$$

$$= \frac{0.85}{K}\sum_{i=0}^{\infty} i \cdot (0.567^{i-1} - 0.567^{i}) = \quad (6)$$

$$= \frac{0.85}{(1-0.567)K} \approx \frac{2}{K}.$$

Як видно із (6), середня кількість додаткових закодованих символів, необхідних для вихідного блоку з розміром $K$, $K \times 2 / K = 2$, тобто не залежить від $K$. З цієї причини, коли $N' \geq K$ і процес декодування припиняється через виникнення збою, запропонований алгоритм продовжує декодування після прийому $n = 2$ додаткових закодованих символів.

У розглянутому алгоритмі коду Шокролахі [15] процес декодування не може розпочатися до тих пір, поки не будуть отримані як мінімум $N'$ закодованих символів ($N' \geq K$). У запропонованому алгоритмі відтворення декодування з моменту виникнення збою декодування починається при $N' < K$, при цьому декодер продовжує отримувати додаткові закодовані символи до тих пір, поки $N' \geq K$. Дана процедура значно скорочує час процесу декодування вихідних символів.

**3. Експериментальні результати.**

У статті наведені результати обчислень часу декодування коду Шокролахі, досягнуті запропонованим та стандартним алгоритмами.

Запропонований удосконалений алгоритм декодування відрізняється від стандартного алгоритму процедурою першого і другого етапів. Ця відмінність дає виграш у часі, який у стандартному алгоритмі витрачається на операції декодування проміжних символів.

Виконання першого та другого етапів займають більше 90% від загального часу декодування, тому вкрай важливо мати можливість не розпочинати декодування з початку першого етапу при виникненні збою, щоб скоротити загальний час обчислень при декодуванні коду Шокролахі.

На рис. 6 – 7 наведено час, витрачений на декодування коду Шокролахі при використанні стандартного алгоритму декодування [15] і запропонованої процедури відтворення декодування з моменту виникнення збою за умови, що збій декодування коду Шокролахі відбувається на першому етапі процесу перетворення матриці $A$ .

На рис. 6 приведена продуктивність алгоритмів за умови, що розмір вихідних символів $l$ фіксований і дорівнює 256 байтів, а кількість вихідних символів $K$ змінюється до 2000. На рис. 7 приведена продуктивність алгоритмів при фіксованій кількості вихідних символів 1024 на блок, та змінному розмірі символів.

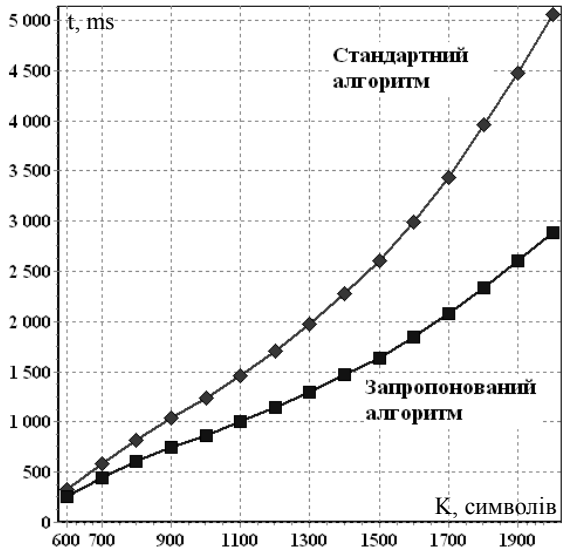



**Рис. 6.** Час декодування зі збоєм на першому етапі стандартним і запропонованим алгоритмами при розмірі символу 256 байт

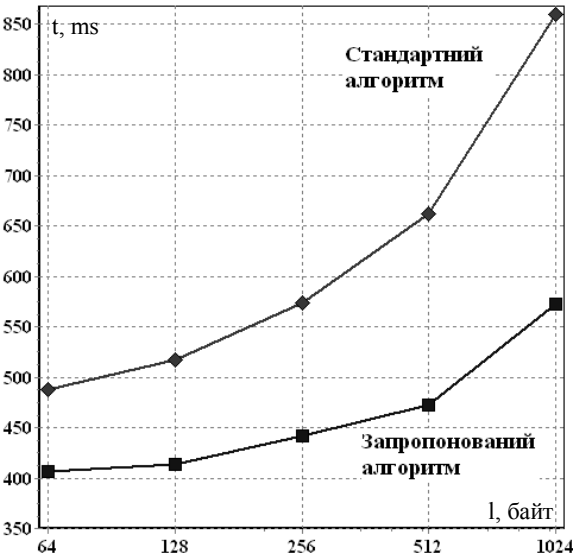



**Рис. 7.** Час декодування зі збоєм на першому етапі стандартним і запропонованим алгоритмами при кількості символів у блоці 1024

При використанні запропонованої процедури відтворення декодування з моменту виникнення збою досягається виграш у часі декодування в 1,3 – 1,7 разів, в порівнянні із застосуванням стандартного алгоритму. Це пов'язано з тим, що пропонована процедура продовжує декодування після прийому додаткових символів без перезапуску з першого етапу.

На рис. 8 – 9 наведено час, витрачений на декодування коду Шокролахі при виникненні збою на другому етапі. При застосуванні стандартного алгоритму, коли процес декодування завершується виникненням збою на другому етапі, обидва етапи, перший і другий, повторюються спочатку.

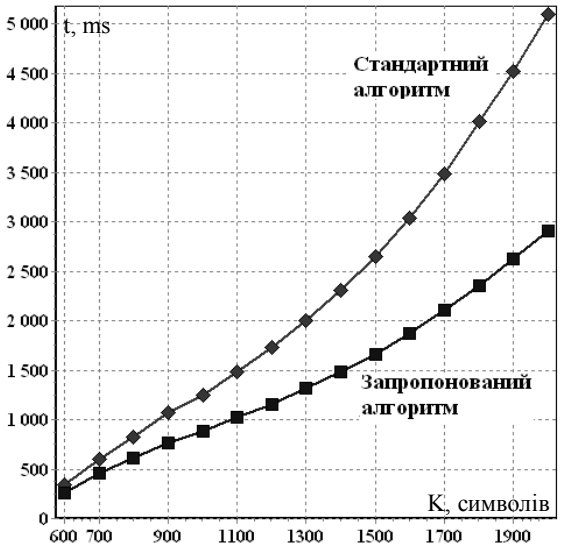



**Рис. 8.** Час декодування зі збоєм на другому етапі при розмірі символу 256 байт

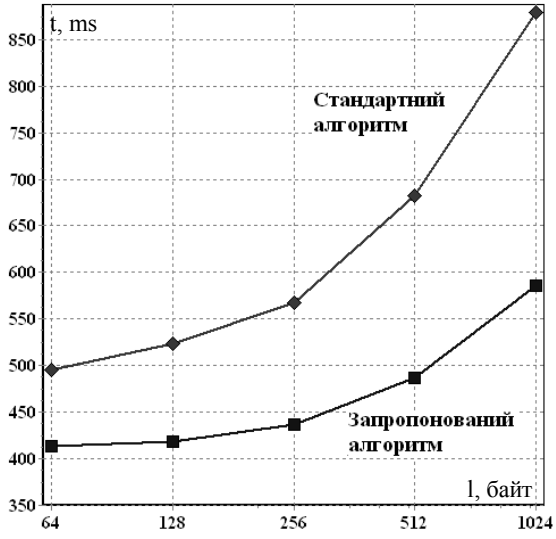



**Рис. 9.** Час декодування зі збоєм на другому етапі при кількості символів у блоці 1024

## Висновки

В даній статті запропоновано використання вдосконаленої процедури декодування мультимедіа даних, закодованих одним із завадостійких фонтанних кодів – кодом Шокролахі. Застосування даної процедури дає можливість підвищити достовірність та оперативність передачі мультимедіа даних. Удосконалення процесу декодування полягає в тому, що

при виникненні збою декодування продовжує свою роботу з моменту виникнення збою, не повертаючись до початку першого етапу, як це відбувається при роботі стандартного алгоритму Шокролахі. Застосування даної процедури дозволяє отримати виграш у часі декодування мультимедійної інформації від 1,3 до 1,7 разів в залежності від кількості переданих символів у блоках інформації і розміру переданих символів у відповідних блоках. У статті наведено результати порівняльного аналізу роботи запропонованого алгоритму і стандартного алгоритму декодування, які доводять ефективність застосування удосконаленого підходу при передачі мультимедіа даних для підвищення таких характеристик якості обслуговування, як достовірність і оперативність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ


1. Eur-lex: green paper on a european programme for critical infrastructure protection [Електронний ресурс]. – Brussels, 2005. – Режим доступу: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2005/com2005_0576en01.pdf.
2. Eur-lex: communication from the Commission of 12 December 2006 on a European Programme for Critical Infrastructure Protection [Електронний ресурс]. – Brussels, 2006. – Режим доступу: http://eur-lex.europa.eu/ LexUriServ/site/en/com/2006/com2006_0786en01.pdf.
3. European Commission: a Communication on Protecting Europe's Critical Energy and Transport Infrastructure [Електронний ресурс]. – Brussels, 2007. – Режим доступу: http://register.consilium.europa.eu/doc/srv?l=EN&f =ST%206315%202007%20EXT%201%20REV%201.
4. Eur-lex: council directive 2008/114/EC of 8 December on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection [Електронний ресурс]. – Brussels, 2008. – Режим доступу: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:345:0075:0082:EN:PDF.
5. Зелена книга з питань захисту критичної інфраструктури в Україні / Д. С. Бірюков, С. І. Кондратов, О. І. Насвіт, О. М. Суходоля. – Київ : Національний інститут стратегічних досліджень, 2015. –30 с.
6. Верховна Рада України: наказ про затвердження Положення про систему управління безпекою руху поїздів у Державній адміністрації залізничного транспорту України [Електронний ресурс] / Міністерство Інфраструктури України, 2011. – Режим доступу до наказу: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0729-11.
7. Верховна Рада України: постанова про затвердження Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки [Електронний ресурс] / Кабінет Міністрів України, 2009.– Режим доступу до постанови: http://zakon3.rada.gov.ua /laws/show/1390-2009-%D0%BF.
8. Васильєв В. М. Аналіз методів передачі відеоінформації в комп'ютерних мережах / В. М. Васильєв, Ю. В. Гугель, І. П. Гуров // Науково-технічний вісник інформаційних технологій, механіки і оптики. – 2002. – С. 14-26.
9. Tirletti T. Videoconferencing on the internet / T. Tirletti, C. Huitema // IEEE/ACM Trans. Netw. Vol. 4. – 1996. – P. 340-351.
10. Wu D. Transporting real-time video over the internet: challenges and approaches / D. Wu, Y. T. Hou, Y. Zhang // IEEE proc. V. 88. – 2000. – P. 1855-1875.
11. Why Digital Fountain's Raptor Technology Is Better Than Reed-Solomon Erasure Codes For Streaming Applications // Digital Fountain. – 2010. – P. 6-8.
12. Toit J. A Practical Implementation of Fountain Codes over WiMAX Networks with an Optimized Probabilistic Degree Distribution / J. Toit, R. Wolhuter // The Sixth International Conference on Systems and Networks Communications. – 2011. – P. 32-37.
13. Shokrollahi A. Raptor codes / A. Shokrollahi // Transactions on information theory. – 2006. – P. 2551-2567.
14. Shokrollahi A. Raptor codes – foundations and trends in communications and information theory / A. Shokrollahi, M. Luby // Foundations and Trends in Comm. and Inf. Theory. – 2011. – P. 213-322.
15. 3GPP. 3GPP TS 26346 V741: Technical Spec Group Serv and Sys Aspects; Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and Codecs. 3GPP TechnicalSpec. – 2007. – P. 156-161.
16. Application layer forward error correction for mobile multimedia broadcasting / T. Stockhammer, A. Shokrollahi, M. Watso, M. Luby, T. Gasiba // Handbook of Mobile Broadcasting. – 2008. – P. 239-280.


REFERENCES


1. Eur-lex : green paper on a european programme for critical infrastructure protection (2005), Brussels, available at: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2005/com2005_0576en01.pdf (last accessed January 29, 2018).
2. Eur-lex : communication from the Commission of 12 December 2006 on a European Programme for Critical Infrastructure Protection (2006),. Brussels, available at: http://eur-lex.europa.eu/ LexUriServ/site/en/com/2006/com2006_0786en01.pdf (last accessed January 29, 2018).
3. European Commission : a Communication on Protecting Europe's Critical Energy and Transport Infrastructure (2007),.Brussels, available at: http://register.consilium.europa.eu/doc/srv?l=EN&f =ST%206315%202007%20EXT%201%20REV%201 (last accessed January 29, 2018).
4. Eur-lex : council directive 2008/114/EC of 8 December on the identification and designation of European critical infrastructures and the assessment of the need to improve their protection (2008), Brussels, available at: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:345:0075:0082:EN:PDF (last accessed January 29, 2018).
5. Biryukov, D.S., Kondratov, S.I., Nasvit, O.I. and Sukhodolya, O.M. (2015), *Green Paper on the Protection of Critical Infrastructure in Ukraine*, National Institute for Strategic Studies, Kyiv, 30 p.
6. Verkhovna Rada of Ukraine: an order to approve the Regulation on the system of safety management of trains in the State Administration of Railway Transport of Ukraine, available at: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0729-11 (last accessed January 29, 2018).

7. Verkhovna Rada of Ukraine: Resolution on Approval of the State Target Program for the Reform of Rail Transport for 2010-2019, available at: http://zakon3.rada.gov.ua /laws/show/1390-2009-%D0%BF (last accessed January 29, 2018).
8. Vasiliev, V.M., Gugel, Yu.V. and Gurov, IP (2002), "Analysis of methods for the transmission of video information in computer networks", *Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics*, pp. 14-26.
9. Tirletti, T. and Huitema C. (1996), "Videoconferencing on the internet", *IEEE/ACM Trans. Netw*, Vol. 4, pp. 340-351.
10. Wu, D., Hou, Y.T. and Zhang, Y. (2000), "Transporting real-time video over the internet: challenges and approaches", *IEEE Proc*, Vol. 88, pp. 1855-1875.
11. Why Digital Fountain's Raptor Technology Is Better Than Reed-Solomon Erasure Codes For Streaming Applications (2008), *Digital Fountain*, pp. 6-8.
12. Toit, J. and Wolhuter, R. (2011), "A Practical Implementation of Fountain Codes over WiMAX Networks with an Optimized Probabilistic Degree Distribution", *The 6th International Conference on Systems and Networks Communications*, pp. 32-37.
13. Shokrollahi, A. (2006), "Raptor codes", *Transactions on information theory*, pp. 2551-2567.
14. Shokrollahi, A. and Luby M. (20011), "Raptor codes – foundations and trends in communications and information theory", *Foundations and Trends in Comm. and Inf. Theory*, pp. 213-322.
15. 3GPP. 3GPP TS 26346 V741: Technical Spec Group Serv and Sys Aspects; Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and Codecs (2007), *3GPP TechnicalSpec*, pp. 156-161.
16. Stockhammer, T., Shokrollahi, A., Watso, M., Luby, M. and Gasiba T. (2008), "Application layer forward error correction for mobile multimedia broadcasting", *Handbook of Mobile Broadcasting*, pp. 239-280.

Надійшла (received) 28.02.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 18.04.2018

**Усовершенствование процесса декодирования мультимедиа данных, закодированных алгоритмом Шокролахи**

С. Г. Семенов, О. В. Липчанская, М. В. Липчанский

Предметом изучения в статье являются процессы передачи данных в системах критического применения. Целью является разработка усовершенствованного алгоритма декодирования мультимедиа данных, закодированных помехоустойчивым фонтанным кодом Шокролахи. Задачи: повысить достоверность и оперативность декодирования мультимедиа данных, передаваемых по беспроводным каналам связи, рассмотреть существующие алгоритмы кодирования и декодирования Шокролахи для передачи мультимедиа данных по каналам со стираниями, адаптировать существующий код к повышенным требованиям оперативности и достоверности путем усовершенствования процедуры декодирования видеоинформации, провести сравнительный анализ эффективности работы предложенной процедуры по отношению к существующей стандартной процедуре. Используемыми методами являются: помехоустойчивый фонтанный код Шокролахи, метод Гаусса, алгоритм распространения доверия, LT код. Получены следующие результаты: сформулирована задача повышения достоверности и оперативности декодирования мультимедиа данных, усовершенствована процедура декодирования мультимедиа данных, закодированных фонтанным кодом Шокролахи, на примере сравнительного анализа показана эффективность работы данной процедуры по сравнению с существующим алгоритмом декодирования. Выводы: научная новизна полученных результатов состоит в следующем: усовершенствована стандартная процедура декодирования Шокролахи путем организации возможности продолжать декодирование при возникновении сбоя с момента сбоя, не возвращаясь к началу первого этапа. Выигрыш во времени составляет от 1,3 до 1,7 раз в зависимости от размера передаваемых символов и количества символов в кодируемых блоках. Полученный результат является важным в силу того, что время является одной из основных характеристик показателей качества передачи данных.

**Ключевые слова:** фонтанные коды, коды Шокролахи, декодирование мультимедиа данных, системы критического применения, оперативность и достоверность передачи данных.

**Improvement of the decoding process for multimedia data encoded by the Shokrollachi algorithm**

S. Semenov, O. Lipchanska, M. Lipchanskyi

The subject of the study in the article are the processes of data transmission in mission-critical systems. The goal is to develop an improved algorithm for decoding multimedia data encoded with a fountain code of Shokrolahi. The tasks to be solve are to increase the reliability and efficiency of decoding multimedia data transmitted over wireless communication channels, to consider the existing algorithms for Shockollachi encoding and decoding for transferring multimedia data through channels with erasures, to adapt the existing code to increased demands for efficiency and reliability by improving the procedure for decoding video information, to perform a comparative analysis effectiveness of the proposed procedure in relation to the existing standard procedures . The methods used are: error correction and detection fountain code of Shokrolahi, Gauss method, confidence distribution algorithm, LT code. The following results were obtained: the task of increasing the reliability and efficiency of decoding multimedia data was formulated, the procedure for decoding multimedia data encoded with the Shokrolakhi fountain code was improved. The efficiency of the procedure compared with the existing decoding algorithm is shown using the example of a comparative analysis. Conclusions: the scientific novelty of the results obtained is as follows: the standard procedure for decoding Shockollachi has been improved by organizing the possibility of continuing decoding in case of a failure from the moment of failure, without returning to the beginning of the first stage. The time gain is 1.3 to 1.7 times, depending on the size of the transmitted symbols and the number of symbols in the coded blocks. The obtained result is important because time is one of the main characteristics of data transmission quality parameters.

**Keywords**: fountain codes, Shockollachi codes, decoding of multimedia data, mission-critical systems, efficiency and reliability of data transmission.

# Applied problems of information systems operation

UDC 621.391 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.15**

R. Zhyvotovskyi, S. Petruk

Central research Institute of weapons and military equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## METHOD OF SIGNAL PROCESSING IN MIMO SYSTEMS OF UNMANNED AVIATION COMPLEXES

Noise immunity of receiving signals in the MIMO (Multiple Input Multiple-Output) system essentially depends on the choice of the signal processing method on the receiving side. Existing methods of signal processing, in the MIMO system, that provide a given quality of information transmission, have high computational complexity, so there is a necessity to improve these methods. The purpose of this article is to increase the impedance of channels of control and data transmission of unmanned aerial systems, which was achieved by developing new method of signal processing in multi-antenna systems of unmanned aerial systems. The article developed an improved method of signal processing in MIMO systems of unmanned aerial systems, the essence of which is the ability to work with a known and unknown correlation matrix, the division of received signals into groups and the evaluation of each group, taking into account the evaluation error. During the research, the theory of communication, signal theory, the theory of antennas and the theory of noise-proof coding were used. The difference between an improved method is, that the method allows you to work with an unknown correlation matrix. While processing a signal in a demodulator, each iteration takes into account not only the estimate obtained in the previous step, but also the degree of accuracy of the character estimation. The proposed improved method has characteristics, that are close to the characteristics of demodulator, optimal for the criterion of maximum likelihood, but much less computational complexity. The method allows you to reduce computing costs by 20 times, compared with the maximum likelihood algorithm. The practical implementation of this method will allow the creation of software for communication equipment of unmanned aeronautical complexes, which operate in difficult conditions of the radio electronic environment.

**Keywords:** signal-interfering environment; information transfer speed; bit error probability; spatial-temporal processing4 MIMO system; parallel channels.

## Introduction

One of the technologies, that significantly improves bandwidth and noise immunity of unmanned aerial vehicle (UAV) channels is MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) technology, which allows to more efficient use of transmitter power and the strugglet against fading signals [1-9]. Improved efficiency was achieved through the using of space time coding (STC) techniques, that provide the transmission and reception of parallel streams of information. An analysis of the using and prospects of the UAV development carried out in [10-18] shows, that promising UAV should provide information transmission in a complex radioelectronic environment.

So, **purpose of the article** is the development of an advanced signal processing method in MIMO systems of unmanned aerial systems.

## Presentation of main material research

An analysis of known STC systems [19-25] shows, that increasing the spectral efficiency of the MIMO system is usually due to the complication of the STC demodulator and the reduction of system impedance. Therefore, an important task is to choose a method of processing signals on the receiving side, which provides given quality of information transmission and was characterized by moderate computational complexity.

Let's conduct a comparative analysis of signal processing methods in the MIMO system with STC in terms of their efficiency and computational complexity.

Transmitted signals after the influence of the relay fading and white gaussian noise (WGN) in the radio channel, arrive at the $V$ receiving tracks. Samples of complex inlets at the output of the receivers in one interval can be described by the vector-matrix equation [19-25]:

$$\mathbf{Z} = \mathbf{HA} + \mathbf{B}, \quad (1)$$

where $\mathbf{Z}$ is the vector, each component of which $z_i$, $i = \overline{1,V}$, is a countdown of a comprehensive bypass on $i$-th demodulator input of STC; $\mathbf{A}$ is the vector, each component of which $a_j$, $j = \overline{1,S}$ is a transmitted complex informational symbol, belonging to a plurality $\{a^{(1)}, \ldots, a^{(K)}\}$, $K$ is the multiplicity of quadrature amplitude modulation (Quadrature Amplitude Modulation, QAM); $\mathbf{H}$ is the matrix, each element of which $h_{ij}$ is a complex transmission coefficient of the propagation path of the signal, that is emitted $j$-th antenna and accepted by $i$-th antenna; $\mathbf{B}$ is the vector, each component of which $b_i$ is a countdown of complex gaussian noise on $i$-th demodulator input STC, which has zero avaeage and variance $2\sigma^2$.

On the transmission side, information symbols $a_i$ split into blocks with $W$ characters were appropriately processed and radiated through S transmitting antennas for a given number of time intervals $K_{\text{given}}$. The spatial-temporal code can be presented, as a generating matrix, in which the rows correspond to the transmit antennas, and the columns are time intervals for character transfer:

$$\begin{vmatrix} s_{11} & s_{12} & \ldots & s_{1K_{\text{given}}} \\ s_{21} & s_{22} & \ldots & s_{2K_{\text{given}}} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ s_{M_t 1} & s_{M_t 2} & \ldots & s_{M_t K_{\text{given}}} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

where $s_{jk}$, $j = \overline{1,S}$, $k = \overline{1,K_{\text{given}}}$ is a function from complex information symbols $a_i$, $i$ = 1, 2, ..., which was radiated by $j$-th antenna on $k$-th time interval. Symbolic speed of the MIMO system is defined as the ratio of the length of the information symbol block $W$ to the amount of time, that necessary to transmit this block of time intervals $K_{\text{given}}$: $R_{\text{STC}} = W/K_{\text{given}}$. The higher the symbolic speed of $R_{\text{STC}}$ spatial-temporal code, the higher efficiency of the using of frequency resources of the channel. Spatial-time codes are divided into two classes: orthogonal and non-orthogonal. Among the orthogonal codes, it is necessary to allocate the code of alamouti, whose generating matrix has the form [19-25]:

$$G = \begin{vmatrix} a_1 & -a_2' \\ a_2 & a_1' \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Symbolic alamouti speed code is $R_{\text{STC}}$ = 1. In the matrix (3), the rows are orthogonal to each other, the same is true for its columns. Due to this property on the receiving side it becomes possible to calculate the estimates by the method of maximum probability (MP) of the transferred symbols using the algorithm of weighting the received signals. The energy gain from using the alamoit scheme with two transmitting and one receiving antennas, compared to the usual SISO system is equal to 7 dB for the probability of mistaken acceptance $P_{\text{error}} = 10^{-2}$ by using four-position phase manipulation (QPSK, Quadrature Phase Shift Keying).

Unfortunately, for systems with more, than two transmitting antennas, while using QAM There are no orthogonal codes at speed $R_{\text{STC}}$ = 1. While switching to more transmitting antennas, for example, 3 and 4, the symbolic speed of the corresponding orthogonal codes does not exceed 3/4. Symbol speed of the codes for five or more transmitting antennas does not exceed 1/2.

