

IMPROVING THE FUNCTIONING RELIABILITY OF THE INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM ELEMENTS, USING BUILT-IN DIAGNOSTIC TOOLS

Kleiman L. A. – Postgraduate student, Department «Automatics and telemechanics», Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

Freyman V. I. – Dr. Sc., Professor of the Department «Automatics and telemechanics», Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

ABSTRACT

Context. In the modern world, information management systems have become widespread. This makes it possible to automate the technological processes of enterprises of various sizes. Many information management systems include wireless and autonomous elements. Autonomy, in this case, means the ability of the system elements to function for a certain time without additional energy supply. In this regard, such a parameter of operational reliability as the battery life of a system element becomes one of the most important. One of the main tools for improving the reliability and fault tolerance of information management system elements – is the use of a modern diagnostic system.

Objective. The aim of the work is to develop a method for increasing the reliability of the functioning of autonomous elements of information management systems. It includes the creation of a model of an information management system and an algorithm for reasonable redistribution of diagnostic functions, as well as a software implementation of the developed algorithm, which confirms its higher reliability indicators in comparison with other algorithms.

Methods. The basic model was the Preparata-Metz-Chen model. On its basis, a new model of the system was built, including the structural and logical description of the elements and the determination of the way of their interaction. The elements were classified by the degree of criticality of the functions performed in the system. On the basis of the developed model and description of the elements, an algorithm was developed for the reasonable redistribution of the diagnostic load, which made it possible to reduce the average energy consumption of the elements and thereby improve the reliability indicators. A software implementation of the developed algorithm was created, which allows to numerically evaluate its advantages. The developed and existing algorithms were compared.

Results. A model of information management system has been developed. In such a system, it is proposed to use an integrated test diagnostics system. This diagnostic system implements algorithms for redistributing the diagnostic load. To determine the importance of the characteristics taken into account, a linear criterion was chosen, as the most studied and fastest in application. A software model, that implements the developed algorithm and makes it possible to compare it with existing algorithms, has been developed. A study of the software model with various parameters was carried out and, based on the results of the software simulation, conclusions were drawn about the possibilities of improving the algorithm and directions for further scientific research were formulated.

Conclusions. The usage of the developed algorithm makes it possible to increase such a characteristic of the reliability of the elements of the information and control system as the mean time of failure-free operation (mean time between failures) by increasing the operating time of autonomous elements without recharging. When carrying out software modeling of the developed and existing algorithms, the advantages of the first were confirmed, and theoretical possibilities for its improvement were formulated.

KEYWORDS: autonomy, reliability, elements of an information management system, diagnostics, performance characteristics, dynamic distribution algorithm, software model, built-in test diagnostics.

ABBREVIATIONS

IMS is a Information Management System;
BC is a Battery Charge;
FDD is a Fault Detection and Diagnostics;
UC is a Universal Controller;
CNN is a Convolutional Neural Network;
MLP is a Multilayer Perceptron;
TDT is a Test Diagnostic Tools;
OD is a Object of diagnostic;
DA is a Diagnostic agent;
TD is a Test Diagnostics;
FC is a Functional Control.

NOMENCLATURE

N_{cr} is a number of critical elements of the system;
 N_{mCr} is a number of middle-critical elements of the system;

N_{nCr} is a number of non-critical elements of the system
 P_{tr} is a threshold power level;
 ΔP_t is a power cost of one diagnostic test;
 Δt is a diagnostic interval;
 t is a working time;
 i is a serial number of the element;
 $P_i(t)$ is a charge power of the i -element at time t , normalized to the range [0; 1];
 $CPU_i(t)$ is a CPU load of the i -element at time t , normalized to the range [0; 1];
 IMP^{CHAR} is a numeric importance of the element characteristic;
 $N_i^{checks}(t)$ is a distributed number of checks for i -element;
 $N_{OE}(t)$ is a number of operable elements at time t ;
 $N_{OE}^i(t)$ is a function to determine is i -element is operable;

OE is an integral characteristic of operable elements number;

N_{checks} is a number of checks;

K_i^{POW} is a power coefficient of the i -element;

K_i^{CPU} is a CPU coefficient of the i -element;

$N_{checks}(t)$ is a number of possible checks at moment t ;

N^{CHAR} is a number of characteristics in a complex coefficient;

N_{el} is a number of elements in system of each type;

T is a time of the diagnostic finish.

INTRODUCTION

Nowadays, IMS are widely used. They allow corporations to automate their technological and business processes [1]. Current trends of their effective usage involve the use of wireless information transfer technologies to ensure the autonomy of the system and its elements. Autonomy is to increase the up-time of the IMS elements without additional supply of energy.

Wireless technologies and autonomy of the elements create additional factors of the system usage. These factors should be taken into account for planning routine maintenance. Because cost of the routine maintenance is directly proportional to the number of failures of the system elements.

For example, some fuel company has fully automated oil rig with autonomous fire-detection sensors. So, oil rig is commonly far away from command centre. If battery of the element (sensor) running out 2 times a week (or other failures), instead of one time – cost of the maintenance becomes 2 times more then it could be. Common cost includes the transfer cost, additional worker salary, etc.

So, improving reliability of the autonomous IMS elements should be considered for everyone who wants to have highly effective system and spend money efficiently.

The object of study was autonomous elements of information management system with wireless communication channels.

The subject of the study is development of a method for increasing the reliability of the functioning of autonomous elements of information control systems, including the creation of a model of an information control system and an algorithm for justified redistribution of diagnostic functions, as well as a software implementation of the developed algorithm.

The purpose of the work is increasing reliability of the autonomous elements of the wireless information-management systems by increasing the operating time without recharging, by increasing the operating time of autonomous elements without recharging.

1 PROBLEM STATEMENT

It was found, that in an IMS system with built-in diagnostic tools, the existing diagnostic load balancing algorithms are unreasonable in relation to the current state of the system elements and thus negatively affect their reliability.

To solve the problem of unreasonable distribution of the diagnostic load, it was decided to develop a method for increasing the reliability of IMS elements and a software package that allows one to obtain a comparative characteristic of the developed and existing algorithms.

Therefore, the main goal of the algorithm is to define the function (1) to recalculate (redistribute) the number of checks for each element before every diagnostic cycle. Input parameters: the classification of the elements of the system and their quantity (N_{Cr} , N_{mCr} , N_{nCr}), the threshold power level of the element (P_{tr}), cost for diagnostic test (ΔP_i), the diagnostic interval (Δt). Current values of characteristics of the elements (in current work we use $P_i(t)$ and $CPU_i(t)$, but number of characteristics is expandable) and their weight coefficients (IMP^{CHAR}) are also should be used:

$$\begin{aligned} N_i^{checks}(t) &= f(N_{nCr}, N_{mCr}, N_{Cr}, P_i(t-\Delta t)), \\ CPU_i(t-\Delta t), IMP^{CHAR}, i &\in [1, N_{nCr} + N_{mCr}]. \end{aligned} \quad (1)$$

A characteristic that will be an indicator of the effectiveness of the developed algorithm is an integral indicator of the number of operable elements of the system. To calculate it, we should declare power level of each element at time t and number of operable elements of the system at time t :

$$\begin{aligned} N_{OE}(t) &= f(N_{OE}^i(t)), \\ N_{OE}^i(t) &= f(P_i(t), P_{tr}), \\ P_i(t) &= f(P_i(t-\Delta t), N_i^{checks}(t), \Delta P_i), \\ i &\in [1, N_{nCr} + N_{mCr}]. \end{aligned} \quad (2)$$

Then the goal of the developed method will be to increase the numerical value of the resulting function over a finite time interval, the beginning of which coincides with the beginning of the functioning of the built-in diagnostic system:

$$OE = f(N_{OE}(t)). \quad (3)$$

In addition, the criterion for the effectiveness of the developed algorithm will be a decrease in the average rate of change in the values of the resulting function (a smooth change in the number of workable elements). This allows reducing the cost of the batteries replacement.

It is also an important task to determine the conditions and boundary values of the parameters of the function, at which the developed technique is superior to the existing algorithms.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

In this paper, reliability of the IMS elements is understood as up-time of the element, when the BC is higher than the minimum level. Minimum level of the elements BC should be defined as system requirement.

So, the IMS system reliability – is number of elements, whose BC is higher than minimum level.

The load of control processors significantly affects the discharge speed. In this regard, ensuring the reliability of the functioning of the IMS elements [2] by increasing up-time of the element is arises as a question.