Increasing the bandwidth of data channels is possible using non-orthogonal spatial-temporal codes. The symbolic speed for non-orthogonal coding may reach a value, that corresponde to the number of transmit antennas $S$, if $K_{\text{given}}$ time intervals can be transferred to a block with $W = K_{\text{given}}S$ informational symbols. This condition satisfies the code V-BLAST (Vertical Bell Labs Layered Space Time) [19-25]. Another example of a non-orthogonal code is the double code of alamouti.

Fig. 1 shows the characteristics of the MIMO system in the processing of signals by the maximum likelihood method for systems with 8 transmitting and 8 receiving antennas, using the code V-BLAST and the alamoit dual code for QPSK modulation. To demodulate the code V-BLAST at a symbolic rate of 4 is required signal/noise ratio $h^2$ on 5 dB higher (when $P_{\text{error}} = 10^{-3}$), than to demodulate the double code of alamouti with a symbolic rate 2. Increasing the spectral efficiency in the MIMO system, by using spatial-temporal code with a higher symbolic speed for a given number of transmitting and receiving antennas leads to a decrease in the energy efficiency of the system.

The filtration process STC is reduced to the solution of the equation (1), to the unknown $a$, because there is a random component in gaussian noise in the equation **B**, traditional methods for solving linear equations do not provide the necessary accuracy. Different methods can be used to calculate estimates of transmitted symbols: the method of zeroing (ZF is Zero Forcing), method of minimizing the mean square deviation (MMSD), the method of the sequential exclusion of the demodulated component (SIC is Successive Interference Cancellation), maximum likelihood method (ML) and the spherical decoding method (SD) etc [19-25].

Estimates of transmitted symbols by the ZF method are calculated as:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}'\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{Y}. \quad (4)$$

The expression for computing the estimation of MMSD has the form:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = (\mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma^2\mathbf{I})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{Y}. \quad (5)$$

The MMSD method allows to reduce noise and higher noise immunity compared to ZF. Computational complexity of both methods is proportional to $S^3$.

Comparative analysis of the signal processing methods in the MIMO system is shown in fig. 2, where the simulation results are presented using the program *MatCad 14*. The simulation were fulfilled the following conditions:

1) impulse characteristic of the channel is known on the receiving side;

2) the duration of all impulse characteristics are the same and equal to 4;

3) processing of $10^6$ symbols was carried out by blocks of 50 characters.

In fig. 2 is a graph of estimation of noise immunity of accepted sequence of symbols for MMSD, SIC, MP and ZF algorithms. According to the results of the simulation, we can conclude, that the algorithm MP is the most harmful.

Significantly better characteristics, than the ZF and MMSD methods, have an SIC algorithm, which reduces to the sequential exclusion of demodulated components from the received signal.

On each iteration of this algorithm by the MMSD method, a rigorous evaluation of one of the components transmitted by $i$-th antenna, the replica of which is subtracted from the received signal.

The SIC method has a significant drawback - the effect of "multiplying errors". The number of arithmetic operations in this method is proportional to the $S^4$.

The best practice among known demodulation methods is the MP method. Evaluation of information symbols by the MP method is carried out by checking all combinations of the vector $\boldsymbol{\theta}$ from the set of possible values of the QAM symbol vector $\Theta = \left\{\theta^{(1)},...,\theta^{\left(K_{given}^{S}\right)}\right\}$:

$$\hat{\theta} = \underset{\theta}{arg\,min}\left\|\mathbf{Y} - \mathbf{H}\theta\right\|^2. \quad (6)$$

The computational complexity of this algorithm exponentially increases as the number of transmitting antennas increases $S$ and proportional to the value $K_{\text{given}}^{S}$.

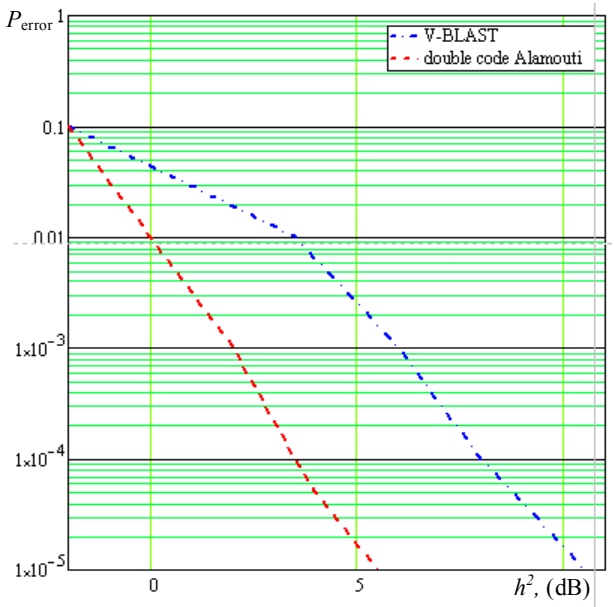



**Fig. 1.** Dependence of the probability of false reception from the signal/noise ratio for the double code of Alamouti and V-BLAST

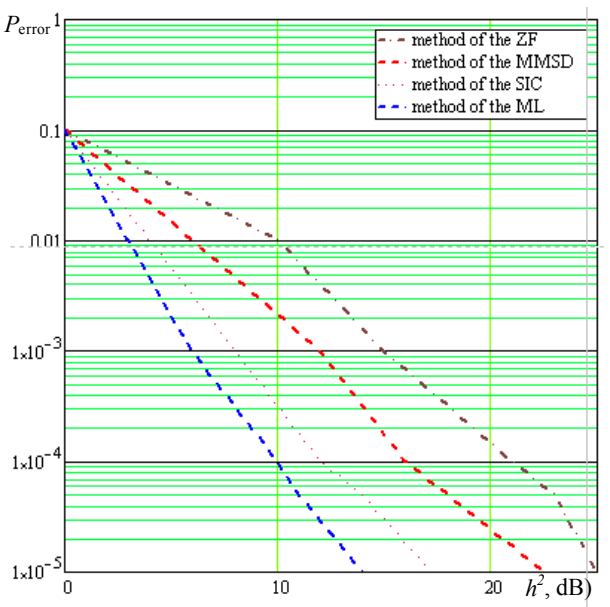



**Fig. 2** Results of MIMO 8x8 system simulation, for ZF, MMSD, SIC and MP algorithms

Implement this real-time algorithm for the V-BLAST system, for example, with $S = 8$ and using of the modulation QAM-16, quite problematic. In this case, an interval must be performed on the interval of the duration of one information symbol $16^4 = 65536$ symbol combinations.

In a spherical decoder, unlike the MP algorithm, the reduced combination of combinations is limited by a certain subset of combinations $\Theta^d \in \Theta$ [23]. Within a subset $\Theta^d$ hamming's distance from each of the combinations to some initial evaluation of the vector $\theta$ does not exceed the value $d$ is the radius of the " search sphere ". Demodulation quality $\theta$ depends on the radius $d$. The greater the radius, the higher the reliability of the estimate, calculated by this method. However, with an increase $d$, increases the size of the subset of the vectors $\Theta^d$, which is checked, and the computational complexity of the SD algorithm. The disadvantage of this algorithm is the random computational complexity, which depends on the signal/noise ratio. With a low average computational complexity of the SD algorithm, its maximum value may coincide with the computational complexity of the MP algorithm. This fact complicates the hardware implementation of SD, since the restriction of computational complexity in hardware causes degradation of the characteristics of the algorithm. Fig. 2 and in tabl. 1 shows the characteristics of the above-described processing methods for the V-BLAST system with 8 transmitting and 8 receiving antennas, during modulation of the QAM-16.

*Table 1.* **Noise immunity and computational complexity of different signal processing methods**

| Method of processing | Signal/noise ratio $h^2$ (dB), when $P_{error} = 10^{-5}$ | Computational complexity |
|---|---|---|
| ZF | 25 | $S^3$ |
| MMSD | 22,5 | $S^3$ |
| SIC | 17,2 | $S^4$ |
| MP | 14 | $K^S_{given}$ |
| SD | 14 | depends on the signal/noise ratio |

Impedance of the MIMO system using the SD method coincides with the characteristics of the MP method with an unlimited number of steps. Obtained dependence of the error probability on the signal/noise ratio $h^2$ shows, that known algorithms with acceptable computational complexity are considerably inferior to the characteristics of the impedance of the MP algorithm.

Thus, the best noise immunity among the known methods of signal processing in the MIMO system is the method of maximum likelihood. The best-known characteristics of the known methods of signal processing has the maximum likelihood method [21-23]. But the computational complexity of this method exponentially increases as the number of transmitting antennas increases and is proportional to the value $K^S_{given}$. In [23], it describes the iterative quasi-optimal method of signal processing in the MIMO system. In this algorithm, user signals were divided into groups, then the initial values of information symbol estimates were established and replicas were generated for each group of signals. After deduction of the replica of the input signal, statistics are generated for demodulation. The processing of each group of signals is carried out using an optimal algorithm. Estimates of information symbols are determined by several iterations. In [20], the characteristics of signal processing for seven iterations for various variants of BLAST systems were analyzed. The complexity of this method is much smaller compared to the maximum

likelihood method, when the characteristics of this algorithm significantly exceed the characteristics of V-BLAST, but there is a significant difference from the characteristics of the maximum likelihood algorithm. The noise immunity of this method can be greatly improved by taking into account the degree of accuracy of estimates on intermediate iterations with a known or unknown correlation matrix.

The scheme of realization of the proposed method is shown in fig. 3.

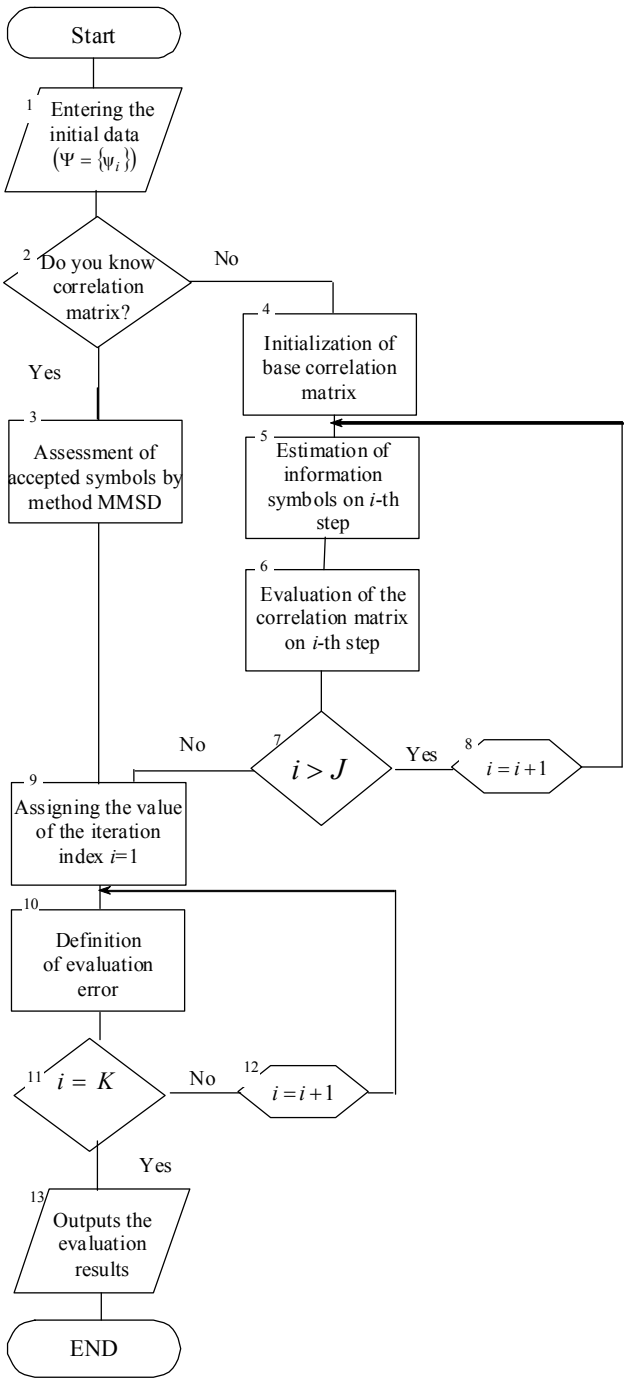



**Fig. 3**. Scheme of implementation of the signal processing method in the MIMO system

Output data (fig. 3, block 1) are parameters of system MIMO and channel $\Psi = \{\psi_i\}$, $i = \overline{1,6}$, where $\psi_1 \ldots \psi_6$ is the number of transmitting and receiving antennas, the number of iterations, the dimension of the ensemble of signals, the duration of the frame at the output of the demodulator, $\mathbf{H}$ is a channel matrix. Signals on the receiving side can be divided into two groups and equation (4) can be written in block form:

$$\begin{vmatrix}\mathbf{Z}_1\\ \mathbf{Z}_2\end{vmatrix} = \begin{vmatrix}\mathbf{H}_{11} & \mathbf{H}_{12}\\ \mathbf{H}_{21} & \mathbf{H}_{22}\end{vmatrix}\begin{vmatrix}\mathbf{A}_1\\ \mathbf{A}_2\end{vmatrix} + \begin{vmatrix}\mathbf{B}_1\\ \mathbf{B}_2\end{vmatrix}, \quad (7)$$

which is equivalent to

$$\begin{cases}\mathbf{Z}_1=\mathbf{H}_{11}\mathbf{A}_1+\mathbf{H}_{12}\mathbf{A}_2+\mathbf{B}_1;\\ \mathbf{Z}_2=\mathbf{H}_{21}\mathbf{A}_1+\mathbf{H}_{22}\mathbf{A}_2+\mathbf{B}_2.\end{cases} \quad (8)$$

Consider the case, when the correlation matrix is known. Then, at the initial stage, the estimation of the transmitted symbols is calculated by the method of the minimum of the avarage square error (block 3) [21]:

$$\hat{\mathbf{R}}^{(0)} = (\mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma^2\mathbf{1})^{-1}\mathbf{H}'\mathbf{Z}, \quad (9)$$

where sign ' means the operation of the ermitian connection.

The precision of the initial estimation of vector $\mathbf{A}$ is determined by the correlation matrix of evaluation errors (block 10)

$$\mathbf{R}^{(0)} = 2\sigma^2(\mathbf{H}'\mathbf{H} + 2\sigma^2)^{-2}. \quad (10)$$

Let it be, on the $i$-th iteration is a vector estimation $\mathbf{A}_2$:

$$\hat{\mathbf{A}}_2^{(i-1)} = \mathbf{A}_2 + \Delta_2^{(i-1)}, \quad (11)$$

where $\Delta_2^{(i-1)}$ is the error of estimating vector $\mathbf{A}_2$ on $i$–1-th iteration, which is gaussian random variable with a zero avarage and correlation matrix $\mathbf{R}_2^{(i-1)}$.

Given the expression (11), equation (8) can be transformed into a form:

$$\begin{cases}\mathbf{Z}_{11}^{(i)}=\mathbf{Z}_1-\mathbf{H}_{12}\mathbf{A}_2^{(i-1)}=\mathbf{H}_{11}\mathbf{A}_1+\mathbf{H}_{12}\Delta_2^{(i-1)}+\mathbf{B}_1;\\ \mathbf{Z}_{12}^{(i)}=\mathbf{Z}_2-\mathbf{H}_{22}\mathbf{A}_2^{(i-1)}=\mathbf{H}_{21}\mathbf{A}_1+\mathbf{H}_{22}\Delta_2^{(i-1)}+\mathbf{B}_2,\end{cases} \quad (12)$$

or

$$\begin{cases}\mathbf{Z}_{11}^{(i)}=\mathbf{H}_{11}\mathbf{A}_1+\chi_{11}^{(i-1)};\\ \mathbf{Z}_{12}^{(i)}=\mathbf{H}_{21}\mathbf{A}_1+\chi_{12}^{(i-1)},\end{cases} \quad (13)$$

where $\chi_{11}^{(i-1)}$ та $\chi_{12}^{(i-1)}$ is the gaussian random variables with zero avarage and correlation matrices:

$$\begin{cases}\mathbf{K}_{11}^{(i-1)}=\mathbf{H}_{12}\mathbf{R}_2^{(i-1)}\mathbf{H}'_{12}+2\sigma^2\mathbf{1};\\ \mathbf{K}_{12}^{(i-1)}=\mathbf{H}_{21}\mathbf{R}_2^{(i-1)}\mathbf{H}'_{22}+2\sigma^2\mathbf{1}.\end{cases} \quad (14)$$

In turn, the system of equations (14) can be written in the form

$$\mathbf{Z}_1^{(i)} = \mathbf{H}_1\mathbf{A}_1 + \chi_1^{(i-1)}, \quad (15)$$

where $\mathbf{Z}_1^{(i)} = \begin{vmatrix}\mathbf{Z}_{11}^{(i)}\\ \mathbf{Z}_{12}^{(i)}\end{vmatrix}$, $\mathbf{H}_1 = \begin{vmatrix}\mathbf{H}_{11}\\ \mathbf{H}_{21}\end{vmatrix}$, $\chi_1^{(i-1)} = \begin{vmatrix}\chi_{11}^{(i-1)}\\ \chi_{12}^{(i-2)}\end{vmatrix}$.

Soft score of the first group of symbols $\mathbf{A}_1$, on $i$-th iteration is calculated as:

$$\hat{\mathbf{A}}_1^{(i)} = \frac{\sum_{\mathbf{A}^{S/2}} \mathbf{A}_1 e^{-0,5\frac{\left(\mathbf{Z}_1^{(i)}-\mathbf{H}_1\mathbf{A}_1\right)'\left(\mathbf{Z}_1^{(i)}-\mathbf{H}_1\mathbf{A}_1\right)}{\mathbf{R}_1^{(i-1)}}}}{\sum_{\mathbf{A}^{S/2}} e^{-0,5\frac{\left(\mathbf{Z}_1^{(i)}-\mathbf{H}_1\mathbf{A}_1\right)'\left(\mathbf{Z}_1^{(i)}-\mathbf{H}_1\mathbf{A}_1\right)}{\mathbf{R}_1^{(i-1)}}}}, \quad (16)$$

where $\mathbf{A}^{S/2}$ is the a set of values, that can receive a vector of information symbols of the first group.

To calculate the evaluation of the symbols of the second group $\mathbf{A}_2$ at this iteration repeat operations similar to the expressions (11) – (17), taking into account the found evaluation $\hat{\mathbf{A}}_1^{(i)}$. The correlation matrix of estimation errors in this step is calculated:

$$\mathbf{R}_1^{(i)} = E\left\{\hat{\mathbf{A}}_1^{(i)}\hat{\mathbf{A}}_1^{(i)'}\right\} = -\hat{\mathbf{A}}_1^{(i)}\hat{\mathbf{A}}_1^{(i)'} + \frac{\sum_{\mathbf{A}^{S/2}} \mathbf{A}_1\mathbf{A}_1' e^{-0,5\frac{\left(\mathbf{Z}_1^{(i)}-\mathbf{H}_1\mathbf{A}_1\right)'\left(\mathbf{Z}_1^{(i)}-\mathbf{H}_1\mathbf{A}_1\right)}{\mathbf{R}_1^{(i-1)}}}}{\sum_{\mathbf{A}^{S/2}} e^{-0,5\frac{\left(\mathbf{Z}_1^{(i)}-\mathbf{H}_1\mathbf{A}_1\right)'\left(\mathbf{Z}_1^{(i)}-\mathbf{H}_1\mathbf{A}_1\right)}{\mathbf{R}_1^{(i-1)}}}}, \quad (17)$$

Found on $i$-th iteration of evaluation $\hat{\mathbf{A}}_1^{(i)}$ i $\hat{\mathbf{A}}_2^{(i)}$ (blocks 4–7) form a general estimate of the vector of the transmitted symbols:

$$\hat{\mathbf{A}}^{(i)} = \begin{vmatrix} \hat{\mathbf{A}}_1^{(i)} \\ \hat{\mathbf{A}}_2^{(i)} \end{vmatrix}. \quad (18)$$

Under an unknown correlation matrix, the following sequence of actions occurs. Initialization of the basic correlation matrix occurs $\mathbf{R}_2(0) = I_N$ and setting the counter of iterations to a zero position $i = 0$ (block 4). After which happens the evaluation of information symbols $A$ on $i$-th step by expression:

$$A_i = arg \min_{A\in\{U_{ti}\}^S} \wp\left(\mathbf{R}_2^{-1}\left\{(i-1)[\mathrm{H}-Z][\mathrm{H}-Z]^{\mathrm{H}}\right\}\right), \quad (19)$$

where $\{U_{ti}\}^S$ is the vector, that describes the alphabet of transmitting antennas, $\wp$ is the matrix trace.

After evaluation of information symbols, $A$ the estimation of the correlation matrix happens at the second step in terms of expression:

$$\mathbf{R}_2(i) = L^{-1}\left[X - H\hat{\mathbf{A}}^{(i)}\right]\left[X - H\hat{\mathbf{A}}^{(i)}\right]^H, \quad (20)$$

where $L$ is the the number of vector-columns of the matrix of space-time symbols.

After $i < J$, where $J$ is the maximum number of iterations, $i = i+1$ happens a transition to the block 4.

Unlike the well-known, in the developed method, signal processing is possible with an unknown correlation matrix, and each iteration takes into account not only the score obtained in the previous step, but also the degree of accuracy of the character estimation.

To evaluate the effectiveness of the developed method, an imitation model was developed in the programming environment *MatCad 14*. Modelling was conducted for a system with 8 receiving and 8 transmitting antennas using quadrature amplitude modulation.

Fig. 4 shows the probability of error $P_{\text{error}}$ from signal/noise ratio (SNR).

Relative signal/noise refers to the ratio $h_i^2/2\sigma^2$, where $2\sigma^2$ is a noise dispersion of observation, $h_i^2$ is the average signal strength in the interval of the duration of one information symbol in one receiving channel, that is $h_i^2 = E\left\{\sum_{j=1}^{M_t}|h_{ij}|^2\right\}$, $i$ is number of input tract, $i = \overline{1, M_r}$.

It is believed, that for all receiving channels SNR is the same, since the matrix **H** consists of uncorrelated complex gaussian random variables with zero avarage and uniform dispersions. From fig. 4 we can see, that the least efficient algorithm has a minimum of mean-square deviation. The proposed quasi-optimal processing method has energy losses in comparison with the optimal demodulator of the order 1 dB (when $P_{error} = 10^{-5}$). At the same time, the V-BLAST algorithm has power losses close 3 dB.

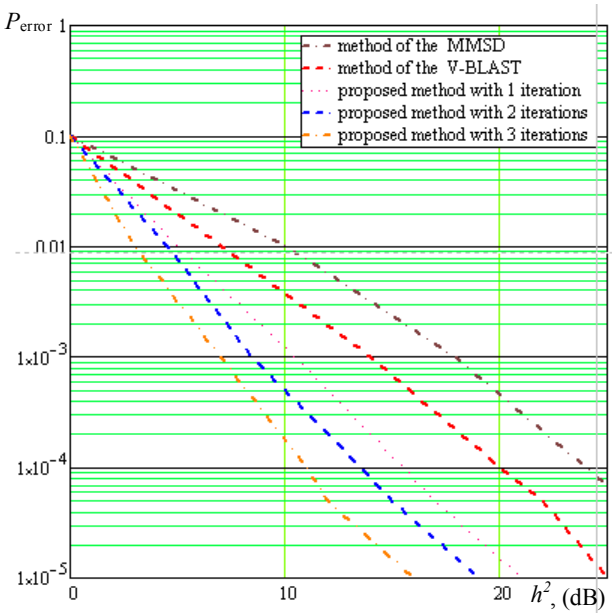



**Fig. 4.** Impedance of different methods of signal processing in the MIMO system

When dividing $S$ flows into two subgroups, the complexity of the algorithm for $K$-position modulation is proportional to $K^{S/2}$, that is, with the number of antennas 8 and modulation QAM-16, it is necessary to perform computational operations for 256 combinations in the interval of the one information symbol duration.

Number of mathematical operations (addition and multiplication) with the number of iterations and in this method is proportional to the magnitude

$$28iK^{S/2}S^2 + 20iK^{S/2}S.$$

In MIMO system with 8 transmitting and 8 receiving antennas for demodulating one information symbol (with frequency of passage 100 мks) With modulation of QAM-16, the method allows to reduce the number of operations performed in real time, from 10 million in the case of an optimal demodulator to 500 thousand. Thus, the computational cost for implementing the proposed method is 20 times less, than the maximum likelihood algorithm.

According to the results of the simulation, we can conclude, that the proposed method has characteristics close to the characteristics of the demodulator, optimal for the criterion of maximum likelihood, but much less computational complexity. This method can be used to process signals in systems with more antennas and with high modulation multiplicity.

## Conclusions

1. The noise immunity of receiving signals in the MIMO system, essentially depends on the choice of the signal processing method on the receiving side. Existing methods for processing signals, that provide a given quality of information transmission have a high computational complexity, so there is a necessity to improve these methods.

2. This article developed an improved method of signal processing in MIMO systems of unmanned aeronautical complexes, the essence is the ability to work with a known and unknown correlation matrix, the division of received signals into groups and the evaluation of each group, taking into account the evaluation error.

The difference between the advanced method and the known method, which determines its novelty and the essence of the improvement, is that the method allows to work with an unknown correlation matrix, and when processing the signal in the demodulator, each iteration takes into account not only the evaluation obtained in the previous step, but also the degree of accuracy character evaluation.

3. The proposed improved method has characteristics, that are close to the characteristics of a demodulator, optimal for the criterion of maximum likelihood, but much less computational complexity. So, in the MIMO system with 8 transmitting and 8 receiving antennas, demodulating one information symbol with modulation of QAM-16, the method allows to reduce computing costs by 20 times compared with the maximum likelihood algorithm.

The direction of further research is the development of a method for evaluating the parameters of the MIMO system channels of unmanned aeronautical complexes.

REFERENCES


1. Vishnevskiy, V.M., Lyahov, A.I., Portnoy, S.L. and Shahnovich I.V (2005), *Broadband wireless communication networks*, Technosphere, Moscow, 592 p.
2. Malyarchuk, M.V. and Slusar, V.I. (2010), “Perspective communications technology with unmanned aerial vehicles”, *Modern information technology in the field of security and defense*, NASU, Kyiv, No 1 (7), pp. 47-51.
3. Slusar, V.I. (2010), “Radio links with UAV: implementation examples.”, *Electronics: science, technology, business*, No. 5, pp. 56-60.
4. Serduk, P.E. and Slusar, V.I. (2014), “Communication with terrestrial robotic systems: current state and prospects”, *Electronics: science, technology, business*, No. 7 (139), pp. 66-79.
5. Volkov, L.N., Nemirovkiy, M.S. and Shinakov, Yu.S. (2005), *Digital radio communication systems: basic methods and characteristics: a tutorial*, Eco-Trends, Moscow, 392 p.
6. Goldsmith, A. (2011), *Wireless communications*, Technosphere, Moscow, 904 p.
7. Slusar, V. (2005), “MIMO systems: principles of construction and signal processing”, *Electronics: science, technology, business*, No. 8, pp. 52-58.
8. Veselovskiy, K. (2006), *Mobile radio communication systems*, Hot line Telecom, Moscow, 536 p.
9. Ehab, M. Shaheen and Mohamed, Samir (2013), “Jamming Impact on the Performance of MIMO Space Time Block Coding Systems over Multi-path Fading Channel”, *REV Journal on Electronics and Communications*, Vol. 3, No. 1–2, January – June, pp. 68-72.
10. Zhyvotovskyi, R.M. and Gorobets, Yu.O. (2016), “Analysis of the using of unmanned aviation complexes”, *Arms systems and military equipment*”, No. 4., pp. 16-21, available at: http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/17317 (last accessed February 3, 2018).
11. Petruk, S.M. (2017), “Unmanned aviation complexes in armed conflict of the past decades”, Scientific and technical magazine "*Armament and military equipment*", CRIAME AF of Ukraine, Kyiv, No. 1(13), pp. 44-49.
12. D. Havronichev, (2011), “Drums UAV USA – present and future”, *Military review – site Army herald*, available at: http://www.Army-rus-new (last accessed February 3, 2018).
13. Proceedings of 12th International Conference & Exhibition UAS, Paris, France (2010), available at: http:// www.uas2011.org, (last accessed February 3, 2018).
14. Ilyshko, V.M., Mitrahovich, M.M., Samkov, A.V., Silkov, V.I., Soloviev O.V. and Strelnikov, V.I. (2009), *Unmanned aerial vehicles: Approximate calculation methods of basic parameters and characteristics*, CRIAME AF of Ukraine, Kyiv, 302 p.
15. Pavlushenko, M., Evstafiev, G. and Makarenko I. (2005), *Unmanned aerial vehicles: history, application, threat of proliferation and development prospects*, Human rights, Moscow, 611 p.
16. Kobrina, N.V. and Klochko, T.A. (2014), “Application of unmanned aerial systems for solving environmental problems”, *Ecology and industry: scientific and production magazine*, “UkrSTCEnergostal”, Kharkiv, No. 1 (38), pp. 88-90.
17. Egorov, K. and Smirnov, S. (2005), “Unmanned aerial systems in armed conflicts”, *Military parade*, june- august, pp. 34-35.
18. *Unmanned vehicles. Handbook 2010* (2010), Shephard press, Burnham, 145 p.

19. Slusar, V.I. (2008), “Military communications of NATO countries: problems of modern technologies”, *Electronics: science, technology, business*, No. 4, pp. 66-71, available at: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_403_181.pdf (last accessed February 3, 2018).
20. Slusar, V.I. and Masesov, N.A. (2008), “Methods of spatial-temporal signal coding on the basis of the advanced technology of multi-MIMO for stations of tropospheric communication of the Armed Forces of Ukraine”, IV-th scientific and practical conference "*Priority areas for the development of telecommunication systems and special purpose networks*" (22 – 23 October 2008, reports and abstracts), MITI NTUU "KPI", Kyiv, pp. 253.
21. Bessai, H. (2005), *MIMO Signals and Systems*, Springer science and Business Media, USA, N.-Y., 206 p.
22. Lee, J., Han, J.K. and Zhang, J. (2009), “MIMO Technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced”, *EURASÏP Journal on Wireless Communications and Networking*, pp. 1-10.
23. Kuhzi, V. (2006), *Wireless Communications over MIMO Channels. Applications to CDMA and Multiple Antenna Systems*, Chichester, U.K., John Wiley Sons, 363 p.
24. Slusar, V.I. and Masesov, M.O. (2007), “Using of spatial-temporal signal coding methods in the mobile component of communications systems of the Armed Forces of Ukraine”, IV scientific and practical seminar "Priority *areas for the development of telecommunication systems and special purpose networks*" 22 november 2007 year, MITI NTUU "KPI", Kyiv, p. 149, available at: http://www.slyusar.kiev.ua/VITI_2007_7.pdf (last accessed February 3, 2018).
25. Kuvshinov, O.V. and Minochkin, D.A. (2006), “Analysis of the characteristics of radio access systems with MIMO technology”, *Collection of scientific works of the Military institute of Taras Shevchenko National University of Kyiv, MIKNU*, Kyiv, No. 3, pp. 51-56.

Надійшла (received) 16.02.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 23.03.2018

**Метод обробки сигналів у системах MIMO безпілотних авіаційних комплексів**

Р.М. Животовський, С.М. Петрук

Завадостійкість приймання сигналів в системі MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) суттєво залежить від вибору методу обробки сигналів на приймальному боці. Існуючі методи обробки сигналів, в системі MIMO які забезпечують задану якість передачі інформації, мають високу обчислювальну складність, тому виникає необхідність удосконалення цих методів. Метою зазначеної статті є підвищення завадозахищеності каналів управління та передачі даних безпілотних авіаційних комплексів, що досягається шляхом розробки нового методу обробки сигналів у багатоантенних системах безпілотних авіаційних комплексів. В статті розроблено удосконалений метод обробки сигналів в системах MIMO безпілотних авіаційних комплексів, сутність якого полягає в можливості роботи з відомою та невідомою кореляційною матрицею, розбитті прийнятих сигналів на групи і оцінці кожної групи з врахуванням помилки оцінювання. Під час дослідження були використані положення теорії зв’язку, теорії сигналів, теорії антен та теорії завадостійкого кодування. Відмінність удосконаленого методу, полягає в тому, що метод дозволяє працювати при невідомій кореляційній матриці, а при обробці сигналу в демодуляторі на кожній ітерації враховується не тільки оцінка, отримана на попередньому кроці, але й ступінь точності оцінювання символів. Запропонований вдосконалений метод має характеристики, близькі до характеристик демодулятора, оптимального за критерієм максимальної правдоподібності, але значно меншу обчислювальну складність. Метод дозволяє знизити обчислювальні затрати в 20 разів в порівнянні з алгоритмом максимального правдоподібності. Практична реалізація зазначеного методу дозволить створити програмне забезпечення для комунікаційного обладнання безпілотних авіаційних комплексів, що функціонують в складних умовах радіоелектронної обстановки.

**Ключові слова:** сигнально-завадова обстановка; швидкість передачі інформації; ймовірність бітової помилки, просторово-часова обробка, система MIMO, паралельні канали.

**Метод обработки сигналов в системах MIMO беспилотных авиационных комплексов**

Р.Н. Животовский, С.Н. Петрук

Помехоустойчивость приема сигналов в системе MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) существенно зависит от выбора метода обработки сигналов на приемной стороне. Существующие методы обработки сигналов в системе MIMO, которые обеспечивают заданное качество передачи информации, имеют высокую вычислительную сложность, поэтому возникает необходимость совершенствования этих методов. Целью данной статьи является повышение помехозащищенности каналов управления и передачи данных беспилотных авиационных комплексов, достигается путем разработки нового метода обработки сигналов в многоантенных системах беспилотных авиационных комплексов. В статье разработан усовершенствованный метод обработки сигналов в системах MIMO беспилотных авиационных комплексов, сущность которого заключается в возможности работы с известной и неизвестной корреляционной матрицей, разбивке принятых сигналов на группы и оценке каждой группы с учетом ошибки оценивания. В ходе исследования были использованы положения теории связи, теории сигналов, теории антенн и теории помехоустойчивого кодирования. Отличие усовершенствованного метода, заключается в том, что метод позволяет работать при неизвестной корреляционной матрицы, а при обработке сигнала в демодуляторе на каждой итерации учитывается не только оценка, полученная на предыдущем шаге, но и степень точности оценки символов. Предложенный усовершенствованный метод имеет характеристики, близкие к характеристикам демодулятора, оптимального по критерию максимального правдоподобия, но имеющего значительно меньшую вычислительную сложность. Метод позволяет снизить вычислительные затраты в 20 раз по сравнению с алгоритмом максимального правдоподобия. Практическая реализация данного метода позволит создать программное обеспечение для коммуникационного оборудования беспилотных авиационных комплексов, функционирующих в сложных условиях радиоэлектронной обстановки.

**Ключевые слова**: сигнально-помеховая обстановка; скорость передачи информации; вероятность битовой ошибки, пространственно-временная обработка, система MIMO, параллельные каналы.

UDC 534.1:531.44 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.16**

A. Kovtun, V. Tabunenko, A. Parkhomchuk

National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine

# THEOREM ABOUT THE CHANGE OF RESONANCE FREQUENCIES OF VIBRATIONS OF MECHANICAL SYSTEMS WITH FRICTION

There are the insufficiently known phenomena, resulting in the operating damages of knots and details of machines, among that most dangerous are a friction, wear, and dynamic tiredness. They behaves to the mechanical systems, the elements of that are bound by inter se forces of dry friction, that is widely widespread in a technique, especially in the knots of contact of elements with a friction. It results in the origin of new effects the account of that is needed for providing of increase of reliability of work of machines and mechanisms. At the decision of practical tasks usually use the simplified charts that are characterized the eventual number of degrees of freedom, although the real mechanical system has an endless large number of degrees of freedom. The study of vibrations of the mechanical systems on such models allows to get basic conformities to law of influence of interesting factors on dynamic descriptions of the system. In the theory of vibrations are of interest research of questions of cooperation of forces of friction, operating in the system, and force vibrations. However paid attention to the question of influence of forces of friction on the size of frequency of resonant vibrations of the mechanical systems. Under the inlaid constructions we understand such, when one elements of construction are located into other and here constrained inter se on opposite surfaces by forces of dry friction. The selection of class of the inlaid constructions, among the nonlinear mechanical systems, requires the row of clarifications. Consists the feature of design of one mass models of the inlaid constructions in that they have two degrees of freedom. It results in appearance at the inlaid constructions of new properties, what and dedicated hired.

**Keywords**: mechanical system; degrees the freedoms; inlaid constructions; operating damages; friction; wear; dynamic systems; calculation charts; oscillating mechanical systems; nonlinear mechanical systems.

## Formulation of the problem

One of the problems facing modern science is to ensure the reliability of machines [1, 4]. Among many phenomena that lead to operational damage to machine components and components, friction, wear and dynamic fatigue are the most dangerous. First of all, this refers to mechanical systems, the elements of which are interconnected by the forces of dry friction. Such systems are widely used in engineering, especially in the nodes of contacting elements with friction [2]. If the contact of the body with the counter body occurs on opposite surfaces (we call such constructions nested), then this leads to the appearance of new effects, which are necessary to ensure the increased reliability of machines.

It is known that a real mechanical system has an infinite number of degrees of freedom. However, when solving practical problems, simplified schemes are usually used, which are characterized by a finite number of freedom degrees. In such calculation schemes, some (the lightest) parts of the system are considered completely devoid of mass and are represented in the form of deformable inertia-free bonds, while the bodies behind which the inertia property is retained in the calculation scheme are considered material points [1]. The study of the oscillations of mechanical systems on such models makes it possible to obtain the basic regularities of the influence of the factors of interest on the dynamic characteristics of the system.

A special place in the theory of oscillations is given to investigations of the interaction of frictional forces acting in the system and forced oscillations. At the same time, this issue is mainly discussed in two aspects: friction, as a source of self-oscillations and oscillations, is a mechanism for controlling friction. As a result, attention is not paid to the effect of friction forces on the frequency of the resonant oscillations of mechanical systems. This is connected, perhaps, with the fact that this issue is considered resolved. However, the selection of a class of embedded constructions (among nonlinear mechanical systems) requires some refinement.

Nested we will call the construction, some elements of which are located inside the others and are connected to each other on opposite surfaces by the forces of dry friction, and the ratio of the maximum tangential force spent on overcoming the bonds caused by touching the elements when removing them from the state of rest to the same load, which compresses the touch elements, provided there is no connection between them on opposite surfaces, greater than the true coefficient of friction of rest.

Nested constructions correspond to a mechanical model of a certain type. The peculiarity of the model lies in the fact that the single-mass model of the embedded construction has two degrees of freedom [2]. This leads to the appearance of new properties in nested constructions.

The aim of the article is to determine the influence of the frictional force on the magnitude of the oscillation frequency of a mechanical system.

## The Main material

Let us consider the effect of friction on the frequency of free vibrations of a single-mass mechanical system, which is a load of mass $m$ suspended on a spring in rigidity $k$, in parallel to which a damping element with a damping coefficient $C$ (Fig. 1). The differential equation of cargo movement, as is known, has the form [3-6]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0.$$

The solution of this equation is known:

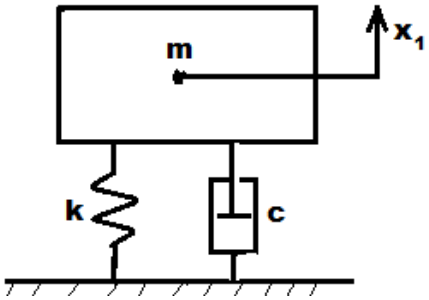



**Fig. 1.** The calculation scheme of a single-mass model of a mechanical system with one degree of freedom

$$x = e^{\frac{Ct}{2m}}[C_1 \cos pt + C_2 \cos pt],$$

here $C_1$, $C_2$ are arbitrary constants; $p$ is the frequency of the natural oscillations.

$$p = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2}}.$$

From the last equality it is seen that with increasing resistance the frequency of the oscillations of the load decreases, which is confirmed by experiments.

We apply the external force $Q\ (t) = Q_0 \sin \omega t$ to the load. Let us see how the increase in the damping factor affects the value of the frequency of the resonance oscillations of the load. The resonance in the system will no longer occur when the ratio of the frequency of the forced oscillations to the frequency of the natural oscillations of the system without friction $p$ is equal to 1, but at lower frequencies, that is, the maxima of the curves of the dynamical system dependence on the ratio $\omega / p$ will be shifted to the left of the value $\omega / p = 1$ [6]. Thus, for the system under consideration, an increase in the damping coefficient $C$ leads to a decrease in the value of the frequency of the resonance oscillations of the load. The calculation of a mechanical system consisting of $n$ masses and $n$ dampers is given in [7]. And in this case, an equal increase in the damping coefficients in $n$ dampers leads to a decrease in the magnitude of the frequency of the resonance oscillations of the goods. A further increase in damping leads to an end to the oscillatory movements of the system.

From the definition of this nested construction, it follows that the nested structures correspond to mechanical models of a certain type. One of such models with two degrees of freedom (with one mass and one knot of friction) is shown in Fig 2. A feature of nested constructions is the condition (s is the number of damping elements, $n$ is the number of degrees of freedom).

Let us examine, in the general case, the dependence of the natural frequencies of oscillations of a mechanical system on the magnitude of the frictional force. In this case, consider systems in which the number of damping elements is equal ($S = n$), and less number of degrees of freedom, which corresponds to nested structures.

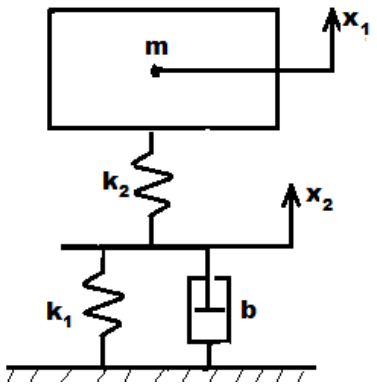



**Fig. 2.** The calculation scheme of a single-mass mechanical system with two degrees of freedom

Consider the oscillations of a mechanical system consisting of two masses $m_1$ and $m_2$ (we take $m_1 = m_2 = m$), connected with the base and each other by means of elastic elements with stiffness k and damping elements with a damping coefficient $C$ (Fig. 3).

We apply to the masses an external force

$$Q = Q_0 \sin t.$$

The equations of oscillations of the system have the form [6]:

$$\ddot{x}_1 = \frac{k_3}{m_1} x_2 - \frac{(k_1 + k_3)}{m_1} x_1 - \frac{c_1}{m_1} \dot{x}_1 + \frac{Q_0}{m_1} \sin \omega t,$$

$$\ddot{x}_2 = \frac{k_3}{m_2} x_1 - \frac{(k_1 + k_3)}{m_2} x_2 - \frac{C_2}{m_2} \dot{x}_2 + \frac{Q_0}{m_2} \sin \omega t.$$

Analysis of the results of calculation of the resonance frequencies of the oscillations of the system under consideration as a function of the value of the damping coefficient (with parameters $m_1 = m_2 = m = 1$ kg, $k_1 = k_2 = k_3 = 200$ n / m and calculations of many mass systems carried out using numerical methods allow us to formulate the theorem on the change in resonance frequencies of oscillations of mechanical systems in the presence of friction.

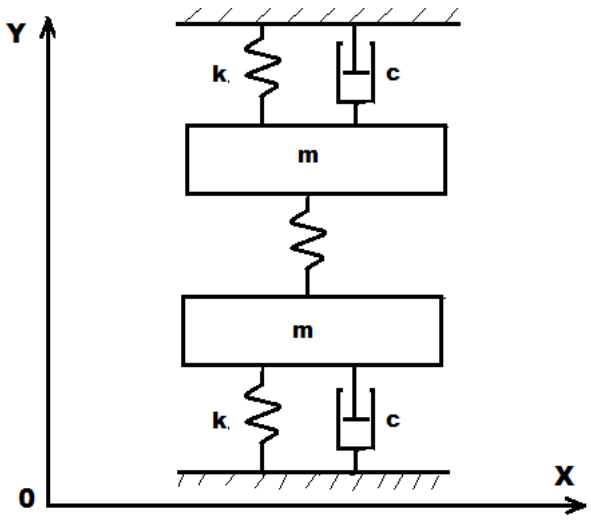



**Fig. 3.** Design diagram of two-mass mechanical systems with dampers

*Theorem*. Introduction to the mechanical system with n degrees of freedom s of dissipative elements leads to the fact that the resonant frequencies of the newly formed system with respect to the system without friction are located as follows:

where $s = n$

$p_k > p_k^s$ $(k = 1,2...n)$;

where $s < n$ for $n$ and $(n-s)$

degrees of freedom $p_k \le p_k^s < p_{k+1}$ $(k = 1,...,n-1)$.

*Evidence:*

1. Consider a mechanical system in which the number of damping elements is equal to the number of degrees of freedom (n = s). The equation of motion in the system has the form [8]:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + SX = Q,$$

where $M$ is the mass matrix; $C$ is the damping matrix; $S$ is the matrix of rigidity.

It was shown in [6, 8] that in this case the with equation of motion in normal coordinates will have the form:

$$\ddot{x}_i + 2n_i\dot{x}_i + p^2{}_i x_i = q_i, \quad i = 1,2,3...n,$$

where $2n$ is the damping constant.

Each of the n equations is unrelated to all the others. Therefore, the dynamic displacement is related to the i-th form of oscillations.

The dynamic displacements corresponding to the i-th form of the oscillations of the system, in the presence of damping, are determined by the expression [6]:

$$x_i = e^{-n_i t}(x_{0i}\cos p_i t + \frac{\dot{x}_{0i} + n_i x_{0i}}{p_i}\sin p_i t.$$

The circular frequency with damped oscillations is determined from the expression:

$$p_{Дi} = \sqrt{p_i - n_i^2} = p_i\sqrt{1-\gamma_i^2},$$

where $p_i$ is the circular frequency of undamped oscillations; $C_i$ is the corresponding value of the damping coefficient.

Thus, $p_i > p_{is}$.

2. Consider a mechanical system in which the number of damping elements is less than the number of degrees of freedom $(n > s)$. Suppose that the $s_1$ damping element is converted into a rigid connection ($C \to \infty$). The coupling equation can be represented by the expression [8]:

$$A_{11}q_1 + A_{12}q_2 + ... + A_{1n}q_n = 0;$$

$$\left(a_{11}\cdot p^2 - c_{11}, a_{12}\cdot p^2 - c_{12}...a_{1n}\cdot p^2 - c_{1n}\right);$$

$$\left|a_{21}\cdot p^2 - c_{21}, a_{22}\cdot p^2 - c_{22}...a_{2n}\cdot p^2 - c_{2n}\right| = 0;$$

. . . . . .

$$\left|a_{n1}\cdot p^2 - c_{n1}, a_{n2}\cdot p^2 - c_{n2}...a_{nn}\cdot p^2 - c_{nn}\right|.$$

The age-old control of the system after imposing a connection on it will be obtained from the first secular equation by deleting the first line and the first column in it. According to the theorem on the separation of the roots of the secular equation, the $n-1$ roots of the $p_k^s$ of the coupled system are located between the roots of the secular equation of the unrelated system.

Continuing similar arguments, and introducing successively the following relations, we obtain inequalities for the system after imposing all s bonds on it, that is, $p_k \le p_k^s < p_{k+1}$ $(k = 1,2 ... n-1)$.

Thus, depending on the ratio of $n$ and $s$ for the same value of $C$, for each form of oscillation, two values of the resonance frequency of the oscillations of the mechanical system $\omega_{rez}$ are possible, which converge to the value of $p_1$ for $C \to 0$. The plot of the resonance frequency of the system's oscillations as a function of damping factor for the calculation circuit (Fig. 3, with parameters $m_1 = m_2 = m = 1$ kg, $k_1 = k_2 = k_3 = 200$ n / m) is shown in Fig. 4.

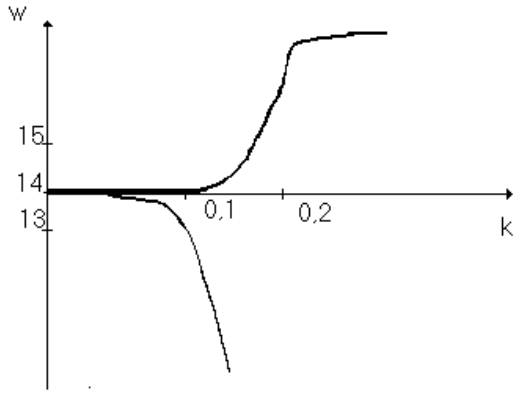



**Fig. 4.** Graph of the dependence of the resonant frequency of the system oscillations on the value of the damping coefficient

## Conclusions

The properties of oscillatory systems formulated in the theorem are revealed in numerical investigation and can be generalized by the following provisions:

1) The steady-state oscillations occur with respect to the position of stable equilibrium with the frequency of the disturbing force.

2) If the frequency of the perturbing force is close to one of the natural frequencies of the system, then the amplitudes of the oscillations of all masses increase and reach local maxima, the values of which depend on the frictional forces.

3) Local extrema of the resonance curve for $n = s$ are attained at frequencies less than the natural frequencies of the system.

4) Local extrema of the resonance curve $n > s$ are attained at frequencies not less than the natural frequencies of the system.