One of the main tools to improve the reliability and fault tolerance of IMS elements – is usage of a progressive diagnostic system that meets modern requirements [3]. Diagnostic systems are divided by type into external and built-in. Each type is used in accordance with the reliability requirements of the system. The built-in test diagnostic system is characterized by the usage of diagnostic tools, built into the IMS elements. The advantages of the integrated [4] diagnostic systems includes, for example, the following:

1. The absence of the usage of the expensive and complicated in the deployment and administration diagnostic system.

2. More complete and adequate diagnostic information, characterizing a specific element of the IMS.

In this paper, the combined test diagnosis system will be investigated. UC is responsible for the distribution of diagnostic functions and functional control. Special tools, built into IMS elements structure, perform test diagnostics.

The use of built-in diagnostic tools [5] takes part of the productivity of control modules (processors, controllers) of IMS elements. The performance resources of the elements (testers), assigned to perform the diagnostic functions, are spent on the formation of the test, transmission and reception of data and their subsequent processing. In order to avoid the rapid discharge of batteries and malfunctioning, the article proposes a methodology for redistributing diagnostic functions between system elements. It allows reducing the load on the most important elements of the system or elements with a low battery charge. This will allow them to reduce the rate of discharge of the battery [6] and increase battery life without recharging. As a result, the reliability of the functioning of the IMS elements increases [7].

So, the problem noted above is quite relevant. At various times, the staff of IPU RAN named after V. A. Trapeznikova: Vedeshenkov V. A. [8], Aminev D. A. [9] and some others were interested in this problem. Also, our foreign colleagues, such as Woohyun Kim, James E. Braun (Herrick Laboratory, Purdue University, Mechanical Engineering, West Lafayette, IN, United States)[10], Xudong Li (National Space Science Center, Beijing, China) [11], Barry Dowdeswell, RoopakSinha, Stephen G. MacDonell (Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand) [12] also dealt with similar issues.

In particular, in [8] a method was proposed (Barsi-Grandoni-Maestrini model) for self-diagnosis of modules and communication lines of digital systems with

reconfiguration. This allows stable multiple failures of a limited number of components. The method [8] is based on the principle of expanding domains.

In [9], existing methods of self-diagnosis were considered. Possibility of their application in the diagnosing a distributed radio-technical surveillance system framework was described. An approach to reconfiguring the system depending on the diagnostic results is proposed.

[10] discusses an approach to the design of FDD systems that have the potential to improve energy efficiency while reducing maintenance costs. To achieve this goal, virtual sensors and failure impact models are implemented that require only inexpensive measurements to detect the cause of failure, severely diagnose the failure, and evaluate performance degradation.

In [11], an adaptive built-in diagnostic system is considered. It actively uses transfer learning by developing an integrated approach for troubleshooting with different types of components. Two deep learning techniques are used: CNN and MLP, to train multiple basic models with a set of input data.

In [12], methods for detecting and diagnosing malfunctions used in the field of control in the aerospace, automotive and industrial fields are described. Each of these sectors uses specific techniques to meet different diagnostic needs. One of the most important gaps is the problem of resource efficiency in wireless information management systems.

Thus, it is worth noting that most of the papers on this topic consider diagnostic errors and problems in the data transmission channel as a reason for reconfiguring the diagnostic system. This is undoubtedly very important, but it is also important to take into account the current workload and performance of the system and its elements, because the diagnostic processes additionally load the resources of the system elements, leading to an increase in the likelihood of their wear and tear, failure and lower productivity.

3 MATERIALS AND METHODS

Figure 1 shows a block diagram of the developed TDT [13].

This system contains functional elements (devices that directly perform the functions of the system), the reliability of which must be increased. A control and configuration device – UC is necessary for the distribution of functional tasks, collection results of execution and configuration of system elements. The functional elements communicate with each other and the UC via wireless information transmission channels [14]. Next, we will describe the built-in test diagnostics system.

In this system, it is assumed that each functional element of the IMS system, depending on the configuration, can be a test object or a tester. The configuration of each element is set by the UC, which

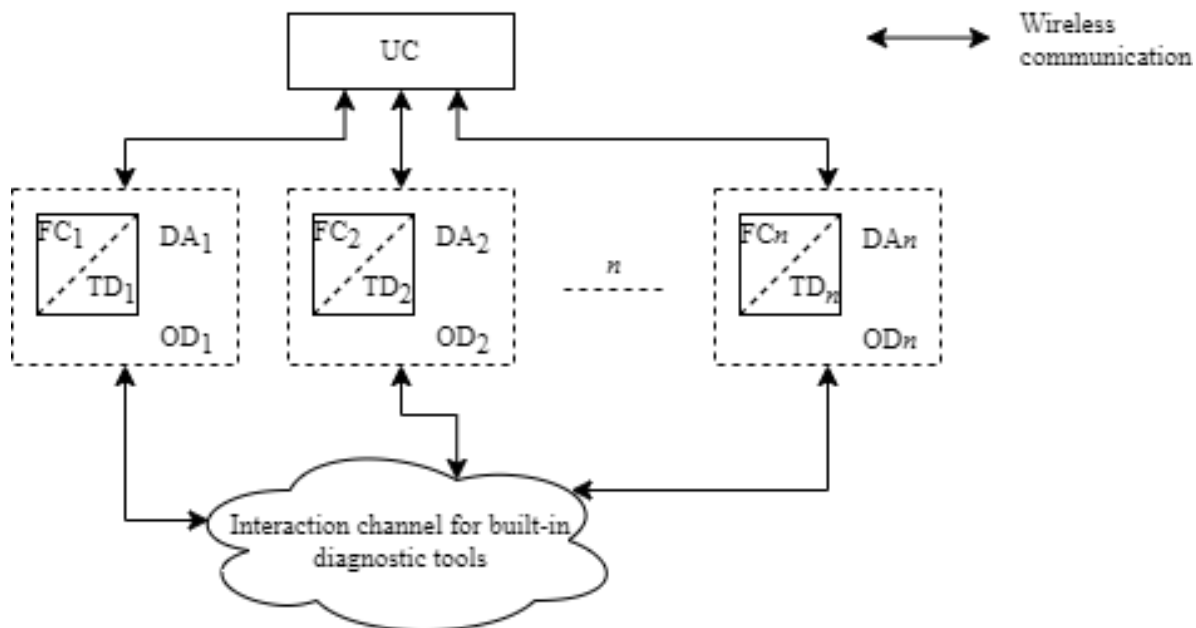


Figure 1 – Element structure of the developed test diagnostics system

also performs functional control (monitoring). The OD implements DA – a software and hardware module that performs the following functions:

1. Tester – formation of tests, transmission, reception and processing of diagnostic information.
2. TD – acceptance of the test and the formation of the response.
3. FC – receiving requests and generating a response about its technical condition (monitoring).

Thus, having entrusted the tasks of dynamic reconfiguration of the built-in test diagnostics system to the UC (without spending the resources of the functional elements (objects of diagnostics)), we will try to increase the reliability of the IMS elements.

In the developed methodology, the diagnostic model of the Prepare – Metz – Chen [15] was taken as the basis, in which the model is represented in the form of a graph whose vertices are the elements of the system and the edges are the inter-element diagnostic connections.

This means that the edge indicates the direction of the diagnostic tests. Also, in this model, each element is diagnosed once, by one diagnostic element – an agent. The novelty of the developed method consists in taking into account the performance characteristics of the IMS elements when distributing diagnostic functions between these elements. Such a system consists of elements of the same type, capable of diagnosing each other with the same tests in terms of resources and time spent.

You can divide the system into several blocks of the same type. In this case, the presented model will describe each block of the system separately, but collectively present the same diagnostic results as if it were the same for different types of elements.

To improve efficiency, you need to use the elements in different ways. The number of classes can be different (number of characteristics, number of elements). Features of the developed model

1. All elements must be divided into 3 classes:
 - a. Critical – those elements that are entrusted with the most important and costly operations in the system, they must be diagnosed in the first place, and not used as a diagnostic tool.
 - b. Medium criticality – elements that are both diagnosed and are diagnosed. Half of this set of elements diagnoses at a certain point in time, when the remaining is diagnosed.
 - c. Non critical – they are constantly used as diagnostic elements. Least loaded system elements.
2. The UC covers the energy and computational costs of the reconfiguration of diagnostics. That is why, this process does not consume the power of diagnostic and diagnosed elements.
3. Input: $\Delta t, N_{cr}, N_{mCr}, N_{nCr}, P_{tr}$.
4. At the first stage of the development of the algorithm, we will take ΔP_t as a constant, but in a real situation – the value is a variable that depends on other parameters.