5) In systems with small friction, the change in the coefficient of friction at any place causes a change in the resonance amplitudes of the oscillations: as the friction increases, the amplitudes decrease. In systems with high friction, it is possible to select a friction value

at which the amplitude of the oscillations of a certain mass is minimal. The change in friction in the system can lead to the case when the frequency of the resonant oscillations is minimal.

REFERENCES


1. Den-Gartog, J.P. (1969), *Mechanical vibrations*, Fizmatgiz, Moscow, 560 p.
2. Kornev, B.G. (1970), *Vibration of structures with dry friction between elements*, Kharkiv, 176 p.
3. Jie, F.Z., Morse, I.E., Hinkle, R.T. and Jie, F.S. (1966), *Mechanical oscillations, Mechanical Engineering*, Moscow, 508 p.
4. Livitsky, N.I. (1988), *Fluctuations in the mechanisms*, Science, Moscow, 336 p.
5. Panovko, Ya.G. (1991), *Introduction to the theory of mechanical oscillations*, Science, Moscow, 255 p.
6. Panovko, Ya.G. (1967), *Fundamentals of the applied theory of elastic oscillations*, Mechanical Engineering, Moscow, 316 p.
7. Biderman, V.L. (1980), *Theory of mechanical oscillations*, High School, Moscow, 408 p.
8. Babakov, I.M. (1964), *Theory of oscillations*, Science, Moscow, 560 p.
9. Kovtun, A.V., Grekov, V.F. and Prokopov, V.A. (1996), *Dynamics of complex mechanical systems with dry friction bonds*, Ministr Ministry of Defense of the USSR, Kharkiv, 116 p.
10. Kovtun, A.V. (2000), "Features of the dependence of the frictional force of rest of embedded structures on the frequency of vibration exposure", *Information Processing Systems*, No. 4 (10), pp. 28-30.
11. Encyclopedia of Mechanical Engineering, available at: http://mash-xxl.info/info/264546/ (last accessed January 29, 2018).
12. Lectures on physics. Forced oscillations, available at: physics-lectures.ru/mexanicheski-kolebaniya-i-volny/7-8-vynuzhdennye-kolebaniya/ (last accessed January 29, 2018).


Received (Надійшла) 01.03.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.04.2018

**Теорема про зміну резонансних частот коливань механічних систем при наявності тертя**

А. В. Ковтун, В. О. Табуненко, О. В. Пархомчук

Існують маловивчені явища, що призводять до експлуатаційних пошкоджень вузлів та деталей машин, серед яких найбільш небезпечними є тертя, знос і динамічна втому. Вони відносяться до механічних систем, елементи яких пов'язані між собою силами сухого тертя, які широко поширені в техніці, особливо у вузлах контактування елементів з тертям. Це призводить до виникнення нових ефектів, облік яких необхідний для забезпечення підвищення надійності роботи машин і механізмів. При вирішенні практичних завдань зазвичай користуються спрощеними схемами, які характеризуються кінцевим числом ступенів свободи, хоча реальна механічна система має нескінченну велике число ступенів свободи. Вивчення коливань механічних систем на таких моделях дозволяє отримати основні закономірності впливу цікавлять чинників на динамічні характеристики системи. В теорії коливань становлять інтерес дослідження питань взаємодії сил тертя, що діють в системі, і вимушених коливань. Однак не приділяється увага питанню впливу сил тертя на величину частоти резонансних коливань механічних систем. Виділення класу вкладених конструкцій, серед нелінійних механічних систем, вимагає низки уточнень. Під вкладеними конструкціями розуміємо такі, коли одні елементи конструкції розташовані всередині інших і при цьому пов'язані між собою по протилежних поверхнях силами сухого тертя. Особливість моделювання одномасової моделей вкладених конструкцій полягає в тому, що вони мають два ступені свободи. Це призводить до появи у вкладених конструкцій нових властивостей, чому і присвячується дана робота.

**Ключові слова:** механічна система; ступені свободи; вкладені конструкції; експлуатаційні ушкодження; тертя; зношування; динамічні системи; розрахункові схеми; коливальні механічні системи; нелінійні механічні системи.

**Теорема об изменении резонансных частот колебаний механических систем при наличии трения**

А. В. Ковтун, В. А. Табуненко, А. В. Пархомчук

Существуют малоизученные явления, приводящие к эксплуатационным повреждениям узлов и деталей машин, среди которых наиболее опасными являются трение, износ и динамическая усталость. Они относятся к механическим системам, элементы которых связаны между собой силами сухого трения, которые широко распространены в технике, особенно в узлах контактирования элементов с трением. Это приводит к возникновению новых эффектов, учёт которых необходим для обеспечения повышения надёжности работы машин и механизмов. При решении практических задач обычно пользуются упрощёнными схемами, которые характеризуются конечным числом степеней свободы, хотя реальная механическая система имеет бесконечное большое число степеней свободы. Изучение колебаний механических систем на таких моделях позволяет получить основные закономерности влияния интересующих факторов на динамические характеристики системы. В теории колебаний представляют интерес исследование вопросов взаимодействия сил трения, действующих в системе, и вынужденных колебаний. Однако не уделяется внимание вопросу влияния сил трения на величину частоты резонансных колебаний механических систем. Выделение класса вложенных конструкций, среди нелинейных механических систем, требует ряда уточнений. Под вложенными конструкциями понимаем такие, когда одни элементы конструкции расположены внутри других и при этом связаны между собой по противоположным поверхностям силами сухого трения. Особенность моделирования одномассовых моделей вложенных конструкций заключается в том, что они имеют две степени свободы. Это приводит к появлению у вложенных конструкций новых свойств, чему и посвящается данная работа.

**Ключевые слова:** механическая система; степени свободы; вложенные конструкции; эксплуатационные повреждения; трение; износ; динамические системы; расчётные схемы; колебательные механические системы; нелинейные механические системы.

UDC 623.61+621.396.6 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.17**

V. Kononov [1], Ye. Ryzhov [2], L. Sakovych [3]

[1] Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine
[2] Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine
[3] Institute of special communication and information security
of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

# DEPENDENCE OF PARAMETERS OF REPAIR OF MILITARY COMMUNICATION MEANS ON THE QUALITY OF METROLOGICAL SUPPORT

The article proposes an approach to the quantitative assessment of the effect of metrological reliability of measuring equipment on the time of the verification of the parameters of military communications means during its maintenance and current repairs. In known works, approximate values of the probability of failure-free operation of measuring instruments are used for this, which reduces the accuracy of the results obtained. In the field conditions, it is necessary to take into account the metrological reliability of measuring instrument, which depends on temperature, humidity, vibration loads and other factors. The time for determination of the technical state of military communications means is regulated by guidance documents, therefore it is necessary to take into account all factors influencing the values of maintainability indicators in order to plan efficient work of specialists during its technical maintenance and routine maintenance in the process of developing metrological and diagnostic support. It is suggested to use the functional dependencies of the average recovery time of military communications equipment on the quality indicators of metrological and diagnostic support. Examples are given of using the results of the study to quantify the maintainability of real samples of military communications means and show the gain in the accuracy of calculating the average recovery time. The received results allow to estimate more objectively time of performance of works and reasonably to choose measuring instruments more objectively.

**Keywords:** military communications means; measuring instruments; metrological support.

## Analysis of recent research and publications

Military communication means (MCM) is continuously improving in the direction of raising the values of quality indicators, which leads to an increase in the number of elements, but the time required for maintenance and current repair (CR) remains unchanged.

Ref [1] discusses the relationship of metrology and technical diagnostics, but there are no recommendations on the justification of the choice of measuring instruments (MI). The solution of this problem is formulated in [2-5] without taking into account the influence of metrological reliability. The question of the metrological reliability of the MI is separately considered in [6-9], and recommendations for its inclusion during the maintenance and the CR of the MCM are given in [10, 11]. In this case, the approximate values of the probability of non-failure operation of the MI are used, which significantly worsens the accuracy of the results of quantitative evaluation of the time of execution of works.

## Problem statement

As a result of the combined consideration of the current achievements in the field of metrological and diagnostic support of maintenance and CR MCM, it is necessary to obtain the functional dependence of the indicators of maintenance on the metrological reliability of the MI.

Therefore, **the purpose of the article** is a quantitative assessment of the influence of the metrological reliability of the MI on the time of measuring the parameters of the MCM during its maintenance and CR.

## Results

During maintenance and CR, the MI is used to determine the actual technical condition of the MCM.

In this case, the average recovery time ($Tr$) should not exceed the permissible value ($Tp$) given in the manual documents [10, 11]

$$Tr = \left(tK + t_{trs}\right) \Big/ \left( p^K \cdot \prod_{i=1}^{N} P_i(\tau) \right) \le Tp,$$

where $t$ and $t_{trs}$ are the average time for checking and troubleshooting, respectively; $p$ is the probability of a correct assessment of the outcome of the verification depending on the type of MI; $N$ is the number of MIs used during maintenance and CR; $P_i(\tau)$ is the probability of failure-free operation of the MI in the form $i$ of inter-verification interval $\tau$; $K$ is the average number of inspections to determine the technical condition of the MCM.

In this case, the values $0{,}85 \le P_i(\tau) \le 0{,}99$ are chosen roughly [8-11], which leads to significant errors in the determination of $Tr$.

The peculiarity of the operation of the MI is due to ensurance of its reliability, mainly due to hidden metrological failures. Negative consequences of the use of MI with metrological failures can be extremely high and difficult to predict.

As indicators of the metrological reliability of the MI, the probability $P_i(\tau)$ of preserving the values of metrological characteristics in the set limits within the checking interval $\tau$ is used [9, 12].

The required level of metrological reliability significantly depends on the application of the MI and is

selected from the condition of ensurance the required efficiency of serviced technical devices. As a rule, this level for the working MI is $0,85 \ldots 0,90$, but in the best cases can be $0,90 \ldots 0,99$ [9, 12].

Quantitatively, the probability of preserving the values of the metrological characteristics of the MI in specific operating conditions can be estimated using the expression [9]

$$P_i(\tau) = 1 - m \cdot K_M K_S,$$

where $m$ is the equivalent number of failures during operation

$$m = \tau \cdot K_U / T,$$

where $K_M$ is the proportion of metrological characteristics of the MI, which are not covered by built-in control; $K_S$ is the statistical estimation of the coefficient of latent failures, which characterizes the portion of metrological failures; $K_U$ isthe average rate of the use of the MI; $T$ – is the working time of the MI between failures.

Values $\tau$ are obtained from the manual documents for the metrological maintenance of the service objects or from the technical description of the MI.

It is known that the MCM repair operator directly deals with its restoration 900 hours during the year [13]. In this case, the rate of use of the MI at the point of maintenance and repair for the year of operation is equal to

$$K_U = \frac{900}{8760} = 0,103.$$

According to the results of the analysis of the technical description and manual of the MI one determines $K_M$.

Value of coefficient of hidden failures $K_S$ depending on the purpose of the MI in the absence of statistical data of the results of the operation of analogic devices are determined as an average of the values given in the table 1 [9] for different parameters.

Working time between failures of the MI is also taken from statistical data, and in the absence of technical descriptions of devices.

The mean square deviation of the estimation of the probability of preservation of the values of the metrological characteristics of the MI is calculated using the expression [9]:

$$\sigma = m \cdot K_M \sqrt{K_S \left(0,15 \cdot K_S + 1/m\right)}.$$

*Table 1.* **Averaged values of the coefficient of hidden failures depending on the purpose of the MI**

| № | Title of the parameter of the MCM and appointment of the MI | $K_S$ |
|---|---|---|
| 1. | Voltage | 0,1 |
| 2. | Parameters of components of electric circuits with lumped constants | 0,21 |
| 3. | Power | 0,23 |
| 4. | Parameters of elements and paths with distributed constant | 0,22 |
| 5. | Frequency and time | 0,16 |
| 6. | Phase difference and group delay time | 0,2 |
| 7. | Signal form and spectrum | 0,2 |
| 8. | Features of radio devices | 0,16 |
| 9. | Pulse signals | 0,16 |
| 10. | Field voltage and radio interference | 0,18 |
| 11. | Amplifiers measuring | 0,15 |
| 12. | Measuring generators | 0,2 |
| 13. | Attenuation | 0,21 |
| 14. | Electrical and magnetic properties of materials | 0,16 |
| 15. | Parameters of coaxial and waveguide paths | 0,21 |
| 16. | Parameters of radiolamps and semiconductor devices | 0,24 |

Let's consider an example of the application, which are used during maintenance and repair of the short-wave radio station R-1150 [14]. The results of calculations are given in table 2, for $\tau = 8760\ hr$.

Table 3 gives the parameters calculated for different values of the time T for a short-wave radio station P-1150 operated by one master. The estimated time of execution of the maintenance increases by 5.5%, when one accounts for the metrological reliability of the MI. During the CR of the short-wave radio station P-1150 in case of a failure of the built-in control system, the search for a defective typical replacement element is performed using the conditional diagnostic algorithm shown in Fig. 1.

The object consists of $L = 41$ elements, the time necessary to restore its working status is $Tr = 30$ min. The binary conditional diagnostic algorithm ensures the localization of the defect after performing $K = 6$ checkings. For $t = 3$ min and $t_y = 5$ min for the analog voltmeters C-4353 or B3-56 ($p = 0,845$) as a MI without taking into account their metrological reliability, we obtain

$$Tr = \frac{6 \cdot 3 + 5}{0,845^6} = 63 \text{ min} > Tp,$$

which reveals that, this option does not meet the requirements.

*Table 2.* **Parameters calculated for short-wave radio station R-1150**

| № | Measuring instruments | $T$, hr | $K_M$ | $K_S$ | $P_i(\tau)$ | σ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Electrometer-multifunctional device C-4353 | 1500 | 1,0 | 0,21 | 0,877 | 0,353 |
| 2. | Power meter M3-45 | 2000 | 1,0 | 0,23 | 0,899 | 0,319 |
| 3. | Frequency meter Ch3-63 | 3000 | 0,5 | 0,16 | 0,976 | 0,217 |
| 4. | Non-linear distortion analyzer of C6-11 | 5000 | 0,1 | 0,16 | 0,997 | 0,054 |
| 5. | Millivoltmeter B3-56 | 4000 | 1,0 | 0,10 | 0,978 | 0,148 |
| 6. | High frequency signal generator G4-151 | 5000 | 0,3 | 0,20 | 0,989 | 0,187 |

*Table 3.* **List of parameters measured for the short-wave radio station P-1150**

| № | Parameter | Measuring instruments | $p_i$ | Time measurement, hours | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | According to instructions | Taking into account the metrological reliability |
| 1 | Sensitivity | C6-11 | 0,9993 | 2,33 | 2,36 |
| | | G4-151 | 0,834 | | |
| 2 | Power | M3-45 | 0,95 | 3,00 | 3,34 |
| 3 | Range of manual gain control | B3-56 | 0,85 | 0,25 | 0,26 |
| | | G4-151 | 0,834 | | |
| 4 | Automatic gain control range | B3-56 | 0,85 | 0,16 | 0,16 |
| | | G4-151 | 0,834 | | |
| 5 | Frequency of reference generator | Ch3-63, clock | 0,9985 | 0,25 | 0,26 |
| 6 | Non uniformity of the amplitude-frequency characteristic of the receiving tract | G4-151 | 0,834 | 1,15 | 1,19 |
| | | B3-56 | 0,85 | | |
| 7 | Nonlinear distortion of the receiving tract | G4-151 | 0,834 | 1,15 | 1,17 |
| | | C6-11 | 0,9993 | | |
| 8 | Power supply | C-4353 | 0,845 | 0,08 | 0,09 |
| **Total execution time, hr** | | | | 8,37 | 8,83 |

Using the digital voltmeter, by which the C6-11 is required ( $p = 0,9993$ ) one obtains a positive answer, even taking into account the metrological reliability of the device

$$Tr = \left(6 \cdot 3 + 5\right) \Big/ \left(0,997 \cdot 0,9993^6\right) = 23 \text{ min} < Tp.$$

Let's consider another example of the calculation with the conditional algorithm for diagnostics of the control subsystem of the operation of a high power radio transmitter, which is shown in Fig. 2 [11].

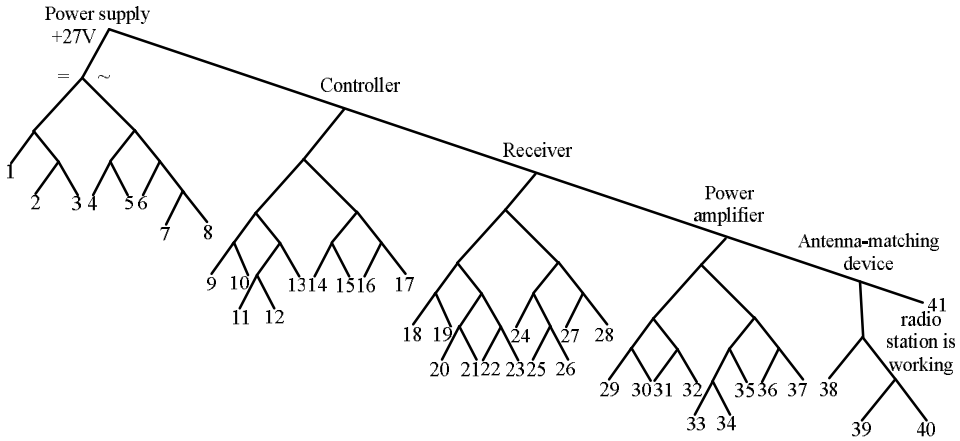



**Fig. 1.** Conditional algorithm for determination of the technical state of the short-wave radio station P-1150 with the failure of the built-in control system

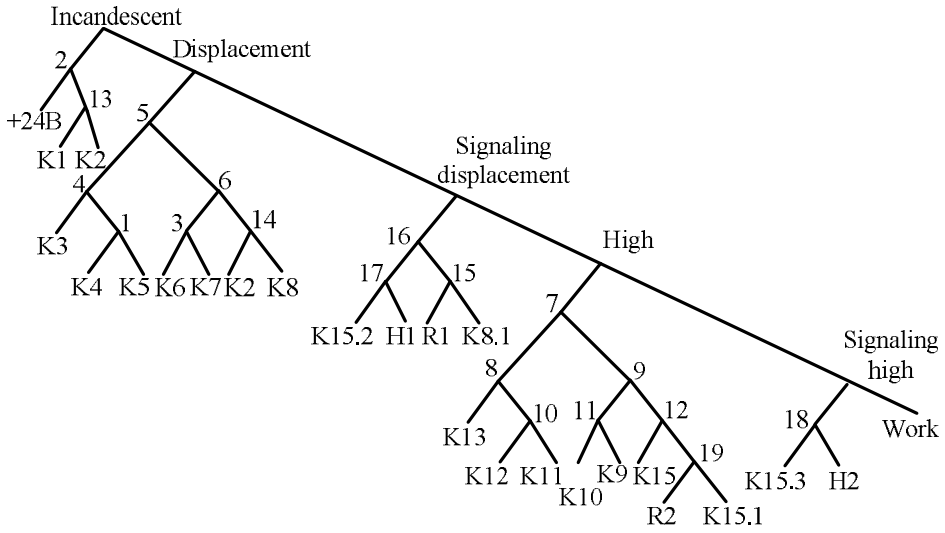



**Fig. 2.** Conditional algorithm for diagnostics of the subsystem of control of the operation of the radio transmitter

In this case again $t = 3$ min and $t_{trs} = 5$ min. In case of failure of a known operation mode of one has $K = 2$ and $Tr \le 30$ min.

The use of the electric measuring instrument C-4353 without taking into account the metrological reliability leads to the result

$$Tr = \frac{2 \cdot 3 + 5}{0{,}845^6} = 15 \text{ min} < Tp,$$

and for the metrological reliability the device taking into account we find

$$Tr = \frac{2 \cdot 3 + 5}{0{,}877 \cdot 0{,}845^2} = 17 \text{ min} < Tp,$$

which is 13% more than in the previous case.

## Conclusions

1. Functional dependences of the influence of the metrological reliability of the MI on the mean time of restoration of the MCM are obtained and examples of their practical use are given.

2. Account for the metrological reliability of the MI in estimation of the time of maintenance and CR of the MCM significantly increases the accuracy of the obtained results.

3. It is recommended to use the obtained results in the methods [10, 11], which will for more objective estimation of the time of execution of work and for the justification of the choice of the MI with the minimum necessary values of metrological characteristics to reduce the cost of maintenance and CR of the MCM.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ


1. Ксёнз С. П. Диагностика и ремонтопригодность радиоэлектронных средств / С. П. Ксёнз. – М.: Радио и связь, 1989. – 248 с.
2. Сакович Л. Н. Определение метрологических характеристик средств измерений для обслуживания и ремонта средств связи / Л. Н. Сакович, В. Н. Дзюба, В. П. Павлов // Зв'язок. – 2003. – № 5. – С.17-19.
3. Ryzhov Ye. Minimization measurement requirements for maintenance and repair special communication means / Ye. Ryzhov, L. Sacovych // Institute of Special Communication and Information Protection National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Scientific works “Information Technology and Security”. – 2017. – Vol. 5, Iss. 1(8). – P. 106-114.
4. Рижов Є. В. Методика обґрунтування метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки військового призначення для метрологічного обслуговування військової техніки зв’язку / Є. В. Рижов, М. Ю. Яковлев // “Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ”: тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції. – Львів: АСВ, 2015. – С. 166-167.
5. Павлов В. П. Методики дефектации военной техники связи при неплановых ремонтах: дис. … канд. техн. наук: 20.02.14 / Павлов В. П. – К., 2006. – 182 с.
6. Ким К. К. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника: учебное пос. / К. К. Ким. – СПб. : Питер, 2008. – 368 с.
7. Яковлев М. Ю. Розвиток теорії метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки військового призначення : автореф. дис. … докт. техн. наук: спец. 05.01.02 – стандартизація, сертифікація та метрологічне забезпечення / М. Ю. Яковлев – Львів, 2011. – 39 с.
8. Кононов В. Б. Визначення міжповірочних (калібрувальних) інтервалів засобів вимірювальної техніки військового призначення / В. Б. Кононов // Авиационно-космическая техника и технология. - 2011. – № 7. – С. 235–237.
9. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО / В. Б. Кононов, О. В. Водолажко, О. В. Коваль та ін. – Х. : ХНУПС, 2017. – 288 с.
10. Удосконалення методу завдання вимог до мінімально припустимого значення ймовірності правильної оцінки результату виконання перевірки під час діагностування / М. Ю. Яковлев, Є. В. Рижов, Л. М. Сакович, П. Л. Аркушенко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2017. – № 4(29). – С. 136-142.
11. Рижов Є. В. Метод обґрунтування мінімально припустимого значення ймовірності оцінки результату перевірки параметрів / Є. В. Рижов, Л. М. Сакович // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія Приладобудування. – 2017. – Вип. 54(2). – С. 96-106.
DOI: https://doi.org/10.20535/1970.54(2).2017.119562.
12. Цибина А. А. Опыт внедрения на ЭВМ методики установления межповерочных интервалов / А. А. Цибина, А. М. Шолов // Измерительная техника. – 2008. – № 1. – С. 16-17.
13. Сакович Л. М. Моделювання роботи апаратної технічного забезпечення / Л. М. Сакович, І. М. Гиренко // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – № 1 (28). – К.: НУОУ, 2017. – С. 47-52.
14. Короткохвильова радіостанція Р-1150. Посібник по експлуатації ААН3.464414.001 РЭ – Одеса : Телекард-Прилад, 2013. – 205 с.


REFERENCES


1. Ksenz, S.P. (1989), *Diagnostics and maintainability of radio-electronic means*, Radio and communication, Moscow, 248 p.,
2. Sakovich, L.N. Dzyuba, V.N. and Pavlov V.P. (2003), “Definition of metrological characteristics of measuring instruments for maintenance and repair of communication equipment”, *Communication*, No. 5, pp. 17-19.
3. Ryzhov, Ye. and Sacovych L. (2017), “Minimization measurement requirements for maintenance and repair special communication means”, *Information Technology and Security*, Institute of Special Communication and Information Protection National Technical University of Ukraine (Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute), Kyiv, Vol. 5, Iss. 1(8), pp. 106-114.