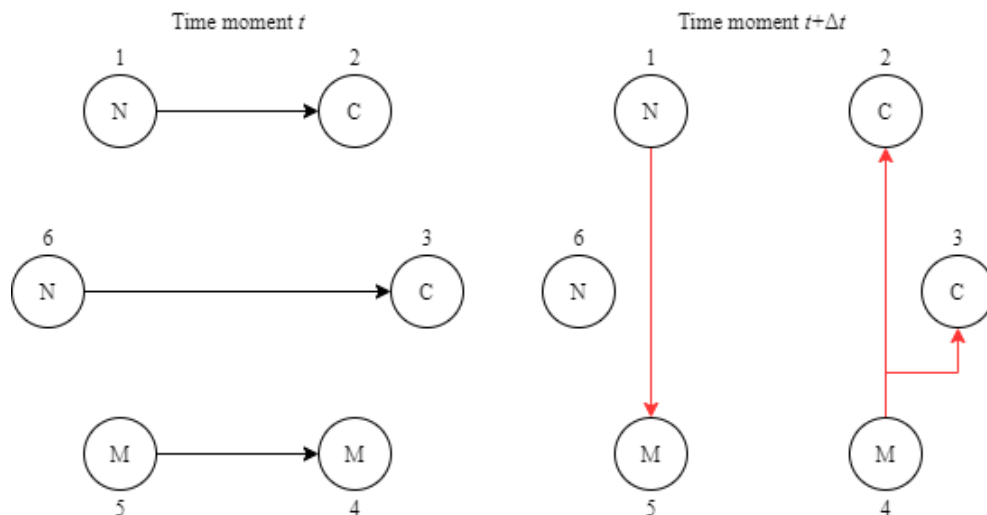


Figure 2 – Example of diagnosis graph for described algorithm at time moments t и $t+\Delta t$. N – non-critical elements, M – medium-critically elements, C – critical elements

On the Fig. 2 we see an example of reconfiguration of the purpose of diagnostic functions of a system consisting of 2 critical elements, 2 elements of medium criticality and 2 non critical elements. At the moment t , the numerical value of the performance of each element (the calculation is performed by the UC, it collects statistics before each cycle of test diagnostics) made it possible to determine the next diagnostic graph for the system (left graph in Fig. 1). It shows that it is imperative to diagnose critical elements, and at time t with minimal costs, elements 1, 5, 6 will cope with this. At the next time moment $t + \Delta t$, the performance indicators of the elements changed, as well as the numerical estimate, which allowed the UC to redistribute the diagnostic functions.

Let's present an analytical model of the built-in diagnostic system reconfiguration algorithm.

To develop a reconfiguration algorithm, we introduce a model for quantitative assessment of the parameters of the method:

1. N_{checks} . This value characterize the number of needed checks in this time interval:

$$N_{checks} = N_{cr} + (N_{mCr} - \left\lfloor \frac{N_{mCr}}{2} \right\rfloor). \quad (4)$$

2. The maximum number of checks for which the resources of each element in the sum are enough:

$$N_{checks}^{max}(t) = \sum_{i=1}^{N_w} N_i(t),$$

$$N_w = N_{nCr} + \left\lfloor \frac{N_{mCr}}{2} \right\rfloor, \quad (5)$$

$$N_i(t) = \left\lfloor \frac{P_i(t) - P_{tr}}{\Delta P_t} \right\rfloor.$$

3. Now we introduce the performance characteristics of each element. We use the dependence from only one characteristic, the expansion will be performed later in this article:

$$K_i^{POW}(t) = P_i(t). \quad (6)$$

4. Number of checks for each element:

$$N_i^{checks}(t) = \frac{K_i^{POW}(t) \times N_{checks}(t)}{\sum_{i=1}^{N_w} K_i^{POW}(t)}, \quad (7)$$

where $N_{checks}(t)$ will be equal (4) or (5) depending on the conditions described below.

Thus, all the quantities necessary for the development of the reconfiguration algorithm are determined.

Due to the development of wireless technologies [2], autonomous IMS elements have become widespread. Examples of autonomous IMS elements can be (autonomous TP-Link TL-MR3040 routers), energy autonomous products from CISCO (Cisco Aironet 1240), autonomous sensors for monitoring leaks and fire safety in oil fields (Lukoil). It is also relevant for mobile devices and AD-HOC networks [16], since they certainly have an autonomous power supply of the elements [17].

For various information and control systems, the performance characteristics of its elements may be different [18]. Thus, one of the requirements for the developed algorithm is scalability in number of characteristics, which affect the performance of elements.

As you know, a decrease in the battery charge level leads to a malfunction of the elements, which leads to a decrease in such a reliability indicator as mean time between failures. Most modern cells have built-in diagnostics that take up part of the performance of processor devices and, accordingly, accelerate battery discharge. Thus, with redistributing the load of elements with diagnostic functions, it is possible to selectively reduce the discharge rate and increase the reliability indicators of the IMS elements.

A new algorithm for reconfiguring the built-in subsystem of test diagnostics has been developed to perform the main functions of the UC. As a first approximation, we consider one performance characteristic and take $\Delta P_t = \text{const}$.

Algorithm diagram is shown on the Fig. 3.

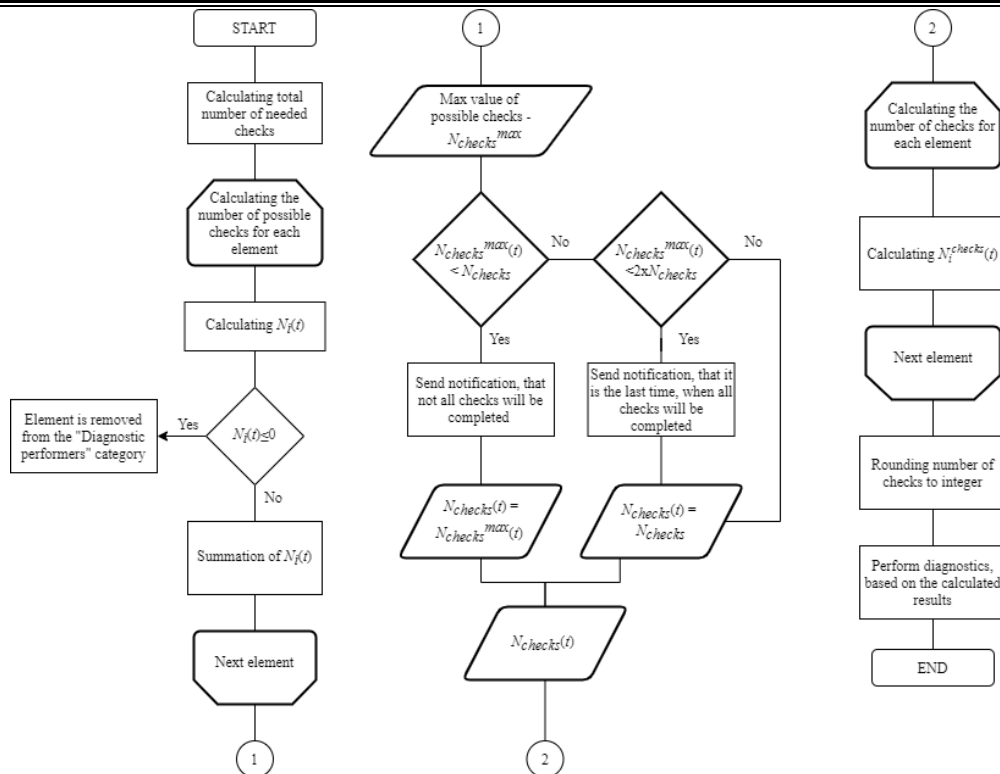


Figure 3 – Scheme of the developed reconfiguration algorithm

1. The first step of the reconfiguration algorithm is to calculate the number of checks that will fall on each diagnostic element at time t with an interval of Δt . Let us calculate the total number of checks for each moment of time t according to the (4).

2. The second step is to determine the possible number of checks at a given time, depending on the current battery charge. This number does not depend on the number of characteristics that must be taken into account in the distribution of diagnostic functions. We make the calculation using the (5). If, $N_i(t) \leq 0$, then the element is removed from the category of diagnostics with the corresponding notification of AST. Also, if:

$$N_{checks}^{max}(t) < N_{checks}, \text{ then } N_{checks}(t) = N_{checks}^{max}(t).$$

In this case, a notification is sent that not all necessary checks will be performed at the current time. The necessary action in this case is to replace the batteries. And if:

$$N(t)_{checks}^{max} < 2 \times N_{checks},$$

then a notification is sent that the current check is the last full check (that is, all tests will be carried out) and the next one will be incomplete.

So, if two first conditions are false, then:

$$N_{checks}(t) = N_{checks}.$$

3. The next step is to distribute the diagnostic load depending on the performance characteristics of the cells,

and in this case – the current battery charge. For this, we introduce the required coefficient according to the formula (6). Thus, the number of checks per element is calculated by the formula (7).

4. The last step of the algorithm is to round the number of checks to an integer in such a way that the number of checks for an element with a large current charge is rounded up, and for a smaller one, accordingly, down.

5. Carrying out diagnostics according to the performed reconfiguration, sending the results to the UC. Waiting for the end of the diagnostic interval. Go to step 1.

The input data of the algorithm are set at the stage of creating a system based on the class of tasks solved by the system and the necessary requirements for the reliability of the system.

Now, the method of the expansion of the number of considered characteristics will be presented.

In step 3 of the algorithm, the distribution coefficient of checks by the current level of battery charge was presented. To take into account additional parameters, a complex coefficient is required. This coefficient is proposed to be calculated according to the following algorithm.

Let us add one more characteristic of the IMS element – the processor load at the current time. High processor utilization leads to decreased performance, slower performance and faster battery drain. This dependence is because with a high processor load, the diagnostic test execution time will increase, which will undoubtedly lead to an increase in battery consumption. Therefore, a reasonable distribution of diagnostic tasks

between various elements can increase the battery life of an element, as well as improve performance and reliability indicators.

An example of a common specification is processor frequency. As a particular characteristic, one can suggest, for example, the distance of signal transmission between the elements of the system. Here is an example of a modified calculation of clause 3 of the algorithm:

$$K_i^{CPU} = 1 - CPU_i, CPU_i \in [0;1].$$

The difference is necessary to take into account the requirements for improving the characteristics, because the more the processor is loaded, then the worse the conditions for this element to diagnose. For 2 characteristics under consideration, the complex coefficient will look like:

$$K_i = IMP^{CPU} \times K_i^{CPU} + IMP^{POW} \times K_i^{POW},$$

$$\sum_{i=1}^{N^{CHAR}} IMP_i^{CHAR} = 1.$$

To numerically determine the importance of characteristics, several approaches can be used. For example:

1. Mathematical (average, weighted average).
2. The theory of the importance of criteria by Podinovsky [19]
3. Coefficient of concordance (consistency of expert judgment)
4. Fuzzy logic.

For this algorithm, it is advisable to use the average approach to determine the weight coefficients. Its advantages are ease of use, clarity of the distribution of importance characteristics, a large number of algorithms in which it is already used [20]. If necessary, the method can be changed.

Development of a software model in which the developed diagnostic load distribution algorithm is implemented.

In order to check the correctness of the developed algorithm, a software was developed that simulates the operation of the developed algorithm and shows a

Input

Number of critical elements

Number of middle-critical elements

Number of non-critical elements

Test power cost

Threshold power level

Diagnosis interval

comparison with other algorithms, when the entire diagnostic load is assigned to one element until its failure. Let us call this algorithm “1 → all”. There are two types: simple and modified. Simple’s gist is, briefly, that one item is assigned as a tester until it fails. Then the next element takes over its responsibilities and works until it fails. Modified algorithm reassign the tester before each diagnostic cycle. Program was written in Javascript (for cross-platform) using the EmberJS framework [21].

Below are the results of the algorithm. When entering input parameters, the program generates the entered number of elements, assigning them random initial values of the battery charge and processor load. From this starting point, the algorithms being compared operate. An example of the generated initial state is shown in Fig. 4.

In the figure, on the left side, we see a panel for entering the system parameters, necessary for the developed algorithm to work. On the right, we see the visualization of the generated elements of the information system according to the entered parameters. Inside each element there are 2 columns – the left one is responsible for the charge level of the element, the right one is for the current CPU load. Before each diagnostic cycle, the CPU value is randomly generated again, the battery power value is reduced depending on the number of diagnostic tests performed. Functions to calculate the needed values (2, 3) to estimate the effectiveness of the developed algorithm are presented in program, so:

$$N_{OE}(t) = \sum_{i=1}^{N_{nc}+N_{mcr}} N_{OE}^i(t),$$

$$N_{OE}^i(t) = \begin{cases} 1, & P_i(t) > P_{tr} \\ 0, & P_i(t) \leq P_{tr} \end{cases}, \quad (8)$$

$$P_i(t) = P_i(t - \Delta t) - (N_i^{checks}(t) \times \Delta P_i).$$

The result of the program’s work (Fig. 5) is a graph that demonstrates the calculated by formula (8) number of operable elements. The OE characteristic will be calculated like:

$$OE = \int_0^T N_{OE}(t) dt. \quad (9)$$

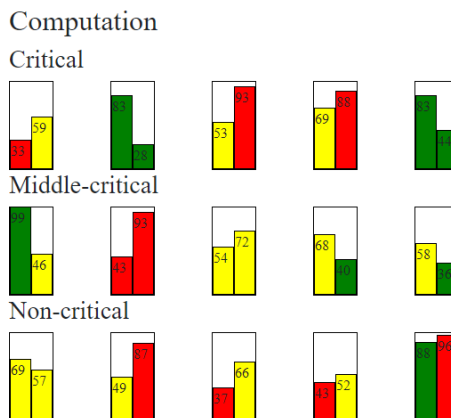


Figure 4 – Example of initial state in developed software

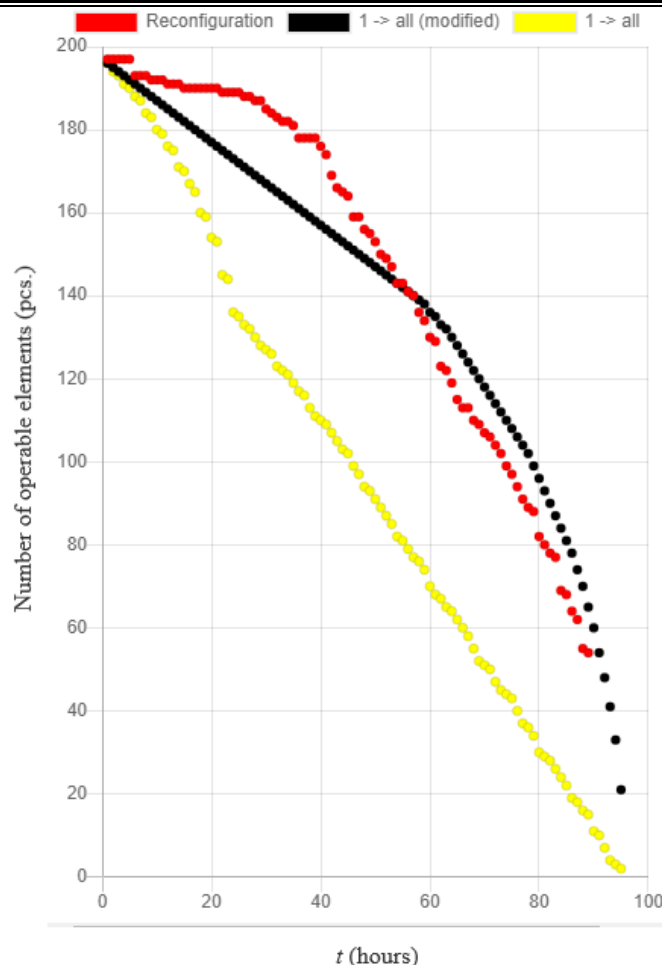


Figure 5 – Example of computation results

4 EXPERIMENTS

We will take 3 system types with different number of elements: 20, 100, 500. It means that the first system will have 20 critical, 20 middle-critical and 20 non-critical elements, second will have 100 critical, 100 middle-critical and 100 non-critical elements, etc. And we will take 2 different ΔP values to see, how the complexity of the test (resource needed) affects algorithms efficiency.

Let us analyze graphs. We must visually pay attention to the value of the area under the graph (*OE*) and smoothness in function value decrease. Numerically *OE* can be calculated by (9), but here we can visually analyze this value as area under the graph. On Fig. 6 and Fig. 9 we can see, that in system with low number of elements, developed method works less efficiently than the modified “1 → all” method. However, at the same time we can see that it has the smoothest decline between all methods. It means that elements battery discharge is flowing. This type of discharge is the best way to extend battery and increase the element reliability.

We can see, that increasing the number of elements leads developed algorithm to work more efficient. Number of operable elements on Fig. 7, Fig. 8, Fig. 10, Fig. 11 is more than in other methods. So we can conclude, that if systems have a lot of elements, it’s better to use developed algorithm.

At the same time, we can see the intersection of graphs and method “1 → all” becomes more efficient, when batteries charge is low. We can conclude that in further researches the combined algorithm can be invented. We can take the best from both algorithms and create an algorithm, which will choose the most effective method in current time and situation.

The efficiency become a little bit higher with the ΔP cost increasing. We can see, that the difference between operable elements on Fig. 8 is less than in Fig. 11. It means that the algorithm works well in highly loaded systems.