4. Ryzhov, Ye.V. and Yakovlev, M.Yu. (2015), “Methodology of substantiation of metrological characteristics of military equipment measuring equipment for metrological maintenance of military communication technique”, *Prospects for the Development of Arms and Military Equipment of the Land Forces* : abstracts of the reports of the International Scientific and Technical Conference, LFA, Lviv, pp. 166-167.
5. Pavlov, V.P. (2006), *Methods of defectation of military communication means during unplanned repairs,* diss. PhD (technical sciences) : 20.02.14, Kyiv, 182 p.
6. Kim, K.K. (2008), *Metrology, standardization, certification and electrical measuring equipment*, Peter, St. Petersburg, 368 p.
7. Yakovlev M.Yu. (2011), *Development of the theory of metrological reliability of means of measuring equipment for military use* : author's abstract, diss. PhD (technical sciences) : special 05.01.02 – standardization, certification and metrological support, Lviv, 39 p.
8. Kononov, V.B. (2011), “Determination of inter-verification (calibration) intervals of measuring equipment for military use”, *Aviation-space technology and technology*, No. 7, pp. 235–237.
9. .Kononov, V.B., Vodolazhko, O.V. and Koval O.V. (2017), *Fundamentals of operation of measuring instruments for military purposes under the conditions of ATO*, KhNUPS, Kharkiv, 288 p.
10. Yakovlev, M.Yu., Ryzhov, Ye.V., Sakovich, L.M. and Arkushenko P.L. (2017), “Improvement of the method of task requirements to the minimum acceptable value of the probability of correct estimation of the result of the verification during the diagnosis”, *Science and technology of the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine*, No. 4 (29), pp. 136-142.
11. Ryzhov, Ye. and Sacovych, L. (2017), “Method substantiation of minimally possible value of probability assessment of estimation result of parameters”, *Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". Series Instrument Making*, No. 54(2), pp. 96-106, doi: **https://doi.org/10.20535/1970.54(2).2017.119562**.
12. Tsybyna, A.A. and Sholov, A.M. (2008), “Experience in introducing on-computer methods for establishing inter-checkpoints”, *Measuring technique*, No. 1, pp. 16-17.
13. Sakovich, L.M. and Girenko I.M. (2017), “Modeling of hardware technical support”, *Modern information technologies in the field of security and defense*, Kyiv, No. 1 (28), pp. 47-52.
14. Shortwave radio station R-1150 Operating manual AANZ.464414.001 RE, Telecard-Device, Odesa, 205 p.

Received (Надійшла) 26.01.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 04.04.2018

**Залежність показників ремонтопридатності військової техніки зв’язку від якості метрологічного забезпечення**

В. Б. Кононов, Є. В. Рижов, Л. М. Сакович

У статті запропонований підхід до кількісної оцінки впливу метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки на час виконання перевірки параметрів військової техніки зв’язку при її технічному обслуговуванні і поточному ремонті. У відомих роботах для цього використовують приблизні значення імовірності безвідмовної роботи засобів вимірювальної техніки, що знижує точність отриманих результатів. В польових умовах необхідно враховувати метрологічну надійність засобів вимірювальної техніки, що залежить від температури, вологості, вібраційних навантажень та інших факторів. Час встановлення технічного стану військової техніки зв’язку регламентований керівними документами, тому для планування ефективної роботи фахівців під час її технічного обслуговування та поточного ремонту в процесі розробки метрологічного та діагностичного забезпечення необхідне врахування всіх факторів, які впливають на значення показників ремонтопридатності. Запропоновано використовувати функціональні залежності середнього часу відновлення військової техніки зв’язку від показників якості метрологічного та діагностичного забезпечення. Приведено приклади використання результатів дослідження для кількісної оцінки показників ремонтопридатності реальних зразків військової техніки зв’язку та показано виграш в точності розрахунку середнього часу їх відновлення. Отримані результати дозволяють більш об’єктивно оцінити час виконання робіт та обгрунтовано обирати засоби вимірювальної техніки.

**Ключові слова:** військова техніка зв’язку; засоби вимірювальної техніки; метрологічне забезпечення.

**Зависимость показателей ремонтопригодности военной техники связи от качества метрологического обеспечения**

В. Б. Кононов, Е. В. Рыжов, Л. Н. Сакович

В статье предложен подход к количественной оценке влияния метрологической надежности средств измерительной техники на время выполнения проверки параметров военной техники связи при её техническом обслуживании и текущем ремонте. В известных работах для этого используют приближённые значения вероятности безотказной работы средств измерительной техники, что снижает точность полученных результатов. В полевых условиях необходимо учитывать метрологическую надежность средств измерительной техники, которая зависит от температуры, влажности, вибрационных нагрузок и других факторов. Время определения технического состояния военной техники связи регламентировано руководящими документами, поэтому для планирования эффективной работы специалистов во время ее технического обслуживания и текущего ремонта в процессе разработки метрологического и диагностического обеспечения необходим учет всех факторов, влияющих на значения показателей ремонтопригодности. Предложено использовать функциональные зависимости среднего времени восстановления военной техники связи от показателей качества метрологического и диагностического обеспечения. Приведены примеры использования результатов исследования для количественной оценки показателей ремонтопригодности реальных образцов военной техники связи и показан выигрыш в точности расчета среднего времени их восстановления. Полученные результаты позволяют более объективно оценить время выполнения работ и обоснованно выбирать средства измерительной техники.

**Ключевые слова:** военная техника связи; средства измерительной техники; метрологическое обеспечение.

UDC 621.373.54 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.18**

V. Kravchenko [1], V. Breslavets [1], I. Yakovenko [1], Qiu Jing Hui [2]

[1] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] Harbin Institute of Technology, Harbin, China

# EXTRANEOUS ELECTROMAGNETIC RADIATION IMPACT ON WAVEGUIDE CHARACTERISTICS OF A SEMICONDUCTOR SUPERLATTICE

**The subject** matter is the mechanisms of emergence of instabilities in natural oscillations of semiconductor supertattices caused by their interaction with charged particle flows of extraneous electromagnetic radiation. **The aim** is calculating ratios to determine a degree of deviation of operating characteristics of semiconductor components from the norm, depending on the parameters of extraneous pulsed electromagnetic radiation. **The objective** is to model how currents that are induced with extraneous EMR interact with electrostatic oscillations of a semiconductor supertattice, using an implementation of (Cherenkov) resonance interaction of moving charges with electromagnetic oscillations under conditions where the phase velocity of the wave and the velocity of the charged particle are the same. **The methods used**: analytical methods for solving Maxwell's equations and medium equations in a framework of hydrodynamic approach. **The following results are obtained.** We have studied semiconductor components of electronic equipment (supertattices) being exposed to strong pulsed electromagnetic fields. The study was focused on the nature of changes in the working capacity of the components. We show that the effect of pulsed electromagnetic radiation is accompanied by an emergence of currents in the conductive hardware elements and an emergence of internal fields within them. One kind of reversible failures of semiconductor hardware elements is determined, based on interaction of extraneous radiation induced currents with the intrinsic fields of the supertattices of the hardware components. Similar failures occur under conditions of Cerenkov radiation (when the current is parallel to the structure boundary). It is shown that such interaction leads to energy losses in the induced currents spent to excitation of natural oscillations of the supertattice, i.e. to emergence of an oscillation generation mode that is characterized with a change in the volt-ampere characteristics of the hardware. **Conclusion.** The results obtained in this work can be used to evaluate the efficiency of active radio electronic devices (amplifiers, generators and converters of electromagnetic oscillations in the millimeter and sub-millimeter ranges) being exposed to extraneous pulsed electromagnetic fields. The comparative analysis of quantitative evaluations of reversible failures of semiconductor devices in dependence on the spatial configuration of the acting field (induced current parallel to the structure boundary) allows solving problems in optimizing the degree of distortion of the performance characteristics of these devices.

**Keywords:** electromagnetic radiation; semiconductor structures; surface oscillations; charged particles; vibration decrement.

## Introduction

Most of the available theoretical and experimental studies of the impact electromagnetic radiation (EMR) has on radio equipment consider irreversible failures. (As you know, all types of failures that arise in electronic devices are usually divided into reversible and irreversible [1-4]). An irreversible failure mean complete loss of the device's functional characteristics. It occurs when the device performance changes beyond the permissible limits (in case of extraneous electromagnetic radiation, irreversible failures usually arise due to thermal breakdown of the components).

The mechanisms of irreversible failures that arise because of interaction of EMR induced currents and voltages with the processes characterizing functional purposes of the devices are usually modelled within the framework of the theory of circuits with distributed parameters. This approach allows evaluating working capacity criteria in general (for example, estimating the critical energy level characterizing a thermal breakdown),

At the same time, for reversible failures, consisting in a temporary loss of working capacity, using circuit theory does not allow determining the distortion of the output characteristics of radio devices. Therefore, most of the problems associated with determining the mechanisms of reversible failures resulting from the impact induced currents have on operability of radio devices, remain open.

This paper compensates to some extent the existing knowledge gap in this area of research on reversible failures. It studies how charged particle fluxes induced by EMR interact with wave processes in semiconductor structures of modern microwave electronics.

## Task solution

The object of the study is a periodic structure consisting of semiconductor wafers (semiconductor superlattice). It is assumed that a flow of charged particles emerges in the structure because of EMR. The flow loses some of its energy spent on excitation of electromagnetic oscillations in the structure. The dispersion characteristics of the structure and the mechanisms of interaction between a flow of charged particles and electrostatic oscillations are investigated in this article. We have obtained equations for natural frequencies and determined the energy losses occurring in the currents because of excitation of EMR in millimeter and submillimeter ranges of electromagnetic waves.

Let a monoenergetic neutral flux of charged particles with density $n_0$ pass with constant velocity $v_0$ through a periodic structure (with period $q$) consisting of alternating plasma layers $d_1$ and $d_2$ that differ in dielectric constant concentrations of conduction electrons $N_{01}$ and $N_{02}$. Let us determine the spectrum and attenuation (increase) of electromagnetic oscillations of such a system. We select the reference system in such a way that X- and Y-axes are parallel and Z-axis is per-

pendicular to the interface. Note that the energy a charged particle loses passing through a layered dielectric were first considered in [5].

To describe electromagnetic properties of a structure consisting of plasma layers, neglecting the delay effects, we use the following system of equations:

$$\begin{aligned} &rot\ \vec{E} = 0 \quad ; div[\varepsilon_0(z)\vec{E} = 4\pi e(N+n);\\ &\frac{\partial N}{\partial t} + div[N_0(z)\vec{u}] = 0\ ; m\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = e\vec{E};\\ &\frac{\partial n}{\partial t} + div(n_0\vec{v} + \vec{v}_0 n)\ ; m(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + v_0\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}) = e\vec{E}. \end{aligned} \quad (1)$$

Here $n(r,t), N(r,t), v(r,t), u(r,t)$ are the perturbed concentrations and velocities of the electrons of the beam and of the stationary plasma; $\varepsilon_0(z)$ and $N_0(z)$ are periodic functions that get values $\varepsilon_{01;02}$ and $N_{01;02}$ within the limits of $d = d_1 + d_2$. The indices *1* and 2 mean that the quantities in the equations (4) relate to the layers with thickness indexes *1* and 2 correspondingly. In the following, we have to introduce a scalar potential $\phi(r,t); (\vec{E} = -\vec{\nabla}\phi)$. At the interface, the following conditions of continuity of potentials and total currents $J_i$ (displacement and conductivity) are satisfied:

$$\phi_1(0) = \phi_2(0); \quad J_1(0) = J_2(0), \quad (2)$$

where $J_i = \frac{\varepsilon_{0i}}{4\pi}\frac{\partial E_{iz}}{\partial t} + e(N_{0i}u_{iz} + n_0 v_{iz} + v_0 n_i)$

Taking into account space-charge waves (SCW) that emerge in the structure due to a moving particle flux, there is a need for additional boundary conditions. We define the conditions using continuous flows of charged particles and their impulses. These conditions have the following form:

$$n_1(0) = n_2(0); \quad v_{1z}(0) = v_{2z}(0). \quad (3)$$

Using the property of translational symmetry $\phi(z+d) = \phi(z)\exp(ikd)$ (where $k$ is an arbitrary wave vector), one can represent the boundary conditions on the layer separating planes as follows:

$$\begin{aligned} &\phi_1(d_1) = \phi_2(-d_2)\exp(ikd); J_1(d_1) = J_2(d_2)\exp(ikd);\\ &n_1(d_1) = n_2(-d_2)\exp(ikd); v_{1z}(d_1) = v_{2z}(-d_2)\exp(ikd). \end{aligned} \quad (4)$$

With assumption that all the variables are exponentially dependent on the coordinates and time, it is easy to obtain a solution for the equations in each layer. Using boundary conditions (2) - (3), undefined constants can be eliminated and a dispersion equation can be obtained that relates the frequency, wave vectors $\omega, q_{x,y}, k$ and the parameters of the medium.

Consider a one-dimensional case: $q_x$; $q_y = 0$. The solution of the system of equations (1) in the i-th layer has the following form:

$$\begin{aligned} \phi_i(z) &= A_i z + B_i + \frac{4\pi e^2 v_0}{\varepsilon_i}\left[\frac{C_i\exp(i\lambda_i z)}{(\omega + v_0\lambda_i)^2} + \frac{F_i\exp(-i\lambda_i z)}{(\omega - v_0\lambda_i)^2}\right]\times\\ &\times\exp(i(\omega/v_0)z);\\ E_i &= -A_i - \frac{4\pi i e v_0}{\varepsilon_i}[\frac{C_i\exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0\lambda_i} + \frac{F_i\exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0\lambda_i}]\times\\ &\times\exp(i(\omega/v_0)z);\\ n_i &= (C_i\exp(i\lambda_i z) + F_i\exp(-i\lambda_i z))\cdot\exp(i(\omega/v_0)z);\\ v_i &= -\frac{4\pi e^2}{m\lambda_i\varepsilon_i}\left[\frac{C_i\exp(i\lambda_i z)}{\omega + v_0\lambda_i} - \frac{F_i\exp(-i\lambda_i z)}{\omega - v_0\lambda_i}\right]\times\\ &\times\exp(i(\omega/v_0)z) + eA_i/(im\omega). \end{aligned} \quad (5)$$

Here $\varepsilon_i = \varepsilon_{0i} - \omega_{0i}^2/\omega^2$; $\lambda_i = \omega_0/\left(v_0\sqrt{\varepsilon_i}\right)$; $\omega_{0i}$; $\omega_0$ – Langmuir frequencies of electrons of stationary plasma and $A, B, C.F$ beam are arbitrary constants. It is evident that the potential contains terms of various kinds. The first and the second terms represent a solution of Laplace equation $\partial^2\phi/\partial z^2 = 0$, the third and fourth terms are the potentials induced with the SCW. It is easy to verify that solutions $A_i = 0$ are possible for the boundary conditions because in this case $J_i(z)$ identically vanishes, the concentration and velocity of the particles depend on constants $C, F$ and the boundary conditions for the potentials (3) and (4) allow determining $B_1, B_2$ through $C, F$. In this case, we can obtain the following dispersion equation from the boundary conditions:

$$\begin{aligned} &\cos(\omega/v_0 - k)d = \cos\lambda_1 d_1\cos\lambda_2 d_2 -\\ &-\left(\lambda_1^2 + \lambda_2^2\right)/\left(2\lambda_1\lambda_2\right)\cdot\sin\lambda_1 d_1\sin\lambda_2 d_2. \end{aligned} \quad (6)$$

This equation was first obtained in [6], where the possibility of emergence of unstable states was shown. At the same time, in [10], the natural vibrations that are related to the frequency dispersion of the dielectric permutation and exist in the structure in absence of a beam were not taken into account.

In a case of a small beam density $\lambda_1 d_1 << 1$; $\lambda_2 d_2 << 1$, equation (6) transforms to:

$$\cos(\omega/v_0 - k)d = 1 - \omega_0^2 d^2/\left(2v_0^2\varepsilon_{zz}\right), \quad (7)$$

where $\varepsilon_{zz}(\omega) = d\varepsilon_1\varepsilon_2/(d_1\varepsilon_2 + d_2\varepsilon_1)$ is a component of a permittivity tensor of a finely dispersed medium.

In the case of a weak spatial dispersion: $\omega d/v_0 << 1$; $kd << 1$ in equation (7), we get:

$$(\omega/v_0 - k)^2 = \omega_0^2/\left(v_0^2\varepsilon_{zz}\right). \quad (8)$$

The dispersion law of oscillations has the same form as in a homogeneous medium whose dielectric permittivity is equal to $\varepsilon_{zz}(\omega, d_1, d_2)$. From equation (8), in approximation of a low beam density, we get:

$$\Delta\omega^2 = \omega_0^2/(\varepsilon_{zz}(\omega = kv_0)); \quad \Delta\omega << kv_0. \quad (9)$$

In this case, the frequency of oscillations is determined by the flight time of a particle through the spatial period of the structure $\tau = d/v_0$. While $l$ is equal to the

ratio of the flight time to the period of oscillations. The oscillations become unstable under condition of $\varepsilon_{zz} < 0 \quad (\Delta\omega^2 < 0)$, i.e. the dielectric permittivity of at least one of the layers must have frequency dispersion and be negative. Let $\varepsilon_2 > 0, \varepsilon_1 < 0$. Then it follows from (8) - (9) that

$$\Delta\omega^3 = \omega_0^2 \omega_{p1} d_1 \big/ (2\varepsilon_{01} d). \qquad (10)$$

The instability increment

$$\mathrm{Im}\,\Delta\omega = \frac{\sqrt{3}}{2}\left(\omega_0^2 \omega_{p1} d_1 \big/ (2\varepsilon_{01} d)\right)^{1/3}$$

where $\omega_{p1} = \omega_{01} \big/ \sqrt{\varepsilon_{01}}$.

If $\omega = kv_0$ then we have instability under conditions of Cherenkov's resonance with an increment that is $(d_1/d_2)^{1/3}$ times less than in a homogeneous plasma. In the case of $\omega_p = (2\pi v_0/d)\cdot l$, the instability relates to Cerenkov's parametric radiation of a charged particle [7]. It follows from (8) that instability also arises when $\varepsilon_{zz}$ is a complex value and $\mathrm{Re}\,\varepsilon_{zz} > 0$.

The studied model of the interaction between induced currents and oscillations in semiconductor components of electronic radio equipment is quite universal and allows considering a number of interesting particular cases in experiments to determine criteria of resistance to reversible failures.

## Analysis

Table 1 contains numerical estimates of instability increments of intrinsic electromagnetic oscillations of semiconductor-layered structures caused by their interaction with charged particle fluxes induced by extraneous EMR. The results are provided for a number of semiconductor structures [7] being used in modern microwave electronics.

The amplitude of current is $J \approx 100\mu\mathrm{A}$ and the rectangular pulse duration is 1 μs.

*Table 1.* **Characteristics of MOS Structure**

| MOS Structure | Concentration of carriers $n_0$, $(\mathrm{cm})^{-3}$; superlattice thickness $d$, (cm) | Instability increment $\delta\omega, (s^{-1})$ |
|---|---|---|
| Au-$Si_3N_4$-GaAs | $n_0 = 5\times10^{14}$ $d = 3\times10^{-4}$ | $\delta\omega = 2\times10^{11}$ |
| Au-$Al_2O_3$-AlGaAL | $n_0 = 1{,}3\times10^{15}$ $d = 2\times10^{-4}$ | $\delta\omega = 4{,}7\times10^{11}$ |
| Au-$SiO_2$-CuInAs | $n_0 = 3{,}6\times10^{14}$ $d = 9\times10^{-5}$ | $\delta\omega = 5{,}2\times10^{11}$ |
| Au-$Si_3N_4$-AlGaAL | $n_0 = 1{,}2\times10^{15}$ $d = 3\times10^{-3}$ | $\delta\omega = 2{,}9\times10^{11}$ |
| Au-$Si_3N_4$-Si | $n_0 = 3\times10^{15}$ $d = 1{,}6\times10^{-4}$ | $\delta\omega = 3{,}2\times10^{11}$ |
| Au-$Al_3O_2$-Si | $n_0 = 3\times10^{15}$ $d = 3{,}6\times10^{-5}$ | $\delta\omega = 2\times10^{11}$ |
| Au-$SiO_2$-Si | $n_0 = 3\times10^{15}$ $d = 3\times10^{-4}$ | $\delta\omega = 6{,}1\times10^{11}$ |

## Conclusions

A model is proposed here for interaction between extraneous EMR induced currents and electrostatic oscillations of a semiconductor superlattice basing on an implementation of resonance (Cherenkov) interaction between moving charges and electromagnetic oscillations under conditions of the phase velocity of the wave and the velocity of a charged particle being the same. Ratios are calculated that relate a value of the instability increment to the magnitude of the induced currents and such parameters of the MOS structures as free carrier concentration, dielectric constant and structure dimensions. The quantitative estimates show that the value of the radiation energy falls within the sensitivity range of modern receivers of submillimeter radiation.

REFERENCES


1. Averkov, Yu.O. and Yakovenko, V.M. (2009), "Transition radiation of a modulated electron beam crossing a wire screen", *Radiophysics and Electronics*, Vol. 14, No. 3, pp. 337-343.
2. Averkov, Yu.O. and Yakovenko, V.M. (2009), "'Excitation of surface electrostatic waves in semibounded layered superconductors by a nonrelativistic electron beam", *ZhTF*, Vol. 79, No. 5, pp. 87-94.
3. Vavriv, D.M., Suchkov, G.M., Vinogradov, V.V., Volkov, V.A., Kozhin R.V. and Alekseev, E.A. (2002), "Electromagnetic-acoustic thickness measurer for thin-walled tubes testing", *Defektoskopiya*, No. 10, pp. 7-13.
4. Sebko, V.P., Suchkov, G.M. and Alekseev, E.A. (2002), "Optimization of parameters of electromagnetic-acoustic (EMA) thickness measurers for thin articles testing", *Defektoskopiya*, No. 12, pp. 21-28.
5. Averkov, Yu.O., Bass, F.G. and Yakovenko, V.M. (2009), "Excitation of surface excitons in semi-bounded solids by a nonrelativistic electron beam", *FTT*, No. 51 (1), pp. 57-64.
6. Kravchenko, V.I., Yakovenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2009), "Impact of extraneous factors on semiconductor components of electronic radio-devices", *Vestnik_NTU "KhPI"*, NTU "KhPI", Kharkiv, No. 11, pp. 62-69.
7. Beletsky, N.N., Khankina, S.I., Yakovenko, V.I. and Yakovenko, I.V. (2010), "Interaction between surface plasmons amd charged particle flows passing through the interface", *ZhTF*, Vol. 80, No. 4, pp. 120-125.

8. Khankina, S.I., Yakovenko, V.I. and Yakovenko, I.V. (2011), “Electronic states on an uneven surface of a solid body surface”, *FNT*, Vol. 37, No. 11, pp. 1148-1155.
9. Kravchenko, V.I., Korobko, A.I. and Yakovenko, I.V. (2014), “Influence of external electromagnetic factors on waveguide characteristics of semiconductor components of electronic devices”, *Vestnik NTU "KhPI"*, NTU "KhPI", Kharkiv, No. 21, pp. 79-84.
10. Kravchenko, V.I. and Yakovenko, I.V. (2014), “Mechanisms of failure of semiconductor components of electronic products under the influence of external electromagnetic radiation”, *Vestnik NTU "KhPI"*, NTU "KhPI", Kharkiv, No. 21, pp. 84-88.

Received (Надійшла) 23.02.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.04.2018

**Вплив стороннього електромагнітного випромінювання на хвильові характеристики напівпровідникової решітки**

В. І. Кравченко, В. С. Бреславець, І. В. Яковенко, Чу Цзинь Куй

**Предметом** вивчення є механізми виникнення нестійкостей власних коливань напівпровідникових надґраток, обумовлених їх взаємодією з потоками заряджених частинок в умовах впливу зовнішнього електромагнітного випромінювання. **Мета** - отримання розрахункових співвідношень, які дозволяють визначати ступінь відхилення робочих характеристик напівпровідникових комплектуючих від норми в залежності від параметрів зовнішнього імпульсного електромагнітного випромінювання. **Задача** - отримання моделі взаємодії наведених зовнішнім електромагнітним випромінюванням струмів з електростатичними коливаннями напівпровідникової надґратки, заснованої на реалізації резонансної (черенковської) взаємодії рухомих зарядів і електромагнітних коливань в умовах, коли збігаються фазова швидкість хвилі і швидкість зарядженої частинки. Використовувані **методи**: аналітичні методи рішення рівнянь Максвелла і рівнянь середовища в рамках гідродинамічного підходу. Отримано наступні **результати.** Проведено дослідження функціонування напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів (надґраток) в умовах впливу потужних імпульсних електромагнітних полів. Вивчено характер змін працездатності напівпровідникових комплектуючих елементної бази технічних засобів. Показано, що вплив імпульсного електромагнітного випромінювання супроводжується виникненням струмів в провідних елементах виробів і виникненням їх внутрішніх полів. Визначено один з типів оборотних відмов напівпровідникової елементної бази електрорадіовиробів, заснований на взаємодії струмів, наведених зовнішнім випромінюванням, з власними полями надґраток, що комплектують виріб. Подібні відмови реалізуються в умовах черенковського випромінювання (струм паралельний до кордонів структури). Показано, що дана взаємодія призводить до енергетичних втрат наведених струмів на збудження власних коливань надґраток, тобто появі режиму генерації коливань, який характеризується зміною вольт-амперних характеристик радіовиробів. **Висновки.** Результати, отримані в роботі, можуть бути використані при оцінці працездатності активних радіоелектронних приладів (підсилювачів, генераторів і перетворювачів електромагнітних коливань міліметрового та субміліметрового діапазонів) в умовах впливу зовнішніх імпульсних електромагнітних полів. Проведений в роботі порівняльний аналіз кількісних оцінок оборотних відмов напівпровідникових приладів в залежності від просторової конфігурації поля, що впливає (наведений струм паралельний до кордонів структури), дозволяє вирішувати задачі оптимізації ступеня спотворення робочих характеристик даних приладів.