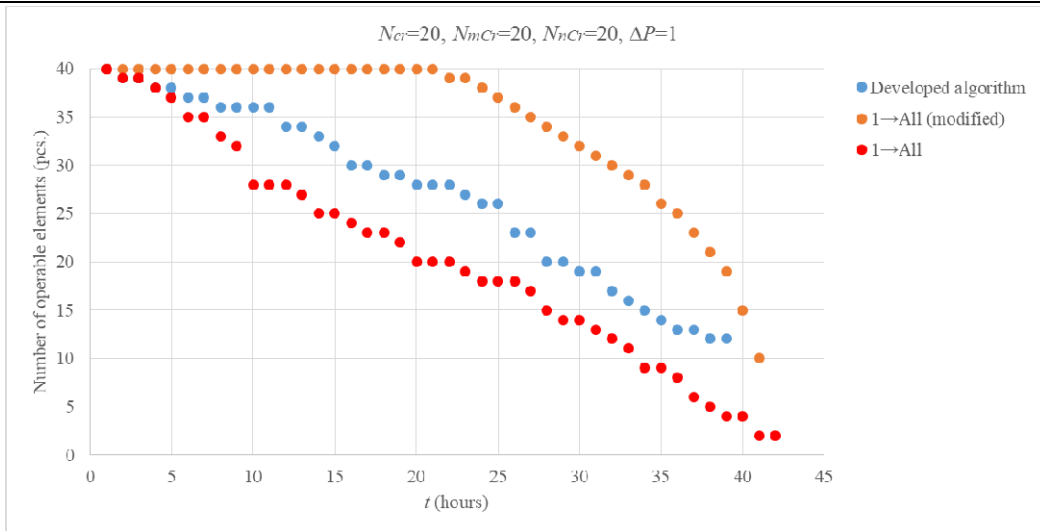


Figure 6 – Experiment graph, $\Delta P=1\%$ and $N_{el}=20$ pcs

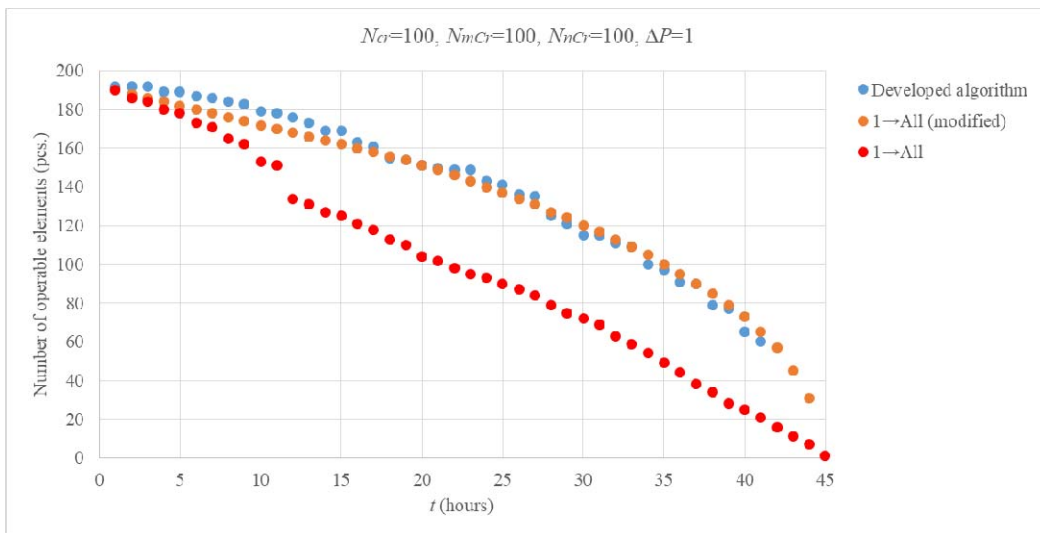


Figure 7 – Experiment graph, $\Delta P=1\%$ and $N_{el}=100$ pcs

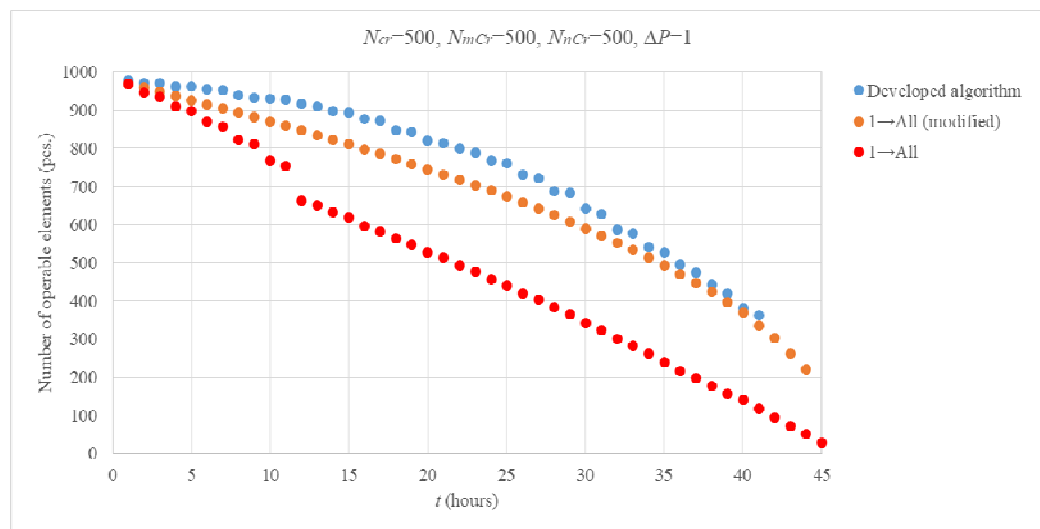


Figure 8 – Experiment graph, $\Delta P=1\%$ and $N_{el}=500$ pcs.

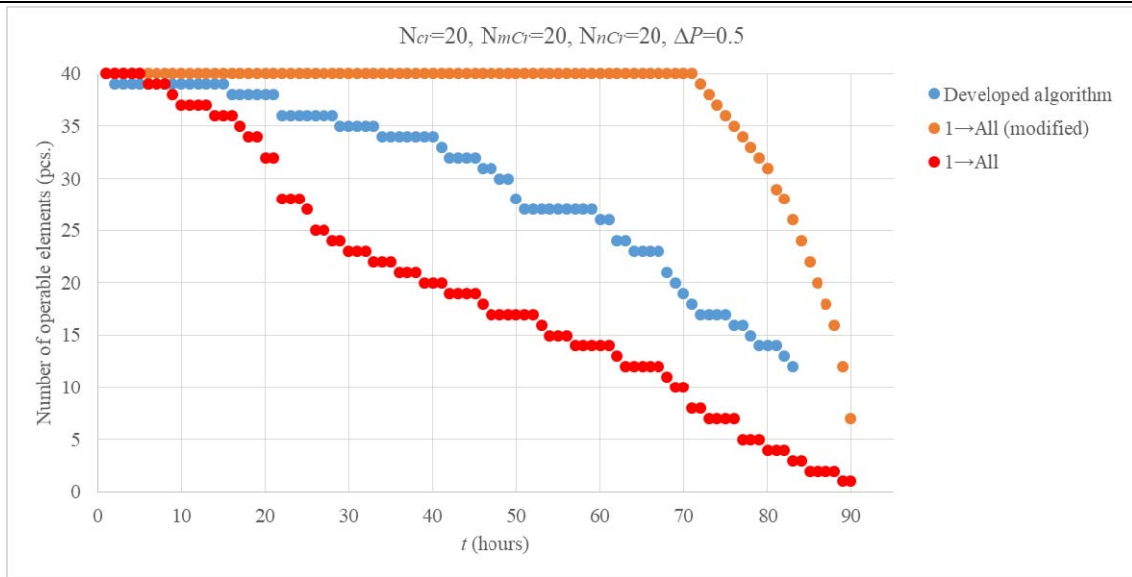


Figure 9 – Experiment graph, $\Delta P=0.5\%$ and $N_{el}=20$ pcs.

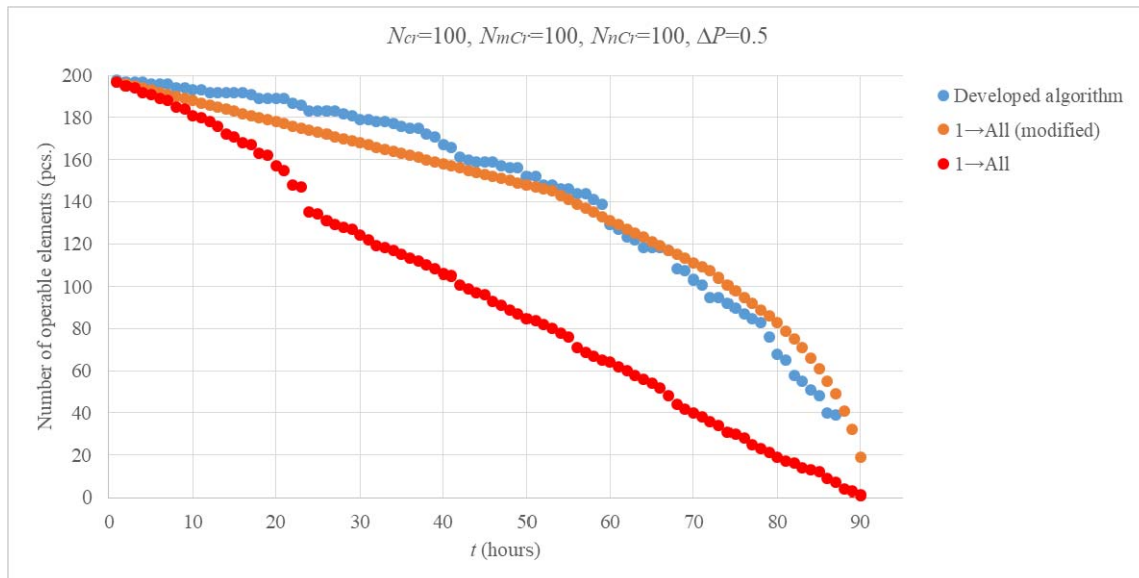


Figure 10 – Experiment graph, $\Delta P=0.5\%$ and $N_{el}=100$ pcs.

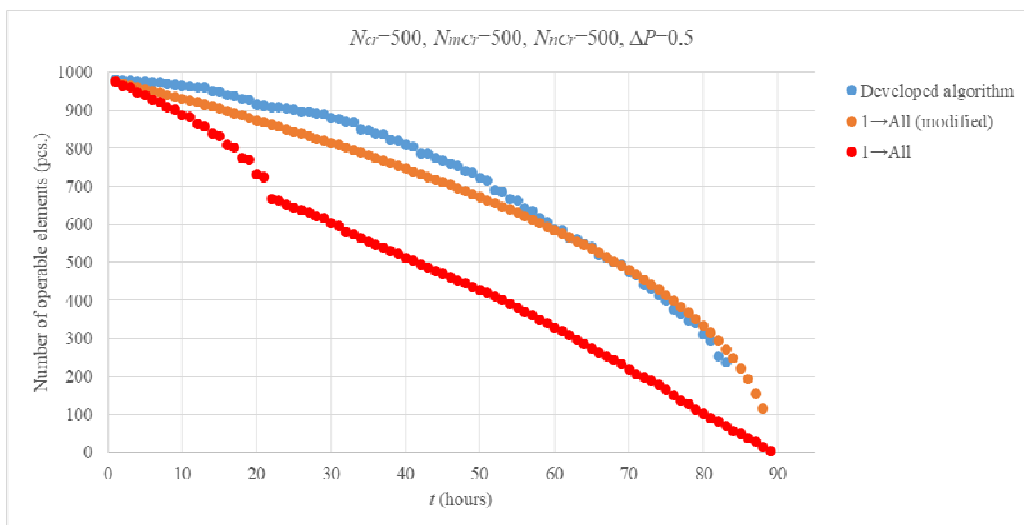


Figure 11 – Experiment graph, $\Delta P=0.5\%$ and $N_{el}=500$ pcs

5 RESULTS

As a result of the theoretical studies, an IMS model has been developed, to improve the reliability indicators of which it is proposed to use an integrated test diagnostics system. Methods to define the criteria weight were presented. One of them was chosen in the developed model and reasons of it are also presented. A mathematical model has been created for calculating the main indicators of the functioning of the IMS elements. An algorithm for redistribution of the diagnostic load has been developed, which uses the results of calculations according to the proposed model and allows increasing the performance indicators of the system elements.

A software model has been developed that implements the developed algorithm and allows it to be compared with existing algorithms. A study of a software model with various parameters was carried out and, based on the results of software modeling conclusions were drawn about the possibilities of improving the algorithm, and directions for further scientific research were formulated.

6 DISCUSSION

The several existing algorithms were chosen for the experiments. Experiments showed some advantages and disadvantages of the developed algorithms as well as advantages and disadvantages of the other algorithms. It helps to understand the best conditions for algorithm usage and improvement possibilities. Combination of best results can help to update the developed algorithm to make it more efficient in other conditions.

Therefore, the best conditions to use the developed algorithm are when the number of elements is higher than 100 (of each type). With an increase in number of elements, we can see an increase in number of operable elements. In system with 100 elements of each type the average increase in the number of work items is 6% compared to modified «1 → all» algorithm and 35% compared to «1 → all». In system with 500 elements – 7% and 45% resp. Also, with the increase in test power cost, the developed algorithm increases the number of operable elements by 2%, meanwhile other algorithms don't show the same result. It shows, that algorithm also works well in systems with high loaded elements.

These results can help to increase the IMS system elements reliability. Smooth and slow discharge of the elements battery and CPU level as a reconfiguration reason can help to extend the life of the battery and functional parts of the elements, which also saves money for routine maintenance.

CONCLUSIONS

This article presents a developed methodology for increasing the reliability of IMS elements using built-in diagnostic tools. The characteristics of the IMS elements (processor load and battery discharge rate) were analyzed, which significantly affect the reliability of their operation. It is shown that the means of test diagnostics tools (TDT) also affect the indicated parameters, but, to reduce their negative influence, a technique for their reconfiguration is

proposed in the work. It lies on reasonable reconfiguration of the objects of the built-in test diagnostics subsystem based on taking into account the performance factors (processor load) and energy efficiency (battery discharge rate). The developed methodology is scalable in number of characteristics.

The scientific novelty of the results is: developed diagnostic model of the built-in diagnostic system and algorithm for its reasonable reconfiguration. Also, to confirm theoretical assumptions, a software simulation program was developed. It makes possible to qualitatively and numerically evaluate the advantages of the developed algorithm.

The practical significance of the results of the work lies in the improving the reliability of autonomous elements of the IMS. Increasing the number of operable elements in the current moment of time will help to reduce costs of the element's service and usage.

Prospects for further research are expected in the development of algorithmic and software tools for full simulating. It's also expected to improve the method of calculation of the ΔP value. It's important, because its value is not constant, it's value should be calculated as two variable function, depends on current processor load and current charge level of the element. Also, it's interesting to combine the best results of several algorithms and update the developed one.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by a grant from Russian Foundation for Basic Research, Moscow. The developed algorithm is at the stage of implementation in the "Safe city" system of the Perm Region. It will solve the diagnostic problem of autonomous mobile complexes for fixing traffic violations.

REFERENCES

1. Chadeev V. M., Aristova N. I. Automation of Autonomous Largescale Production Systems, *Management of large – scale system development (MLSD) : 12th International Conference, Moscow, 01–03 October 2019 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911013.
2. Karimireddy T., Zhang S. Optimization of Real-Time Transmission Reliability on Wireless Industrial Automation Networks, *Automation and Computing (ICAC) : 24th International Conference, Newcastle upon Tyne, 06–07 September 2018 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.23919/ICAC.2018.8749112.
3. Manusov V. Z., Orlov D. V., Frolova V. V. Diagnostics of Technical State of Modern Transformer Equipment Using the Analytic Hierarchy Process, *Environment and Electrical Engineering and Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) : IEEE International Conference, Palermo, 12–15 June 2018 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493904.
4. Zhang J., Huang K. Fault diagnosis of coal-mine-gas charging sensor networks using iterative learning-control algorithm, *Physical Communication*, 2020, Vol. 43, pp. 1–9. DOI: 10.1016/j.phycom.2020.101175.
5. Hiramoto Y., Ohtake S., Takahashi H. A Built-In Self-Diagnostic Mechanism for Delay Faults Based on Self-Generation of Expected Signatures, *Asian Test Symposium (ATS) : 28th IEEE, Kolkata, 10–13 December 2019*:

- proceedings. Los Alamitos, IEEE, 2019, pp. 31–36. DOI: 10.1109/ATS47505.2019.000-4.
6. Fatullah M. A., Rahardjo A., Husnayain F. Analysis of Discharge Rate and Ambient Temperature Effects on Lead Acid Battery Capacity, *Innovative Research and Development (ICIRD) : 2nd IEEE International Conference, Jakarta, 28–29 June 2019 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074667.
 7. Houankpo H. G., Kozyrev D. V., Nibasumba E. et al. Mathematical Model for Reliability Analysis of a Heterogeneous Redundant Data Transmission System, *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) : The 12th International Congress, Brno, 01–03 October 2020 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2020, pp. 189–194. DOI: 10.1109/ICUMT51630.2020.9222431.
 8. Vedeshnikov V. A., Kurako E. A., Lebedev V. N. Diagnosability of digital systems structured as minimal quasicomplete 7×7 graph, *Automation and Remote Control*, 2016, Vol. 77, No. 3, pp. 485–494. DOI: 10.1134/S0005117916030103.
 9. Aminev D. A., Zhurkov A. P., Kozyrev D. V. Multi-state Diagnostics for Distributed Radio Direction Finding System, *Distributed Computer and Communication Networks (DCCN) : 20th International Conference, Moscow, 25–29 September 2017 : proceedings*. Cham, Springer, 2017, pp. 443–452. DOI: 10.1007/978-3-319-66836-9_37.
 10. Kim W., Braun J. E. Development, implementation, and evaluation of a fault detection and diagnostics system based on integrated virtual sensors and fault impact models, *Energy and Buildings*, 2020, Vol. 228, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110368.
 11. Li X., Hu Y., Li M. et al. Fault diagnostics between different type of components: A transfer learning approach, *Applied Soft Computing*, 2020, Vol. 86, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105950.
 12. Dowdeswell B. Sinha R., MacDonell S. G. Finding faults: A scoping study of fault diagnostics for Industrial Cyber-Physical Systems, *Journal of Systems and Software*, 2020, Vol. 168, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.jss.2020.110638.
 13. Freyman, V. I., Bezukladnikov I. I. The application of soft decision making on decoding and assessment of test diagnosing results within control systems elements, *Soft Computing and Measurements (SCM) : XX IEEE International Conference, Saint-Petersburg, 24–26 May 2017 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2017, pp. 124–128. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970515.
 14. Freyman V. I. Methods and algorithms of soft decoding for signals within information transmission channels between control systems elements, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 4, pp. 226–235. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-22.
 15. Wang S., Wang Z. The g-Good-Neighbor Diagnosability of Bubble-Sort Graphs under Preparata, Metze, and Chien's (PMC) Model and Maeng and Malek's (MM)* Model, *Information*, 2019, No. 10, pp. 1–14. DOI: 10.3390/info10010021.
 16. Chien C., Wang Y., Lian F. Design and Analysis of Adaptive Iterative Learning Control for Iteration-varying Nonlinear Systems, *Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS) : 7th IEEE Conference, Enshi, 25–27 May 2018 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2018, pp. 469–474. DOI: 10.1109/DDCLS.2018.8516070.
 17. Gordievsky E., Sirotkin E., Miroshnichenko A. Development of Mobile Power Complex Model on Renewable Energy Sources for Autonomous Electrical Supply of Russian Far Eastern Region, *Electrical Power Engineering (UralCon) : International Ural Conference, Chelyabinsk, 01–03 October 2019 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2019, pp. 148–153. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877665.
 18. Moore C. L., Khalsa P. S., Yilk T. A. et al. Monitoring High Performance Computing Systems for the End User, *Cluster Computing : 2015 IEEE International Conference, Chicago, 08–11 September 2015 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2015, pp. 714–716. DOI: 10.1109/CLUSTER.2015.124.
 19. Podinovskii V. V. Decision under Multiple Estimates for the Importance Coefficients of Criteria and Probabilities of Values of Uncertain Factors in the Aim Function, *Automation and Remote Control*, 2004, Vol. 65, pp. 1817–1833. DOI: 10.1023/B:AURC.0000047896.61645.43.
 20. Sun G., Hu Q., Zhang Q. et al. Fault diagnosis for rotating machinery based on artificial immune algorithm and evidence theory, *Control and Decision (CCDC) : 27th International Conference, Qingdao, 23–25 May 2015 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2015, pp. 2975–2979. DOI: 10.1109/CCDC.2015.7162380.
 21. Dasari H. C., Joyce J., Jyoti Y. et al. Analysis on Web Frameworks, *Journal of Physics : Conference Series*, 2019, Vol. 1362, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1362/1/012114.
 22. Djuraev R. X., Djabbarov S. Y., Toshtemirov T. Q. Analysis Of The Relationship Between The Indicators Of Controllability And Reliability Characteristics Of Data Transmission Systems, *Information Science and Communications Technologies (ICISCT) : International Conference, Tashkent, 04–06 November 2019 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9011980.
- Received 07.12.2020.
Accepted 25.01.2021.

УДК 621.391:004.052

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ВБУДОВАНИХ ЗАСОБІВ ДІАГНОСТИКИ

Клейман Л. А. – аспірант кафедри «Автоматика і телемеханіка», Пермський державний технічний університет, м. Перм, Росія.

Фрейдман В. І. – доктор технічних наук, професор кафедри «Автоматика і телемеханіка», Пермський державний технічний університет, м. Перм, Росія.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. У сучасному світі широкого поширення набули інформаційно-керуючі системи, які дозволяють автоматизувати технологічні процеси підприємств різних масштабів. Багато інформаційно-керуючих систем (ІКС) мають у своєму складі бездротові і автономні елементи. Під автономністю, у даному випадку, мається на увазі можливість елементів системи функціонувати певний час без додаткового підведення енергії. У зв'язку з цим, такий параметр надійності функціонування, як час автономної роботи елемента системи, стає одним з найважливіших. Одним з основних інструментів підвищення надійності і відмовостійкості елементів ІКС є використання сучасної системи діагностування.

Мета роботи. Метою роботи є розробка методу підвищення надійності функціонування автономних елементів інформаційно-керуючих систем, в тому числі створення моделі інформаційно-керуючої системи і алгоритму обґрунтованого

перерозподілу діагностичних функцій, а також програмна реалізація розробленого алгоритму, що підтверджує його більш високі показники достовірності порівняно з іншими алгоритмами.

Методи. Базовою моделлю була обрана модель Препарата-Метца-Чена. На її основі була побудована нова модель системи, що включає в себе структурно-логічний опис елементів і визначення способу їх взаємодії. Була проведена класифікація елементів за ступенем критичності виконуваних у системі функцій. На основі розробленої моделі та опису елементів був розроблений алгоритм обґрунтованого перерозподілу діагностичного навантаження, що дозволило знизити середнє енергоспоживання елементів і за рахунок цього поліпшити показники надійності. Була створена програмна реалізація розробленого алгоритму, що дозволяє чисельно оцінити його переваги. Було проведено порівняння розробленого і існуючого алгоритмів.

Результати. Розроблено модель ІКС, для підвищення показників надійності якої пропонується використовувати інтегровану систему тестової діагностики. Для визначення важливості врахованих характеристик був обраний лінійний критерій як достатній для вирішення поставлених завдань. Створено математичну модель для розрахунку основних показників функціонування елементів ІКС. Розроблено алгоритм перерозподілу діагностичного навантаження, які використовують результати розрахунків за запропонованою моделлю і дозволяють підвищити показники працездатності елементів системи. Розроблена програмна модель, що реалізує розроблений алгоритм і дозволяє порівнювати його з існуючими алгоритмами. Було проведено дослідження моделі програмного забезпечення з різними параметрами і за результатами моделювання програмного забезпечення були зроблені висновки про можливість покращення алгоритму, сформульовані напрямки подальших наукових досліджень.

Висновки. Застосування розробленого алгоритму дозволяє підвищити таку характеристику надійності елементів ІКС, як середній час безвідмовної роботи (середнє напрацювання на відмову) за рахунок збільшення часу роботи автономних елементів без підзарядки. При проведенні програмного моделювання розробленого і існуючого алгоритмів були підтверджені переваги першого, а також сформульовані теоретичні можливості для його поліпшення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: автономність, надійність, елементи інформаційно-керуючої системи, діагностика, характеристики продуктивності, алгоритм динамічного розподілу, програмна модель, вбудована система тестового діагностування.

УДК 621.391:004.052

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВСТРОЕННЫХ СРЕДСТВ ДИАГНОСТИКИ

Клейман Л. А. – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия.

Фрейман В. И. – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В современном мире широкое распространение получили информационно-управляющие системы, которые позволяют автоматизировать технологические процессы предприятий различных масштабов. Многие информационно-управляющие системы имеют в своем составе беспроводные и автономные элементы. Под автономностью, в данном случае, понимается возможность элементов системы функционировать определенное время без дополнительного подвода энергии. В связи с этим, такой параметр надежности функционирования как время автономной работы элемента системы становится одним из важнейших. Одним из основных инструментов повышения надежности и отказоустойчивости элементов ИУС является использование современной системы диагностирования.