**Ключові слова:** електромагнітне випромінювання; напівпровідникові структури; поверхневі коливання; заряджені частинки; декремент коливань.

**Влияние стороннего электромагнитного излучения на волноводные характеристики полупроводниковой решетки**

В. И. Кравченко, В. С. Бреславец, И. В. Яковенко, Чу Цзинь Куй

**Предметом** изучения являются механизмы возникновения неустойчивостей собственных колебаний полупроводниковых сверхрешеток, обусловленных их взаимодействием с потоками заряженных частиц в условиях влияния внешнего электромагнитного излучения. **Цель** - получение расчетных соотношений, позволяющих определять степень отклонения рабочих характеристик полупроводниковых комплектующих от нормы в зависимости от параметров внешнего импульсного электромагнитного излучения. **Задача** – получение модели взаимодействия наведенных внешним электромагнитным излучением токов с электростатическими колебаниями полупроводниковой сверхрешетки, основанной на реализации резонансного (черенковского) взаимодействия движущихся зарядов и электромагнитных колебаний в условиях, когда совпадают фазовая скорость волны и скорость заряженной частицы. Используемые **методы**: аналитические методы решения уравнений Максвелла и уравнений среды в рамках гидродинамического подхода. Получены следующие **результаты**. Проведены исследования функционирования полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий (сверхрешеток) в условиях воздействия сильных импульсных электромагнитных полей. Изучен характер изменений работоспособности полупроводниковых комплектующих элементной базы технических средств. Показано, что влияние импульсного электромагнитного излучения сопровождается возникновением токов в проводящих элементах изделий и возникновением их внутренних полей. Определен один из типов обратимых отказов полупроводниковой элементной базы электрорадиоизделий, основанный на взаимодействии токов, наведенных внешним излучением, с собственными полями сверхрешеток, комплектующих изделие. Подобные отказы реализуются в условиях черенковского излучения (ток параллелен границе структуры). Показано, что данное взаимодействие приводит к энергетическим потерям наведенных токов на возбуждение собственных колебаний сверхрешеток, т.е. появлению режима генерации колебаний, который характеризуется изменением вольт–амперных характеристик радиоизделий. **Выводы**. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при оценке работоспособности активных радиоэлектронных приборов (усилителей, генераторов и преобразователей электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов) в условиях воздействия внешних импульсных электромагнитных полей. Проведенный в работе сравнительный анализ количественных оценок обратимых отказов полупроводниковых приборов в зависимости от пространственной конфигурации воздействующего поля (наведенный ток параллелен границе структуры) позволяет решать задачи оптимизации степени искажения рабочих характеристик данных приборов.

**Ключевые слова**: электромагнитное излучение; полупроводниковые структуры; поверхностные колебания; заряженные частицы; декремент колебаний.

UDC 621.391 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.19**

I. Romanenko [1], A. Shyshatskyi [1], O. Kuvshinov [2], R. Pikul [3]

[1] Central research Institute of weapons and military equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[2] Management of normative and methodological support and monitoring of the possession, use and disposal of real estate and land, Kyiv, Ukraine
[3] Military unit A 0351, Kyiv, Ukraine

# METHODS OF PREVIOUS CODING, THAT USES IN SYSTEMS OF RADIO SPECIAL PURPOSE WITH MASSIVE-MIMO TECHNOLOGY

Modern radiocommunication systems of special purpose function in the conditions of shortage of radio resources and active radio-electronic suppression. One of the ways to increase noise immunity, bandwidth and capacity of communication networks is using antenna arrays, namely, MASSIVE-MIMO technology. However, the possibilities of this technology are not used in full. In order to increase the efficiency of the using of MASSIVE-MIMO technology, the authors of this article are considered methods of pre-coding. The analysis is intended to decompose existing methods of pre-coding for the further development of highly effective algorithms of pre-coding. In the above scientific work, the authors of the article uses the basic provisions of the theory of communication, the theory of signals, the theory of noise immunity, as well as the theory of antennas. According to the results of the research, the authors draw the following conclusions: the matrices of the previous coding, which have the same right singular vectors, which are the optimal for all criteria; the main difference between the previous coding algorithms, that can be obtained by various synthesis criteria is the different distribution of the radiated power between the spatial rays. Thus, the analysis showed, that thanks to the identical structure of the work of linear pre-coders, it is possible to carry out a dynamic change on the transmission side of the type of the linear pre-coder, thereby adaptively modifying the characteristics of the transmission and transmission path, while remaining within the framework of practically one structure of the communication channel.

**Keywords:** Massive-MIMO, previous coding, signaling situation.

## Introduction

In the modern wireless systems, MIMO technology (Multiple Input Multiple-Output) is widely using. This technology involves the using of several antennas on the transmitting and receiving sides, which makes it possible to realize the spatial diversity of signals at reception and transmission, as well as multiplexing of transmitted information [1-8] in radio networks.

The effect of using of the spatial diversity is related to the reception or transmission of the same signal by several antennas. In a fading channel, it allows receiving on the receiving side several versions of the transmitted signal and, due to their statistical processing, more accurately detect the signal.

Recently, a series of publications dedicated to Massive-MIMO technology, technologies “with a large number of antenna elements” (4×8, 16×8, etc.) [9-13] appeared.

In this case, the antennas can be combined into compact-local groups (sublattices) or have the form of a distributed antenna system on an antenna system of arbitrary plurality of antenna elements, including fractal topologies, that can overlap, but without using of common antenna emitters [10].

Using of Massive-MIMO technology can increase the capacity of radiocommunication networks, their throughput and noise immunity[9-13].

Increasing the bandwidth of Massive-MIMO radio communication systems, while preserving the quality of reception requires the solution of the problem of efficient management of the available spatial-frequency-time resources of these systems. The problem of adaptation of modern radiocommunication networks, including the Massive-MIMO networks, to external conditions, is actively explored in recent years [9-18].

Spatial multiplexing and spacing are contradictory to the geometry and probabilistic characteristics of the channel matrix. Theoretically proved [9-18], that if the channel information is available only to the receiver, then there is a fundamental trade-off between multiplexing and spacing, in which one can not increase one and not reduce another. The situation changes if we assume, that some parameters of the communication channel are known on the transmitting side and can be used to construct the corresponding spatial signal-code structure.

In fact, such systems assume the presence of a reverse link, and the procedure for the formation of an optimal signal-code structure in these conditions is called spatial pre-coding.

In previous publications, the authors of the article noted, that the using of information on the state of the communication channels on the transmitting side can significantly increase both, the energy and frequency efficiency of special purpose radio systems, improve the coverage area and reduce the complexity of the implementation of the receiver system using Massive-MIMO [9-13].

In the general case, linear pre-coding can be considered as one of the methods of spatial-temporal coding. It should be borne in mind, that for the linear pre-coding, the presence of feedback is mandatory, since the matrix of the previous coding is selected, based on the status of the channel [9-13].

Therefore, the purpose of the article is to analyze the methods of pre-coding in radio communication systems, using Massive-MIMO technology.

## Presentation of the main material

The physical essence of the previous encoding in Massive-MIMO radio communication systems is ,that the pre-coding allows you to reconcile the transmitted signal with the characteristics of the communication channel. This results in improved performance compared to the system without such an agreement.

In the case, where the complex matrix of channel **H** is accurately known on the transmitting side, an optimal pre-coding can be done, which is to linearly transform the vector of symbols transmitted, using the unitary matrix **V**, which depends on the matrix **H**.

The matrix **V** is part of the singular expansion of the matrix **H** [1-4]:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\Lambda\mathbf{V}', \quad (1)$$

where $\mathbf{U}, \mathbf{V}$ – unitary dimension matrices of $M \times M$ and $N \times N$ respectively; $\Lambda = diag\{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_r\}$ – diagonal matrix of $M \times N$ size, on the main diagonal of which has its own numbers $\lambda_i, i = 1, ..., r$ matrix **H**; $r = \min\{N, M\}$.

With optimal pre-coding, the best characteristics of the Massive-MIMO radio communication system are achieved, due to the fact, that the system in this case is decomposed into a plurality of parallel systems SISO (Single Input Single Output), the minimal complexity of the demodulation algorithm is provided. on the reception side [1-18].

Unfortunately, in practice, the implementation of optimal pre-coding is quite problematic, because the matrix of the channel **H** is always evaluated with some error, especially in a situation, where channel parameters change rapidly, due to the high mobility of subscribers. Therefore, in modern radio systems in practice, various quasi-optimal algorithms of pre-coding are used [1-18]. In the quasi-optimal algorithms indicated on the transmitting side, instead of full information about the state of the channel contained in the matrix **H**, only partial information about the status of the communication channel is used. The indicated partial information may be in the form of one or more parameters, that characterize the current state of the communication channel or only its statistics (the law of fading, the distribution of power between the direct and reflected beam in the channel).

To date, there are three main ways to get information about the state of the communication channel:

- using of the mutual linearity of the communication channel;
- using the feedback line between the transmitter and the receiver;
- combination of the first and second methods.

We shall now confine ourselves to considering linear coding algorithms.

Consider the radiocommunication system using Massive-MIMO technology, the structure of which is shown on fig. 1.

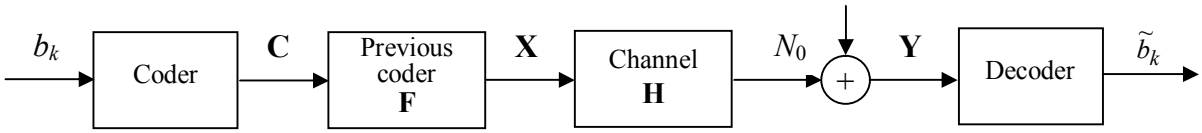



**Fig. 1.** Generalized description of the system Massive-MIMO

In the indicated scheme on the transmitting side, after the encoder (which here includes the modulator), the signal is subjected to linear transformation using the matrix **F** and then enters the Massive-MIMO communication channel with the channel matrix **H**. The linear transformation matrix **F** defines the linear pre-coding algorithm.

The type of encoder and modulator has a significant effect on the structure of the previous coding algorithm. In the synthesis of pre-coding algorithms, two architectures of the MIMO communication system are usually considered:

- Massive-MIMO system with spatial multiplexing. In such a system, independent information flows are transmitted through all antennas, in which a separate adaptation of the transmission rate for each transmitting antenna is possible, using the information on the state of the communication channel available on the transmitting side;
- Massive-MIMO system with spatial-temporal encoding.

The pre-coding procedure based on the using of the communication channel status, information available on the transmitting side provides two functions: splitting the transmitted signal into independent spatial flows (rays); - distribution of the power of emitted signals between these spatial flows (rays).

If spatial flows (rays) exactly correspond to the own (singular) vectors of the matrix **H** of the channel, then there are no interferences between these flows. The transmission of information by a communication channel in this case is carried out in parallel in several independent spatial channels, and for realization of such an ideal data transfer, it is necessary, that on the transfer side accurate information about the current state of the communication channel.

If on the transmitting side, the information about the communication channel is known only partially, then in the previous encoding, the spatial flows (rays) were formed in such a way as to minimize the level of interference between them. It should be noted, that as the number of transmitting antennas increases, the number of degrees of freedom increases, which allows for a more significant energy gain from the previous coding, which confirms the additional advantage of using Massive-MIMO technology in comparison with the classical MIMO technology.

The signal model in the Massive-MIMO communication system with linear pre-coding can be given in the following form:

$$\mathbf{Y}=\mathbf{HFC}+N_0, \quad (2)$$

where **H** is the matrix channel, $N_0$ is the white gaussian noise with spectral density of power

$$G(f)=G_0;\ \ 0<f<\infty, \quad (3)$$

**F** is the pre-coded channel matrix, **C** is the code matrix of the channel. This model is valid for both spatial multiplexing and spatial-temporal coding. Consider the basic criteria, used to synthesize the previous coding algorithm, the criteria, that allow us to determine the optimal matrix of the previous coding **F** [6-19].

***Criterion of mutual information.*** It is known, that the mutual information between the input and output signals of the communication system channel using the Massive-MIMO technology is described by the following expression [20]:

$$\mathbf{I(X, Y)}=\log_2 \det(1+Q^2\ \mathbf{HFUF'H'}), \quad (4)$$

where $Q^2=E_c/G_0$ is the ratio of the signal energy to the spectral density of the power of the receiver's own noise, **U** is the correlation matrix of code matrix.

As shown in [21], the bandwidth of the Massive-MIMO channel is determined by maximizing the mutual information under the condition of the constancy of the radiated power. Then, the criterion of mutual information has the form:

$$\max_{tr(\mathbf{FF}')=1} \mathbf{EH}\left\{\log_2\ det\left(1+Q^2\mathbf{HFUF'H'}\right)\right\}, \quad (5)$$

where $tr(\cdot)$ is the step operator.

***Criterion for minimizing the avarage square error.*** The expression for the correlation matrix of demodulation errors, optimal for the criterion of the minimum of the avarage square error, has the form:

$$R_{MASE}=\left(1+Q^2\mathbf{HFUF'H'}\right)^{-1}. \quad (6)$$

The criterion for minimizing the avarage square error is to find such a matrix of pre-coding, in which the minimum value is ensured of the average square of the error ε demodulation [21, 22]:

$$\min_{tr(\mathbf{FF}')=1} E_{\mathbf{H}}\left\{tr\left[\left(1+Q^2\mathbf{HFUF'H'}\right)^{-1}\right]\right\}. \quad (7)$$

I would like to note, that the criteria (5) and (6) considered require averaging over the distribution of random elements of the matrix, **H** of the communication channel of some function $f(...)$ matrix argument $1+Q^2\mathbf{HFUF'H'}$, which depends on the type of criterion:

$$\max_{tr(\mathbf{FF}')=1} E_{\mathbf{H}}\left\{f\left(1+Q^2\mathbf{HFUF'H'}\right)\right\}, \quad (8)$$

where $f(...)=\log_2\det(...)$ when using the criterion of mutual information, and $f(...)=tr\left[(...)^{-1}\right]$ is using the criterion of the minimum of the square root error. Calculation of mathematical expectation $E_{\mathbf{H}}\{...\}$ is a rather complicated operation, which limits the practical using of the criteria (4) and (6).

In this regard, it is quite attractive in terms of simplifying the criteria implementation, in which the calculation of mathematical expectation is not used. These criteria include the minimum criterion for the probability of a double error codeword (Pairwise codeword Error Probability – PEP). For the case, where the Massive-MIMO communication channel only has a fading correlation on the transmitting side ( $\mathbf{R}_r=1$ ),the following criterion is known [23-31]:

$$\max_{tr(\mathbf{FF}')} tr\left(\overline{\mathbf{H}}\left(\mathbf{R}_t\Psi\mathbf{R}_t'\right)^{-1}\overline{\mathbf{H}}'\right)-M\log_2\det(\Psi),$$

where $\Psi=\left(Q^2/4\right)\mathbf{FBF'}+\mathbf{R}_t^{-1}$; **B** is the matrix of code distances, $\overline{\mathbf{H}}$ is the average value of the channel matrix.

Let's consider on the main types of linear pre-coders used in radio communication systems, using technology Massive-MIMO [23-31].

Provided $tr\left(F^H F\right)=P_0$ where $P_0$ is the total average transmitted power, should be distinguished:

1. A linear pre-coder, that minimizes the receiver's avarage square error (Min-Trace-VSE Loading):

$$\mathbf{F}_{opt}=\arg\min_{\mathbf{F}}\ Tr\left\{MCKII\ (\mathbf{F})\right\}. \quad (9)$$

2. Linear pre-coder, maximizing the minimum value of the matrix SNR (F) (Max Min-Eig-Signal to noise ratio):

$$\mathbf{F}_{opt}=\arg\min_{\mathbf{F}}\ \lambda_{min}\left\{SNR\ (\mathbf{F})\right\}. \quad (10)$$

3. A linear pre-coder, that maximizes the mutual information between transmitted $b_k$ and accepted $\tilde{b}_k$ data (Max-Capasity Loading): $\mathbf{F}_{opt}$

$$\mathbf{F}_{opt}=\arg\max_{\mathbf{F}}\ C\left\{b,\tilde{b}\middle|\mathbf{F}\right\}, \quad (11)$$

where *C* is the bandwidth of the channel.

Their specific choice depends on the channel status, the presence of active interference, the type of selected signals (OFDM, N-OFDM, FHSS, etc.) and the requirements for their demodulation errors..

## Conclusion from this explosion

According to the results of the research, the following conclusions should be made:

1. The matrixes of the previous coding **F**, which are optimal in all of the above criteria and are intended for using in conditions of different volumes of information on the transmitting side of the properties of the Massive-MIMO communication channel, have the same right singular vectors.

On the basis of these vectors, an optimal matrix of pre-coding $\mathbf{V_F}$ is formed, which will be coordinated with the correlation matrix **Q** of the space-time code.

2. The matrixes of the previous coding **F**, which are optimal for the criteria of mutual information and the minimum of the avarage square error, also have the same right singular vectors. These vectors determine the direction of spatial rays, which depend on the transmission channel information available on the transmitting side.

3. The main difference between pre-coding algorithms, that can be obtained by various synthesis criteria is the different distribution of the radiated power between spatial rays.

This power distribution is based on the using of the principle of "pouring water".

4. The algorithm of the previous coding in the optimal way (in the sense of the selected criterion) redistributes the signal strength between the spatial rays, using the information on the communication channel on the transmitting side.

5. Thus, the analysis showed, that thanks to the identical structure of the work of linear pre-coders, it is possible to carry out a dynamic change on the transmission side of the type of the linear pre-coder, thereby adaptively modifying the characteristics of the transmission and transmission path, while remaining within the framework of practically one structure of the communication channel.

The direction of further research is to compare the effectiveness of various methods of pre-coding for systems of radio communication with technology Massive-MIMO and their corresponding improvement.

REFERENCES


1. Slusar, V. (2005), "MIMO systems: principles of construction and signal processing", *Electronics: science, technology, business*, No. 8, pp. 52-58.
2. Dubik, A.N., Slusar, V.I. and Zinchenko, A.A. (2006), "Using of MIMO-systems to improve the reliability of telecommunications critical applications", *Radio electronic and computer systems*, National aerospace university named after M.E. Zhukovskiy "KhAI", Kharkiv, No. 6 (18), pp. 206-209.
3. Slusar, V.I., Masesov, N.A. and Slusar, I.I. (2006), "Increasing of reliability of communication in local wireless networks due to use of methods of space-time signal processing", *Radio electronic and computer systems*, National aerospace university named after M.E. Zhukovskiy "KhAI", Kharkiv, No. 7 (19), pp. 195-198.
4. Bakulin, M.G., Varukina L.A. and Kreyndelin V.B. (2014), *MIMO technology: principles and algorithms*, Hot line – Telecom, Moscow, 244 p.
5. Tsoulos, G. (2006), *MIMO System Technology for Wireless Communications*, Boca Raton, CRC Press, FL, USA, 378 p.
6. Jankiraman, M. (2004), *Space-Time Codes and MIMO systems*, Artech House, MÂ, USA, 327 p.
7. Bessai, H. (2005), *MIMO Signals and Systems*, Springer science and Business Media, USA, NY, 206 p.
8. Kuvshinov, O.V. (2009), "Adaptive management of devices to prevent the protection of military radiocommunication systems", *Collection of scientific works MIKNU*, No. 1, pp. 125-130.
9. Slusar, I.I., Slusar, V.I. and Tarasenko, V.V. (2016), "5th generation communication systems, based on Massive MIMO technology", Abstracts of the fourth international scientific and technical conference "*Problems of informatization*", 3 – 4 November, Cherkasy – Baku – Belsko-Byala – Poltava, pp. 63-64.
10. Slusar, V.I. (2017), "Concerning the adaptive control of Massive MIMO channels", 17-th scientific and technical conference "*Creation and modernization of armament and military equipment in modern conditions*", State scientific and testing center of the Armed Forces of Ukraine, Chernihiv, 07-08 September, pp. 328-329.
11. Slusar, I.I., Slusar, V.I., Deriy, R.S. and Dovbish, R.M. (2017), "Technical aspects of the implementation of advanced MIMO technologies", Abstracts of the fifth international scientific and technical conference "*Problems of informatization*", 13 – 15 November, Cherkasy – Baku – Belsko-Byala – Poltava, pp. 81.
12. Shyshatskyi, A.V. and Zhuk, P.V. (2017), "Perspective of signal-code designs for wireless communication systems of the standard 5G", Scientific-practical conference "*Priority directions of development of telecommunication systems and networks of special purpose*", Application of subdivisions, complexes, communication facilities and automation in ATO" 9 – 10 November (Reports and abstracts), MITI, Kyiv, pp. 269-270.
13. Shyshatskyi, A.V., Bashkirov, O.M. and Kostina, O.M. (2015), "Development of integrated communication and data communication systems for the necessity of the Armed Forces", Scientific and technical magazine "*Armament and military equipment*", CRIME AF of Ukraine, Kyiv, No. 1 (5), pp. 35-40.
14. Biglieri, E., Calderbank, R., Constantinides, A., Goldsmith, A., Paulraj, A. and Poor, H.V. (2007), *MIMO Wireless Communication*, UK: Cambridge Univ. Press, Cambridge, 323 p.
15. Volchkov, V.P. and Shurahov, A.A. (2012), "Investigation of the efficiency of linear precoding algorithms in MIMO systems", *Electrocommunication*, No. 5, pp. 15-16.
16. Yuen, C. and Tjhnng, T.T. (2007), *Communications and Signal processing*. Vol 2. Quasi-Orthogonal Space-Time Codes, Imperial College Press, London, UK; 194 p.
17. Sesia, S., Toufik, I. and Baker M. (2009), LTE-The UMTS Evolution: From Theory to Practice, Wiley Sons, Chichester, U.K., 611 p.
18. Foschini, G.J. and Gans, M.J. (1998), "On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment When Using Multiple Antennas", *Wireless Personal Communications*, Vol. 6, pp. 311-335.
19. Telatar, E. (1999), "Capacity of Multi-Antenna Gaussian Channels", *European Transactions on Telecommunications*, Vol. 10, No. 6, pp. 585-595.
20. Vu, M. and Paulraj, A. (2003), "Some asymptotic capacity results for MIMO wireless with and without channel knowledge at the transmitter", Proc. 37th Asilomar Conf. Sig., *Sys. and Comp. 2003*, Vol. 1, pp. 258-262.

21. Balaban, P. and Salz, J. (1992), “Optimum diversity combining and equalization in digital data transmission with applications to cellular mobile radio. Part I: Theoretical considerations”, IEEE Trans. Commun., Vol. 40, No. 5, pp. 885-894.
22. Jongren, G., Skoglund, M. and Ottersten, B. (2002), “Combining beamformimg and orthogonal space-time block coding”, *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 48, No, 3. pp. 611-627.
23. Haustein, T. and Boche, H. (2003), “Optimal power allocation for MSE and bit-loading in MΓMO systems and the impact of correlation “, *Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol. 4, pp. 405-408.
24. Vu, M. (2006), *Exploiting Transmit Channel Side Information in MIMO Wireless Systems*, Stanford University, PhD. Diss. 2006.
25. Vu, M. and Paulraj, A. (2006), “Optimal linear precoders for MIMO wireless correlated channels with non-zero mean in space-time coded systems”, *IEEE TYans. Signal Processing*, Vol. 54, pp. 2318-2322.
26. Visotsky, E. and Madhow, U. (2001), “Space-time transmit precoding with imperfect feedback”, *IEEE TVans. Inform. Theory*, Vol. 47, No. 6, pp. 2632-2639.
27. Sampath, H. and Paulraj, A. (2002), “Linear precoding for space-time coded systems with known fading correlations”, *IEEE Commun. Lett*, Vol. 6, No. 6, pp. 239-241.
28. Visotsky, E. and Madhow, U. (2001), “Space-time transmit precoding with imperfect feedback”, *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 47, No. 6, pp. 2632-2639.
29. Li, J. and Stoica, P. (2009), *MIMO Radar Signal Processing*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 448 p.
30. Schubert, M. and Boche, H. (2002), “Joint “dirty-paper” precoding and downlink beamforming”, *Proc. IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications*, Prague, Czech Republic, September, 2002.

Надійшла (received) 23.01.2018
Прийнята до друку (accepted for publication) 11.04.2018

**Методи попереднього кодування,
що використовуються у системах радіозв’язку спеціального призначення з технологією Massive-MIMO**

І.О. Романенко, А.В. Шишацький, О.В. Кувшинов, Р.В. Пікуль

Сучасні системи радіозв’язку спеціального призначення функціонують в умовах дефіциту радіоресурсу та активного радіоелектронного подавлення. Одним з шляхів підвищення завадозахищеності, пропускної здатності та ємності мереж зв’язку є використання антенних масивів, а саме технології MASSIVE-MIMO. Проте можливості зазначеної технології використовуються не в повному обсязі. З метою підвищення ефективності використання технології MASSIVE-MIMO авторами зазначеної статті розглянуті методи попереднього кодування. Зазначений аналіз має на меті провести декомпозицію існуючих методів попереднього кодування для подальшої розробки високоефективних алгоритмів попереднього кодування. В зазначеній науковій праці авторами статті використані основні положення теорії зв’язку, теорії сигналів, теорії завадозахищеності, а також теорії антен. За результатами дослідження авторами зроблені наступні висновки: матриці попереднього кодування, що оптимальні по всіх критеріях мають одні й ті ж самі праві сингулярні вектори; основна відмінність між алгоритмами попереднього кодування, які можливо отримати за допомогою різних критеріїв синтезу, полягає в різному розподілі випромінюваної потужності між просторовими променями. Таким чином, проведений аналіз показав, що завдяки однаковій структурі розглянутих у роботі лінійних попередніх кодерів, можливо проводити динамічну зміну на передавальній стороні типу лінійного попереднього кодеру, тим самим адаптивно змінювати характеристики приймально-передавального тракту, при цьому лишаючись в рамках практично однієї структури каналу зв’язку.

**Ключові слова:** Massive-MIMO, попереднє кодування, сигнальна обстановка.

**Методы предварительного кодирования,
используемые в системах радиосвязи специального назначения с технологией Massive-MIMO**

И.О. Романенко, А.В. Шишацкий, А.В. Кувшинов, Р.В. Пикуль

Современные системы радиосвязи специального назначения функционируют в условиях дефицита радиоресурса и активного радиоэлектронного подавления. Одним из путей повышения помехозащищенности, пропускной способности и емкости сетей связи является использование антенных массивов, а именно технологии MASSIVE-MIMO. Однако возможности указанной технологии используются не в полном объеме. С целью повышения эффективности использования технологии MASSIVE-MIMO авторами указанной статье рассмотрены методы предварительного кодирования. Указанный анализ имеет целью провести декомпозицию существующих методов предварительного кодирования для дальнейшей разработки высокоэффективных алгоритмов предварительного кодирования. В указанной научной работе авторами статьи использованы основные положения теории связи, теории сигналов, теории помехозащищенности, а также теории антенн. По результатам исследования авторами сделаны следующие выводы: матрицы предварительного кодирования, оптимальные по всем критериям имеют одни и те же правые сингулярные векторы; основное различие между методами предварительного кодирования, которые можно получить с помощью различных критериев синтеза, заключается в различном распределении излучаемой мощности между пространственными лучами. Таким образом, проведенный анализ показал, что благодаря одинаковой структуре рассмотренных в работе линейных прекодеров, возможно проводить динамическую смену на передающей стороне типа линейного предварительного кодера, тем самым адаптивно изменять характеристики приемо-передающего тракта, при этом оставаясь в рамках практически одной структуры канала связи.

**Ключевые слова:** Massive-MIMO, предварительное кодирование, сигнальная обстановка.

UDC 656.052.16 **doi: 10.20998/2522-9052.2018.1.20**

A. Sotnikov, A. Tantsiura, O. Lavrov

Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine

# CALCULATING METHOD OF ERROR CALCULATIONS OF THE OBJECT COORDINATION BY MEANS OF CONDUCTING PLATFORM FREE INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS OF A UNMANNED AERIAL VEHICLE

A further development of the method of calculating the errors for the coordinates of the binding objects and the angle parameters of the orientation of unmanned aerial vehicles is obtained. Errors of determination of coordinates develop due to the impact of wind gust and turbulence of the atmosphere on light unmanned aerial vehicles. The main feature of the method is the ability to determine the error of the coordinates of the objects, depending on the direction and force of influence on the unmanned aerial vehicle. The magnitude of the external influence determines the value of the deviation from the trajectory of motion. The developed method can be applied with limited mass-size characteristics of an unmanned aircraft. It also determines the values of measurement errors regardless the distance between the points of measurement. Limitation to the application of the method can only be the ability of the appropriate sensors to measure the distance from the unmanned aircraft to the object of anchor. Possibilities of determining the coordinates of an object of binding with accuracy within units of measure are presented. This is achieved by measuring the angular coordinates with sensors of the navigation system accurately within a hundred miliradian. An algorithm for calculating the error of determining the coordinates of the binding object is presented. The algorithm is the further development of the sub-algorithm for calculating the angle parameters of the orientation of an unmanned aerial vehicle relative to the geographical coordinate system. The presented algorithm should be used before the start of the session of the correlation-extreme navigation system. The statistical simulation of the proposed method and algorithm is carried out. The results of the simulation indicate that the magnitude of the error of determining the coordinates of the binding object depends on the accuracy of the measurement of the angular parameters of an unmanned aerial vehicle. The results of the numerical estimation of the errors of measurement of coordinates of the binding objects are presented, depending on the accuracy of the measurement of the angular parameters of the unmanned aerial vehicle. The requirements for the accuracy of measuring the angular parameters of an unmanned aerial vehicle are determined, which provides a high accuracy of measuring the rectangular coordinates of the object of anchor.

**Keywords:** platform free inertial navigation systems, binding object, system of rectangular coordinates, angle of vision.

## Introduction

Depending on the type of aircraft and the tasks assigned to it, the various types platform free inertial navigation systems (PFINS) are used to navigate it [1, 2]. The composition of such PFINS may vary depending on the requirements for their exact characteristics. The work [3, 4] shows the results of the analysis of the characteristics of some typical PFINS. The accuracy of the coordination of such systems varies from 5.5 to 37 km/h. Micromechanical gyroscopes and micromechanical accelerometers are generally used as sensitive elements in systems with low precision [5, 6].

At the same time, the PFINS, which is installed on the light and middle unmanned aerial vehicle (UAV) classes, is subject to the influence of external factors, in addition to the low accuracy of the coordinates. Such factors include turbulence in the atmosphere and wind gusts. This leads to the occurrence of additional errors in the measurement of angular and spatial coordinates of UAV. To solve this problem, algorithms are being developed that compensate the errors of sensitive elements [6].

The algorithm for determining the orientation parameters of PFINS consists of four sub-algorithms [7]:

1. Algorithm for determining the initial matrix of orientation.

2. Algorithm for calculating the matrix of the mutual orientation of the basis associated with UAV. This algorithm can be constructed on the basis of Poisson matrix modified solution of rotation equation or on using intermediate orientation parameters (Rodrigo-Hamilton parameters).

3. Algorithm for calculating the angular parameters of the UAV orientation relative to the geographic coordinate (calculating the true course, roll, pitch).

4. Algorithm for converting the signals received from accelerometers to the geographical coordinate system for the use in the navigation algorithm.

The source of the algorithm information in the inertial orientation system is the angular velocity projection. They are obtained based on the signals of three sensors of angular velocities and calculated projections of the absolute-angular velocity of the geographical triangular [8, 9]. However, the use of PFINS on small and middle UAV has limitations on the mass-grossing characteristics. In this case, the number of sensors can be reduced [10, 11]. This makes it unnecessary to develop an appropriate calculation method and algorithm for determining the standard errors (SER) of the PFINS, in relation to the reduced number of sensors.

**The purpose of the article** is to develop a method of calculation and algorithm for determining the errors of the place of definition of the binding objects and angular coordinates of the UAV.

## The main material

Let's consider the possibility of determining the errors of the PFINS by measuring the distances between the positions of the UAV, from which the measurements of the UAV to the object of bindings (OB) are carried out.

In fig. 1 rectangular coordinate system of the PFINS UAV position relative to OB is presented. It turns out that in order to determine the coordinates of

the OB for geometric reasons it is necessary to determine at least two values of the angles of vision. That is, the measurement of the angle of reference must be made from two different positions of the UAV with known coordinates.

Let's assume that at the time $t_0$ PFINS makes measurements of the angle at a rate at point A. At the time t, PFINS makes measurements of the angle at a rate at point B.

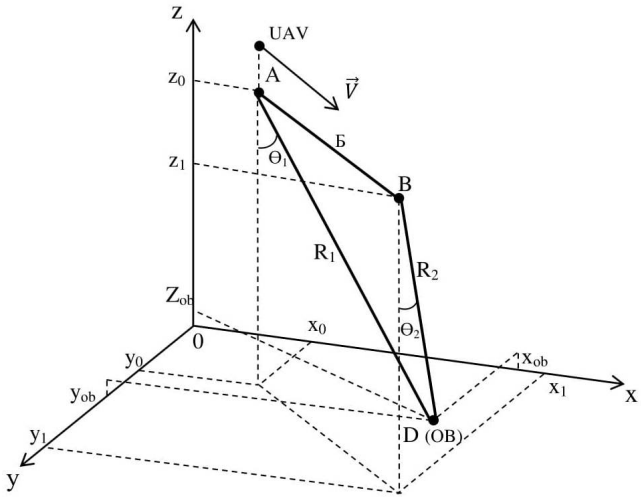



**Fig. 1.** Spatial position of the UAV relatively to the OB in the system of rectangular coordinates

Without lowering the generality of the considerations, it is assumed that the UAV is moving from point A to point B only in the area xz with the coordinate x. Then the geometric conditions of the OB's visibility will be represented in accordance with fig. 2.

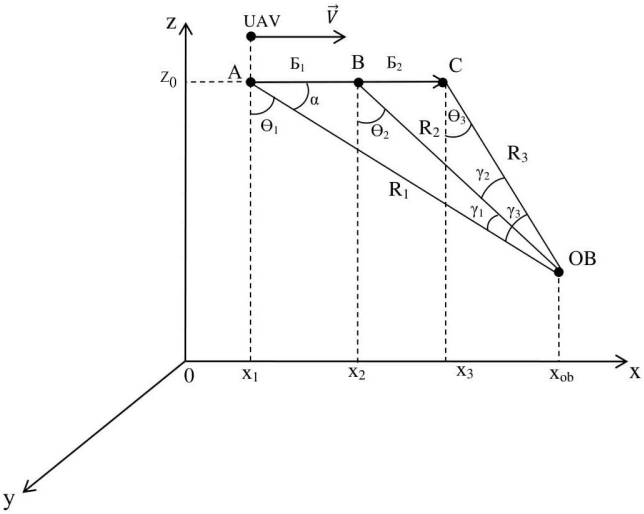



**Fig. 2.** Spatial position of UAV relatively to the OB in the area zx

Let's determine the coordinates of the OB relatively to the positions of the UAV at different times. For this we will consider following. The coordinates of the point A – $X_1$, $Z_0$ The coordinates of the point B – $X_2$, $Z_0$. Distance from point A to OB – $R_1$. Distance from point B to OB – $R_2$. Based on fig. 2 system of equations that defines the coordinates of OP in time t we'll present as:

$$\begin{cases} X_{OB} = x_2 + R_2 \sin\theta_2; \\ Y_{OB} = 0; \\ Z_{OB} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

In accordance with fig. 2 we'll note the corresponding distances as:

$$AB = x_2 - x_1,\ BC = x_3 - x_2,\ AC = x_3 - x_1. \quad (2)$$

From fig. 2 it shows that the angle

$$\gamma_1 = \theta_1 - \theta_2 .$$

By lowering the intermediate calculations it can be shown that from the triangle ABO the distance $R_2$ from the point of reference A to the OB will be expressed by the expression:

$$R_2 = (x_1 - x_2) \times \times \frac{\sin\alpha}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} = (x_2 - x_1)\frac{\cos\theta_1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}. \quad (3)$$

Then the OP coordinates can be defined as:

$$X_{OB} = x_2 + (x_2 - x_1)\frac{\cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}. \quad (4)$$

Let's assume that UAV moved from point B to point C. Then, according to fig. 2 coordinates of OB can be defined as follows:

$$X_{OB} = x_3 + (x_3 - x_1)\frac{\cos\theta_1 \sin\theta_3}{\sin(\theta_1 - \theta_3)}. \quad (5)$$

The right-hand sides of equations (4) and (5) determine the coordinates of the OB, so they can be equated:

$$x_2 + (x_2 - x_1)\frac{\cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} = x_3 + (x_3 - x_1)\frac{\cos\theta_1 \sin\theta_3}{\sin(\theta_1 - \theta_3)}. \quad (6)$$

Determine the distance between the points B and C:

$$x_3 - x_2 = (x_2 - x_1)\frac{\cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} - (x_3 - x_1)\frac{\cos\theta_1 \sin\theta_3}{\sin(\theta_1 - \theta_3)}. \quad (7)$$

The equation (7) is the basis for the determination of the PFINS SER. Suppose that under the influence of some factors there was a shift in the position of the UAV in accordance with fig. 3. The magnitude of the displacement is determined by the force of influence on the object of navigation.

Let's assume that there was a shift of UAV from point B to point $B'$.

Then, in accordance to expression (7), we write:

$$\Delta X_{OB} = Б\frac{\cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} - (Б + \Delta x)\frac{\cos\theta_1 \sin\theta_3}{\sin(\theta_1 - \theta_3)}. \quad (8)$$

For small angle deviations $\theta_3$ from the angle $\theta_2$ expression (8) we write:

$$\Delta X_{OB} = \Delta x \frac{\cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}. \quad (9)$$

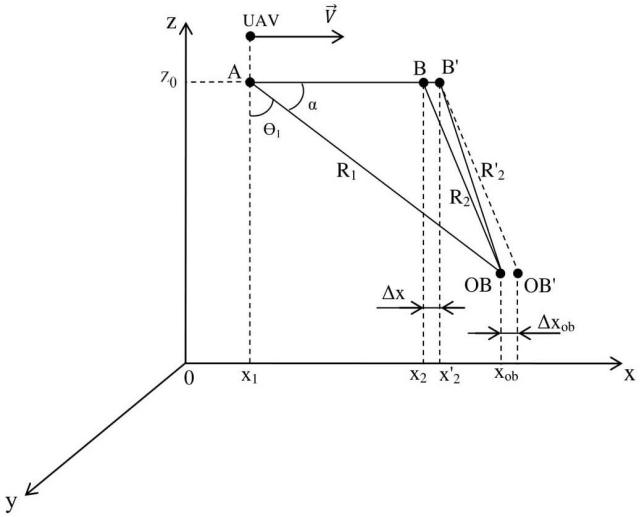



**Fig. 3.** A displacement of the spatial position of the UAV relatively to the OB in the area zx

Proceeding from (9), the expression for determining the influence of the deviation of the UAV on the determination of the coordinates of the OB is proposed:

$$\frac{\Delta X_{OB}}{\Delta x} = \frac{\cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}. \qquad (10)$$

Let's take into account that, $\Delta x = Vt$, $V$ – is the rate of displacement of UAV. Then the expression (10) allows us to estimate the error in determining the coordinates of the OB in dependence, for example, on the rate of wind gusts.

The obtained analytical expressions can be extended to the case when there is a change in the spatial position of the UAV under other parameters. In case of a change in the spatial position of the UAV at the coordinate Y, the system of equations (1) will have the form:

$$\begin{cases} X_{OB} = x_2 + R_2 \sin\theta_2; \\ Y_{OB} = y_2 + R_2 \cos\theta_2; \\ Z_{OB} = 0. \end{cases} \qquad (11)$$

Taking into account (2) the system (11) will take the form:

$$\begin{cases} X_{OB} = x_2 + \dfrac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \times \\ \quad \times\left[(y_2 - y_1)\cos\theta_1 - (x_2 - x_1)\sin\theta_2\right]\cos\theta_2; \\ Y_{OB} = y_2 + \dfrac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \times \\ \quad \times\left[(y_2 - y_1)\cos\theta_1 - (x_2 - x_1)\sin\theta_2\right]\cos\theta_2; \\ Z_{OB} = 0. \end{cases} \qquad (12)$$

In accordance with (12), the expressions for determining the influence of the deviation of the UAV on the determination of the coordinates of OB based on (10) are presented:

$$\Delta X_{OB}(\Delta x) = \frac{\cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}; \qquad (13)$$

$$\Delta X_{OB}(\Delta y) = \frac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \sin\theta_1 \cos\theta_2 \Delta y; \qquad (14)$$

$$\Delta Y_{OB}(\Delta x) = \frac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \sin\theta_1 \cos\theta_2 \Delta x; \qquad (15)$$

$$\Delta Y_{OB}(\Delta y) = \frac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \cos\theta_1 \sin\theta_2 \Delta y; \qquad (16)$$

The influence of the errors of various parameters that determine the orientation of the UAV, on the error of the PFINS link can be found in a linear approximation. This will be done by decomposition of a number of OB coordinates ( $X_{OB}$, $Y_{OB}$ ), which can be defined as follows [12]:

$$\begin{aligned} X_{OB} &= F_1(x_1, x_2, y_1, y_2, \theta_1, \theta_2); \\ Y_{OB} &= F_2(x_1, x_2, y_1, y_2, \theta_1, \theta_2). \end{aligned} \qquad (17)$$

As a result, we obtain the expression for the errors of coordinates, which we calculate according to the formulas:

$$\begin{aligned} \Delta X_{OB} &= \frac{\partial F_1}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial F_1}{\partial y_1}\Delta y_1 + \frac{\partial F_1}{\partial x_2}\Delta x_2 + \\ &+ \frac{\partial F_1}{\partial y_2}\Delta y_2 + \frac{\partial F_1}{\partial \theta_1}\Delta\theta_1 + \frac{\partial F_1}{\partial \theta_2}\Delta\theta_2; \\ Y_{OB} &= \frac{\partial F_2}{\partial x_1}\Delta x_1 + \frac{\partial F_2}{\partial y_1}\Delta y_1 + \frac{\partial F_2}{\partial x_2}\Delta x_2 + \\ &+ \frac{\partial F_2}{\partial y_2}\Delta y_2 + \frac{\partial F_2}{\partial \theta_1}\Delta\theta_1 + \frac{\partial F_2}{\partial \theta_2}\Delta\theta_2, \end{aligned} \qquad (18)$$

where $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta y_1, \Delta y_2, \Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ – errors of the initial data;

$\frac{\partial F_1}{\partial x_1}, \frac{\partial F_1}{\partial y_1}, ..., \frac{\partial F_2}{\partial \theta_2}$ – derivatives of functions $F_1$ and $F_2$ on-dependent variable.

By differentiating the expression (18) for each change it is possible to determine the effect of the errors of different parameters that determine the orientation of the UAV. This allows you to find total errors.

Implementation of the developed method is shown in fig. 4 in the form of a structural scheme of the algorithm for determining the coordinates of the SER and the angular orientation parameters of the UAV.

The algorithm is based on the measurement of the distance between the UAV and the corresponding OB, as well as the knowledge of the coordinates of the UAV at the time of implementation of these measurements.

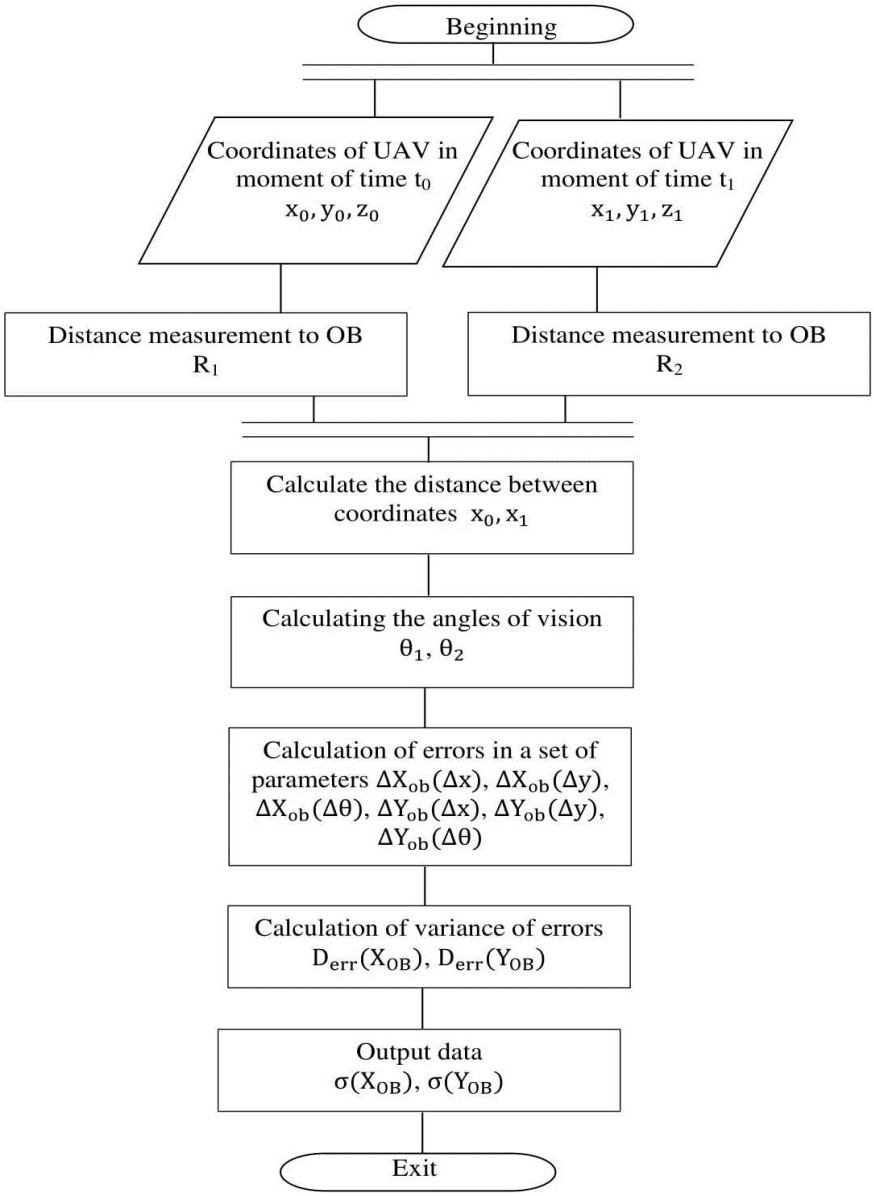



**Fig. 4.** The block diagram of the algorithm for calculating the SER coordinates of the OB and the angular parameters of the UAV orientation

In accordance with the structural scheme of the algorithm for the determination of the SER coordinates and angular parameters of the UAV orientation, the focus was on:

– to determine the number of measurements of the distances between the UAV and OB;

– to determine the effect of the displacement of the UAV on the magnitude of the error of orientation.

In the course of statistical simulation, it was considered that the only factor affecting the PFINS is the displacement of the UAV which is due to gusts of wind and air pockets.

According to the results of the statistical modeling, it is established that the determination of the impact of the UAV displacements on the result of the error estimation of the coordinates of the OB requires that the measurement intervals before the implementation of the correlation-extreme navigation system should be units of meters.

For simulation conditions, shown in Fig. 3, this interval should be about 20 m. In this case, the range of change in the accuracy of the measurement of angular coordinates was within the limits $\sigma \approx (0{,}05...0{,}2)$ of mrads. In this case, the SER coordinate is provided

$$\sigma(X_{OB}), \sigma(Y_{OB}) = (5...30) \text{ m}.$$

Numerical calculations of the dependence of the SER on determining the coordinates of the OB from the distance between the measuring points are presented graphically in fig. 5.

According to the results of statistical simulation of the process of determining the error of the coordinates of the UAV under conditions of influence of wind gusts, it is established that the obtained accuracy of the determination of the coordinates of UAV can be within the limits of several meters of units provided that the accuracy of the measurement of angular coordinates within the limits $\sigma \approx (0{,}05...0{,}1)$ of mrads is ensured.

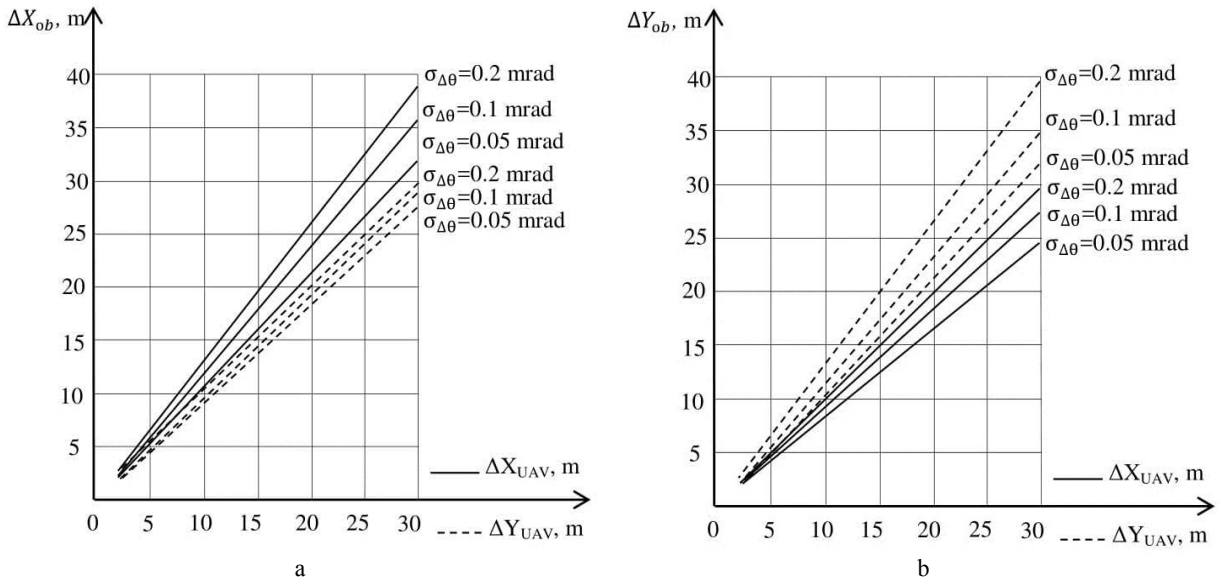



**Fig. 5.** Results of calculating error coordinates:
a – $X_{OB}$ ; b – $Y_{OB}$ depending on the magnitude of the displacement of the UAV

## Conclusions

In the article the method of calculating error coordinates of the OB and the angular parameters of the UAV orientation is presented, which appears to be under the influence of external factors.

The peculiarity of the method lies in the possibility of forecast and determination of the errors of the coordinates of the OB depending on the direction and force of influence on the UAV.

The developed method can be applied with the restrictions on the mass-dimensional characteristics of the navigation system to calculate the errors of the coordinates of the OB depending on the magnitude of the displacement of the UAV, irrespective to the distance between the points of measurement. The limitations of the application of the method are only the ability of the respective sensors to measure the distances from the UAV to the OB.

The possibility of determining the coordinates of OBs within several meters of units in the conditions of ensuring the accuracy of measuring the angular coordinates by the data sets of the navigation system within the limits of $\sigma \approx (0{,}05...0{,}1)$ mrad is shown.

The algorithm for calculating the errors of coordinate OB and angular parameters of the UAV orientation is presented, which is the further development of the sub-algorithm for calculating the angular parameters of the UAV orientation relative to the geographic coordinate system.

REFERENCES

1. Veremeenko, K.K. and Solovyev, J.A. (2010), “Analys sostoyaniya razrabotok integrirovanuh inercialno-sputnikovuh navigacionuh sistem” [Analysis of the state of development of integrated inertial-satellite navigation systems], *News of navigation,* No. 4, pp. 32-41.
2. Bezick, S.M., Pue, A.J. and Patzelt, C.M. (2010), “Internal Navigation for Guided Missile Systems”, *Johns Hopkins APL technical digest*.
3. Borisova, A.Yu. and Smal, A.V. (2017), “Analiz razrabotok sovremenuh besplatvormenuh inercialnuh navigacionuh sistem”, [Analysis of developments of modern, free-of-charge inertial navigation systems], *Engineering Herald,* No. 5, pp.50-57.
4. Kuznetsov, A.G., Portnov, B.I. and Izmaylov, Ye.A. (2014), “Sovremennyye besplatformennyye inertsial'nyye navigatsionnyye sistemy dvukh klassov tochnosti” [Modern free-of-charge inertial navigation systems of two accuracy classes], *Navigation and control of aircraft,* No.8, pp. 24-32.
5. Korkishko, Yu.N., Fedorov, V.A., Prilutskiy, V.Ye., Ponomarev, V.G., Morev, I.V., Skripnikov, S.F., Khmelevskaya, M.I., Buravlev, A.S., Kostritskiy, S.M., Zuyev, A.I. and Varnakov, V.K. (2014), “Besplatformennyye inertsial'nyye navigatsionnyye sistemy na osnove volokonnoopticheskikh giroskopov” [Freeform inertial navigation systems based on fiber-optic gyroscopes], *Gyroscopy and navigation*, No. 1, pp. 14-25.
6. Konovalov, S.F., Ponomarev, Yu.A., Mayorov, D.V., Podchezertsev, V.P. and Sidorov, A.G. (2011), “Gibridnyye mikroelektromekhanicheskiye giroskopy i akselerometry” [Hybrid microelectromechanical gyroscopes and accelerometers], *Science and Education of the MSTU N.E. Bauman*, No. 10.
7. Bezvesilna, O.M. (2010), “*Poshuky shlyakhiv pidvyshchennya tochnosti avtomatychnykh kutovymiryuval'nykh zasobiv*” [Finding ways to improve the accuracy of automatic angular measurements], Monograph, ZhDTU, Zhytomyr, 225 p.
8. Plaksiy, Yu.A. (2013) “Stepenevi alhorytmy vyznachennya kvaternioniv oriyentatsiyi ta yikh interpolyatsiyni modyfikatsiyi” [Thin algorithms for determination of quaternions of orientation and their interpolation modifications], *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 58 (1031), pp.168-177.

9. Matveyev, V.V. (2012), “Model pogreshnostey besplatformennoy inertsial'noy navigatsionnoy sistemy” [Model of the errors of the inertial inertial navigation system], *Izvestiya TulGU. Engineering Sciences,* No. 12 (1), pp. 188-196.
10. Pronkin, A.N., Kuznetsov, I.M. and Veremeyenko, K.K. (2012), “Integrirovannaya navigatsionnaya sistema BPLA: struktura i issledovaniye kharakteristik” [Integrated navigation system of UAV: structure and study of characteristics], *Proceedings of the MAI*, No. 41, pp. 12-26.
11. Kortunov, V.I. and Dybskaya, I.Yu., (2006), “Analiz sposobov korrektsii integrirovannykh besplatformennykh inertsial'nykh sistem s nizkotochnymi datchikami v upravlenii letatelnymi aparatami” [Analysis of the ways of correction of integrated free-of-charge inertial systems with low-current sensors in the control of aircrafts], *Aviation and space technology,* No. 1(27), pp. 38-43.
12. Shivrinskiy, V.N. (2010), “*Bortovye vychislitel'nyye kompleksy navigatsii i samolotovozhdeniya*” [On-board computing systems for navigation and airplane navigation], a summary of lectures, 148 p.

Received (Надійшла) 23.02.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.04.2018

## Розрахунковий метод обчислення похибок виміру координат об’єкта прив’язки безплатформенними інерційними навігаційними системами безпілотного літального апарату

О. М. Сотніков, О. Б. Танцюра, О. Ю. Лавров

Отримано подальший розвиток методу розрахунку похибок координат об'єктів прив'язки та кутових параметрів орієнтації безпілотних літальних апаратів. Похибки визначення координат виникають за рахунок впливу пориві вітру та турбулентностей атмосфери на легкі безпілотні літальні апарати. Особливість методу полягає у спроможності визначати похибки координат об'єктів в залежності від напрямку та сили впливу на безпілотний літальний апарат. Величина зовнішнього впливу визначає величину відхилення від траєкторія руху Розроблений метод може бути застосований при обмежених масогабаритних характеристиках безпілотного літального апарату. Розроблений метод визначає величини похибок вимірів незалежно від відстані між точками вимірювання. Обмеженням застосування методу може бути лише здатність відповідних датчиків вимірювати відстані від безпілотного літального апарата до об'єкта прив’язки. Представлені можливості визначення координат об’єкту прив’язки з точністю в межах одиниць метрів. Це досягається при вимірі кутових координат датчиками навігаційної системи з точністю в межах сотих мілірадіан. Представлений алгоритм розрахунку похибки визначення координат об’єкту прив’язки. Алгоритм є подальшим розвитком субалгоритму обчислення кутових параметрів орієнтації безпілотного літального апарату відносно географічної системи координат. Представлений алгоритм доцільно використовувати перед початком сеансу роботи кореляційно-екстремальної системи навігації. Проведено статистичне моделювання роботи запропонованого методу та алгоритму. Результати моделювання свідчать що величина похибки визначення координат об’єкту прив’язки залежить від точності виміру кутових параметрів безпілотного літального апарату. Представлені результати чисельної оцінки похибок виміру координат об’єктів прив’язки в залежності від точності виміру кутових параметрів безпілотного літального апарату. Визначені вимоги до точності виміру кутових параметрів безпілотного літального апарату при якій забезпечується висока точність виміру прямокутних координат об’єкту прив’язки.

**Ключові слова:** безплатформенна інерційна навігаційна система, об’єкт прив’язки, система прямокутних координат, кути візування

## Расчетный метод исчисления ошибок измерения координат объекта привязки бесплатформенными инерциальными навигационными системами беспилотного летательного аппарата

А.М. Сотников, А.Б. Танцюра, О.Ю. Лавров

Получил дальнейшее развитие метод расчета ошибок координат объектов привязки и угловых параметров ориентации беспилотных летательных аппаратов. Ошибки определения координат возникают за счет влияния порывов ветра и турбулентностей атмосферы на легкие беспилотные летательные аппараты. Особенность метода заключается в возможности определять ошибки координат объектов в зависимости от направления и силы влияния на беспилотный летательный аппарат. Величина внешнего влияния определяет величину отклонения от траектории движения. Разработанный метод может быть применен при ограничениях на массогабаритные характеристики беспилотного летательного аппарата. Разработанный метод определяет величины ошибок измерений не зависимо от расстояния между точками измерений. Ограничением использования метода может быть лишь способность соответствующих датчиков измерять расстояния от беспилотного летательного аппарата до объекта привязки. Представлены возможности определения координат объекта привязки с точностью в пределах единиц метров. Это достигается при измерении угловых координат датчиками навигационной системы с точностью в пределах сотых мили радиан. Представлен алгоритм расчета ошибки измерения координат объекта привязки. Алгоритм является дальнейшим развитием субалгоритма исчисления угловых параметров ориентации беспилотного летательного аппарата относительного географической системы координат. Представленный алгоритм целесообразно использовать перед началом сеанса работы корреляционно-экстремальной системы навигации. Проведено статистическое моделирование работы предложенного метода и алгоритма. Результаты моделирования свидетельствуют, что величина ошибки определения координат объекта привязки зависит от точности измерения угловых параметров беспилотного летательного аппарата. Представлены результаты численной оценки ошибок измерения координат объектов привязки в зависимости от точности измерения угловых параметров беспилотного летательного аппарата. Определены требования к точности измерения угловых параметров беспилотного летательного аппарата при которой обеспечивается высокая точность измерения прямоугольных координат объекта привязки/

**Ключевые слова:** бесплатформенная инерциальная навигационная система, объект привязки, система прямоугольных координат, углы визирования.

# НАШІ АВТОРИ (AUTHORS)

***АРОНОВ***
***Андрій Олексійович***
**(*Andrii Aronov*)**
Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна,
аспірант
e-mail: info.dut.edu.ua@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0206-4169

***БАРАБАШ***
***Олег Володимирович***
**(*Oleg Barabash*)**
Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна,
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики,
e-mail: bar64@ukr.net

***БРЕСЛАВЕЦЬ***
***Віталій Сергійович***
**(*Vitaliy Breslavets*)**
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри систем інформації,
e mail: bres123@ukr.net ORCID: 0000-0002-9954-159X

***БУЧИНСЬКИЙ***
***Юрій Антонович***
**(*Yuriy Buchinsky*)**
Військова частина А 3438, Одеса, Україна;
начальник відділення;
e-mail: yuriy_buchinskiy@ukr.net; ORCID: 0000-0001-9023-7092.

***ВИШНІВСЬКИЙ***
***Віктор Вікторович***
**(*Viktor Vyshnivskyi*)**
Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна,
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційної та кібернетичної безпеки, email: vish_vv@ukr.net, ORCID: 0000-0003-1923-4344

***ГАЦЕНКО***
***Сергій Станіславович***
**(*SerhiyGatsenko*)**
Національний університет оборони України імені Івана Черняховського, Київ, Україна;
кандидат технічних наук, старший викладач кафедри;
e-mail: gans1501@ukr.net; ORCID: 0000-0001-9044-7078.

***ГРИШМАНОВ***
***Дмитро Євгенійович***
**(*Dmytro Gryshmanov*)**
Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна, аспірант кафедри льотної експлуатації, аеродинаміки та динаміки польоту,
e-mail: di-sorry@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2373-0853

***ДОЛГИЙ***
***Юрій Сергійович***
(***Yurii Dolgiy***)
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна, кандидат технічних наук, доцент кафедри математичного і програмного забезпечення АСУ, e-mail: yriydolgiy@meta.ua; ORCID: 0000-0003-2441-0277

***ЖИВОТОВСЬКИЙ***
***Руслан Миколайович***
**(*Ruslan Zhyvotovskyi*)**
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна; кандидат технічних наук, начальник НДВ – заступник начальника НДУ; e-mail: ruslan_zvivotov@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2717-0603

***ЗАМАРУЄВА***
***Ірина Вікторівна***
**(*Irina Zamarueva*)**
Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна,
доктор технічних наук, професор, провідний інженер кафедри комп'ютерних наук
e-mail: irina.zamarueva@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3696-5210

***ІЛЛЯШЕНКО***
***Олег Олександрович***
***(Oleg Illiashenko)***
Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна,
старший викладач кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,
e-mail: o.illiashenko@khai.edu; ORCID: 0000-0002-4672-6400

***КАПЧИНСЬКИЙ***
***Сергій Дмитрович***
**(*Serhii Kapchynskyi*)**
Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна,
студент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки,
e-mail: s.kapchynskyy@student.csn.khai.edu

***КОВАЛЕНКО***
***Андрій Анатолійович***
**(*Andrey Kovalenko*)**
Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна,
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин,
e-mail: andriy_kovalenko@yahoo.com; ORCID: 0000-0002-2817-9036

***КОВТУН***
***Анатолій Васильович***
**(*Anatolii Kovtun*)**
Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна,
кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри експлуатації
та ремонту автомобілів та бойових машин, e-mail: kav-60@ukr.net

***КОНОНОВ***
***Володимир Борисович***
**(*Volodymyr Kononov*)**
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
Харків, Україна, доктор технічних наук, професор, начальник кафедри метрології та стандартизації, e-mail: aveprofessor@gmail.com; ORCID: 0000-0002-9946-5056

***КОР***
***А-Ліан***
***(Ah-Lian Kor)***
Leeds Beckett University (Університет Лідс Бекетт), Лідс, Великобританія, доктор філософії, старший викладач школи обчислень, творчої технології та інженерії,
e-mail: a.kor@leedsbeckett.ac.uk; ORCID: 0000-0002-3333-4444

***КОШМАН***
***Сергій Олександрович***
***(Sergey Koshman)***
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформаційних систем
і технологій, e-mail: s_koshman@ukr.net; ORCID: 0000-0001-8934-2274

***КРАВЧЕНКО***
***Володимир Іванович***
**(*Volodymyr Kravchenko*)**
Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут (НДПКІ) «Молнія», Харків, Україна; доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник,
e mail: 47kw@i.ua.

***КРАСНОБАЄВ***
***Віктор Анатолійович***
**(*Viktor Krasnobayev*)**
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна,
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри моделювання систем і технологій,
e-mail: v.a.krasnobaev@gmail.com

***КУВШИНОВ Олексій Вікторович (Kuvshinov Alexey)*** Управління нормативно-методичного забезпечення та моніторингу володіння, використання та розпорядження нерухомого майна і земель, Київ, Україна, доктор технічних наук, професор, начальник відділу; e-mail: kuvsh@ukr.net; ORCID: 0000-0045-5376-0051

***КУЧУК Георгій Анатолійович (Heorhii Kuchuk)*** Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, email: kuchuk56@ukr.net; ORCID: 0000-0002-2862-438X

***ЛАВРОВ Олег Юрійович (Oleg Lavrov)*** Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна, кандидат технічних наук, науковий співробітник наукового центру, e-mail: lavrov1107@gmail.com; ORCID: 0000-0003-1292-5986

***ЛІПЧАНСЬКА Оксана Валентинівна (Oksana Lipchanska)*** Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна, аспірант email: lipchoks@gmail.com; ORCID: 0000-0003-4173-699X

***ЛІПЧАНСЬКИЙ Максим Валентинович (Maksym Lipchanskyi)*** Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна, кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, email: ctpu@ukr.net; ORCID: 0000-0003-2837-0444

***ЛУКОВА-ЧУЙКО Наталія Вікторівна (Nataliya Lukova-Chuiko)*** Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та захисту інформації, e-mail: lukova@ukr.net

***ЛЮБЧЕНКО Наталія Юріївна (Natalia Liubchenko)*** Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики та інтелектуальної власності, e-mail: n_lubchenko@ukr.net; ORCID: 0000-0002-4575-4741

***МУСІЄНКО Андрій Петрович (Andrii Musienko)*** Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, кандидат фізико-математичних наук, асистент кафедри мережевих та інтернет технологій, e-mail: mysienkoandrey@gmail.com

***НАКОНЕЧНИЙ Олександр Анатолійович (Oleksandr Nakonechnyi)*** Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри, e-mail: nakon61@gmail.com

***ОБЕРЕМОК Сергій Олексійович (Serhii Oberemok)*** Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна, аспірант, e-mail: serjoberem@ukr.net

***ПАРХОМЧУК Олександр Васильович (Alexander Parhomchuk)*** Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна, старший викладач кафедри експлуатації та ремонту автомобілів та бойових машин, email: pakhom240968@jmail.com; ORCID: 0000-0002-4658-6225

***ПЕТРУК Сергій Миколайович (Sergii Petruk)*** Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна; старший науковий співробітник, e-mail: petruk_serg_@ukr.net; ORCID: 0000-0002-0709-0032

***ПЄВНЄВ Володимир Якович (Volodimir Pevnev)*** Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж та кібербезпеки, e-mail: v.pevnev@csn.khai.edu

***ПИСАРЧУК Олексій Олександрович (Oleksii Pysarchuk)*** Національний авіаційний університет, Київ, Україна, доктор технічних наук, професор, професор кафедри, e-mail: platinumpa@meta.ua; ORCID: 0000-0001-5271-0248

***ПІКУЛЬ Ростислав Володимирович (Rostislav Pikul)*** Військова частина А 0351, Київ, Україна; старший офіцер; ORCID: 0000-0001-9055-7214

***ПОДОРОЖНЯК Андрій Олексійович (Andrii Podorozhniak)*** Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, e-mail: andriipodorozhniak@gmail.com; ORCID: 0000-0002-6688-8407

***ПУХАЛЬСЬКА Галина Анатоліївна (Galina Pukhalskaya)*** Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри іноземних мов, e-mail: galamarykay72@gmail.com; ORCID: 0000-0002-5378-537X

***РАХІМІ Яшар (Yashar Rahimi)*** Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського "ХАІ", Харків, Україна, аспірант (Тегеран, Іран)

***РИЖОВ Євген Вікторович (Yevhen Ryzhov)*** Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів, Україна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Наукового центру, e-mail: zheka1203@ukr.net; ORCID: 0000-0002-0132-3931

***РОМАНЕНКО Ігор Олександрович (Igor Romanenko)*** Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна; доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник; e-mail: igor_romanenk@ukr.net; ORCID: 0000-0001-5339-7900

***РУДЬ***
***Сергій Олександрович***
**(*Serhii Rud*)**
Повітряні Сили Збройних Сил України,
Повітряне командування "Захід", Львів, Україна,
e-mail: udsergiy77@gmail.com

***САКОВИЧ***
***Лев Миколайович***
**(*Lev Sakovych*)**
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігора Сікорського», Київ, Україна,
Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації, кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри, e-mail: lev@sakovich.com.ua; ORCID: 0000-0002-8257-7086

***СЕМЕНОВ***
***Сергій Геннадійович***
**(*Sergiy Semenov*)**
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків,
Україна, доктор технічних наук, с.н.с., завідувач кафедри обчислювальної техніки
та програмування, e-mail: s_semenov@ukr.net; ORCID: 0000-0003-4472-9234

***СКУЛИШ***
***Марія Анатоліївна***
**(*Mariya Skulysh*)**
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігора Сікорського», Київ, Україна,
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інформаційно-
телекомунікаційних мереж, e-mail: mskulysh@gmail.com; ORCID: 0000- 0002-5141-1382

***СОБЧУК***
***Валентин Володимирович***
**(*Valentin Sobchuk*)**
Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки, Луцьк, Україна,
кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри диференціальних рівнянь
та математичної фізики, e-mail: v.sobchuk@gmail.com

***СОТНІКОВ***
***Олександр Михайлович***
**(*Alexander Sotnikov*)**
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
Харків, Україна, доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник
наукового центру, e-mail: alexsot@ukr.net; ORCID: 0000-0003-3214-8643

***СТОЯН***
***Юрій Євгенович***
**(*Yurii Stoian*)**
Інститут проблем машинобудування імені А.М. Підгорного НАН України,
Харків, Україна, аспірант
e-mail: urikpostg@gmail.com

***СУЛІМА***
***Світлана Валеріївна***
**(*Svitlana Sulima*)**
Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігора Сікорського», Київ, Україна,
аспірант кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж,
e-mail: lilthirteen@gmail.com; ORCID: 0000- 0002-6333-7693

***СЮЛЄВА***
***Ганна Миколаївна***
**(*Hanna Siulieva*)**
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
Харків, Україна, магістрант,
e-mail: anna1suleva@ukr.net

***ТАБУНЕНКО***
***Володимир Олександрович***
**(*Volodimir Tabunenko*)**
Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна,
кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри експлуатації
та ремонту автомобілів та бойових машин, e-mail: tabunenko55@ukr.net

***ТАНЦЮРА***
***Олександр***
**(*Alexander Tanciyra*)**
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,
Харків, Україна, ад'юнкт,
e-mail: shurik.lucky@gmail.com; ORCID: 0000-0003-3214-8643

***ХАРЧЕНКО***
***Вячеслав Сергійович***
***(Vyacheslav Kharchenko)***
Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна,
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем, мереж та
кібербезпеки, e-mail: v.kharchenko@csn.khai.edu; ORCID: 0000-0001-5352-077X

***ХМЕЛЕВСЬКИЙ***
***Сергій Іванович***
**(*Sergei Khmelevskii*)**
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків,
Україна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Начальник центру мо-
вної підготовки, e-mail: sserg1978@ukr.net; ORCID: 0000-0001-6216-3006

***ЧЕСНОК***
***В'ячеслав Олександрович***
**(*Viacheslav Chesnok*)**
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
Харків, Україна, студент,
e-mail: slavok1701@gmail.com

***ЧУ***
***Цзинь Куй***
**(*Qiu Jinghui*)**
Харбінський технологічний інститут, Харбін, Кітай (Harbin, China),
доктор технічних наук, професор, директор департаменту НВЧ техніки, керівник
дослідного центру НВЧ випромінювань та антенних технологій, e mail: qiujh@hit.edu.cn

***ЧУГАЙ***
***Андрій Михайлович***
**(*Andriy Chugay*)**
Інститут проблем машинобудування імені А.М. Підгорного НАН України,
Харків, Україна, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник,
e-mail: chugay.andrey80@gmail.com; ORCID: 0000-0002-4079-5632

***ШИШАЦЬКИЙ***
***Андрій Володимирович***
**(*Andrii Shyshatskyi*)**
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, Київ, Україна; кандидат технічних наук, науковий співробітник;
e-mail: ierikon12@gmail.com; ORCID: 0000-0001-6731-6390

***ЯКОВЕНКО***
***Ігор Володимирович***
**(*Igor Yakovenko*)**
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків,
Україна, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри систем
інформації, e mail: yakovenko60iv@ukr.net; ORCID: 0000-0002-0963-4347

***ЯНКО***
***Аліна Сергіївна***
**(*Alina Yanko*)**
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава,
Україна, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії,
e-mail: al9_yanko@ukr.net; ORCID: 0000-0003-2876-9316

***ЯРОХОВИЧ***
***Олександр Ілліч***
**(*Olexander Yarokhowytch*)**
Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна,
аспірант кафедри льотної експлуатації, аеродинаміки та динаміки польоту,
e-mail: myfirstjobber@gmail.com; ORCID: 0000-0002-2197-3616

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК




Наукове видання

**Сучасні інформаційні системи**

**Advanced Information Systems**

Науковий журнал

Том 2, № 1

Відповідальний за випуск *С. Г. Семенов*
Технічний редактор *Д. С. Гребенюк*
Комп`ютерна верстка *Н. Г. Кучук*
Оформлення обкладинки *А. Е. Горюшкіна*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 22522-12422Р від 13.01.2017 р.

Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 14,25. Тираж 120 прим. Зам. 504-18

Адреса редакції: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", кафедра ОТП, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна, тел. 707-61-65

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис № 24800000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. **(057) 778-60-34**
e-mail: **bookfabrik@mail.ua**