Цель работы. Целью работы является разработка метода повышения надежности функционирования автономных элементов информационно-управляющих систем, в том числе создание модели информационно-управляющей системы и алгоритма обоснованного перераспределения диагностических функций, а также программная реализация разработанного алгоритма, подтверждающая его более высокие показатели достоверности по сравнению с другими алгоритмами.

Методы. Базовой моделью была выбрана модель Препарата-Метца-Чена. На ее основе была построена новая модель системы, включающая в себя структурно-логическое описание элементов и определение способа их взаимодействия. Была проведена классификация элементов по степени критичности выполняемых в системе функций. На основе разработанной модели и описания элементов был разработан алгоритм обоснованного перераспределения диагностической нагрузки, что позволило снизить среднее энергопотребление элементов и за счет этого улучшить показатели надежности. Была создана программная реализация разработанного алгоритма, позволяющая численно оценить его преимущества. Было проведено сравнение разработанного и существующего алгоритмов.

Результаты. Разработана модель ИУС, для повышения показателей надежности которой предлагается использовать интегрированную систему тестовой диагностики. Для определения важности учитываемых характеристик был выбран линейный критерий как достаточный для решения поставленных задач. Создана математическая модель для расчета основных показателей функционирования элементов ИУС. Разработан алгоритм перераспределения диагностической нагрузки, которые используют результаты расчетов по предложенной модели и позволяют повысить показатели работоспособности элементов системы. Разработана программная модель, реализующая разработанный алгоритм и позволяющая сравнивать его с существующими алгоритмами. Было проведено исследование модели программного обеспечения с различными параметрами и по результатам моделирования программного обеспечения были сделаны выводы о возможностях улучшения алгоритма, сформулированы направления дальнейших научных исследований.

Выводы. Применение разработанного алгоритма позволяет повысить такую характеристику надежности элементов информационно-управляющей системы, как среднее время безотказной работы (средняя наработка на отказ) за счет увеличения времени работы автономных элементов без подзарядки. При проведении программного моделирования

разработанного и существующего алгоритмов были подтверждены преимущества первого, а также сформулированы теоретические возможности для его улучшения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автономность, надежность, элементы информационно-управляющей системы, диагностика, характеристики производительности, алгоритм динамического распределения, программная модель, встроенная система тестового диагностирования.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Chadeev V. M. Automation of Autonomous Largescale Production Systems / V. M. Chadeev, N. I. Aristova // Management of large – scale system development (MLSD) : 12th International Conference, Moscow, 01–03 October 2019 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2019. – P. 1–4. DOI: 10.1109/MLSD.2019.8911013.
2. Karimireddy T. Optimization of Real-Time Transmission Reliability on Wireless Industrial Automation Networks / T. Karimireddy, S. Zhang // Automation and Computing (ICAC) : 24th International Conference, Newcastle upon Tyne, 06–07 September 2018 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2018. – P. 1–6. DOI: 10.23919/ICAC.2018.8749112.
3. Manusov V. Z. Diagnostics of Technical State of Modern Transformer Equipment Using the Analytic Hierarchy Process / V. Z. Manusov, D. V. Orlov, V. V. Frolova // Environment and Electrical Engineering and Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe) : IEEE International Conference, Palermo, 12–15 June 2018 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2018. – P. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC.2018.8493904.
4. Zhang J. Fault diagnosis of coal-mine-gas charging sensor networks using iterative learning-control algorithm / J. Zhang, K. Huang // Physical Communication. – 2020. – Vol. 43. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.phycom.2020.101175.
5. Hiramoto Y. A Built-In Self-Diagnostic Mechanism for Delay Faults Based on Self-Generation of Expected Signatures / Y. Hiramoto, S. Ohtake, H. Takahashi // Asian Test Symposium (ATS) : 28th IEEE, Kolkata, 10–13 December 2019: proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2019. – P. 31–36. DOI: 10.1109/ATS47505.2019.000-4.
6. Fatullah M. A. Analysis of Discharge Rate and Ambient Temperature Effects on Lead Acid Battery Capacity / M. A. Fatullah, A. Rahardjo, F. Husnayain // Innovative Research and Development (ICIRD) : 2nd IEEE International Conference, Jakarta, 28–29 June 2019 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2019. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIRD47319.2019.9074667.
7. Mathematical Model for Reliability Analysis of a Heterogeneous Redundant Data Transmission System / [H.G. Houankpo, D.V. Kozyrev, E. Nibasumba et al.] // Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) : The 12th International Congress, Brno, 01–03 October 2020 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2020. – P. 189–194. DOI: 10.1109/ICUMT51630.2020.9222431.
8. Vedeshnikov, V. A. Diagnosability of digital systems structured as minimal quasicomplete 7×7 graph / V. A. Vedeshnikov, E. A. Kurako, V. N. Lebedev // Automation and Remote Control. – 2016. – Vol. 77, № 3. – P. 485–494. DOI: 10.1134/S0005117916030103.
9. Aminev D. A. Multi-state Diagnostics for Distributed Radio Direction Finding System / D. A. Aminev, A. P. Zhurkov, D. V. Kozyrev // Distributed Computer and Communication Networks (DCCN) : 20th International Conference, Moscow, 25–29 September 2017 : proceedings. – Cham : Springer, 2017. – P. 443–452. DOI: 10.1007/978-3-319-66836-9_37.
10. Kim W. Development, implementation, and evaluation of a fault detection and diagnostics system based on integrated virtual sensors and fault impact models / W. Kim, J. E. Braun // Energy and Buildings. – 2020. – Vol. 228. – P. 1–13. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110368.
11. Fault diagnostics between different type of components: A transfer learning approach / [X. Li, Y. Hu, M. Li et al.] // Applied Soft Computing. – 2020. – Vol 86. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.asoc.2019.105950.
12. Dowdeswell B. Finding faults: A scoping study of fault diagnostics for Industrial Cyber-Physical Systems / B. Dowdeswell, R. Sinha, S. G. MacDonell // Journal of Systems and Software. – 2020. – Vol. 168. – P. 1–16. DOI: 10.1016/j.jss.2020.110638.
13. Freyman, V. I. The application of soft decision making on decoding and assessment of test diagnosing results within control systems elements / V. I. Freyman, I. I. Bezukladnikov // Soft Computing and Measurements (SCM) : XX IEEE International Conference, Saint-Petersburg, 24–26 May 2017 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2017. – P. 124–128. DOI: 10.1109/SCM.2017.7970515.
14. Freyman V. I. Methods and algorithms of soft decoding for signals within information transmission channels between control systems elements / V. I. Freyman // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – № 4. – P. 226–235. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-22.
15. Wang S. The g-Good-Neighbor Diagnosability of Bubble-Sort Graphs under Preparata, Metze, and Chien’s (PMC) Model and Maeng and Malek’s (MM)* Model / S. Wang, Z. Wang // Information. – 2019. – № 10. – P. 1–14. DOI: 10.3390/info10010021.
16. Chien C. Design and Analysis of Adaptive Iterative Learning Control for Iteration-varying Nonlinear Systems / C. Chien, Y. Wang, F. Lian // Data Driven Control and Learning Systems (DDCLS) : 7th IEEE Conference, Enshi, 25–27 May 2018 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2018. – P. 469–474. DOI: 10.1109/DDCLS.2018.8516070.
17. Gordievsky E. Development of Mobile Power Complex Model on Renewable Energy Sources for Autonomous Electrical Supply of Russian Far Eastern Region / E. Gordievsky, E. Sirotkin, A. Miroshnichenko // Electrical Power Engineering (UralCon) : International Ural Conference, Chelyabinsk, 01–03 October 2019 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2019. – P. 148–153. DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877665.
18. Monitoring High Performance Computing Systems for the End User / [C. L. Moore, P. S. Khalsa, T. A. Yilk et al.] // Cluster Computing : 2015 IEEE International Conference, Chicago, 08–11 September 2015 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2015. – P. 714–716. DOI: 10.1109/CLUSTER.2015.124.
19. Podinovskii V. V. Decision under Multiple Estimates for the Importance Coefficients of Criteria and Probabilities of Values of Uncertain Factors in the Aim Function / V. V. Podinovskii // Automation and Remote Control. – 2004. – Vol. 65. – P. 1817–1833. DOI: 10.1023/B:AURC.0000047896.61645.43.
20. Fault diagnosis for rotating machinery based on artificial immune algorithm and evidence theory / [G. Sun, Q. Hu, Q. Zhang et al.] // Control and Decision (CCDC) : 27th International Conference, Qingdao, 23–25 May 2015 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2015. – P. 2975–2979. DOI: 10.1109/CCDC.2015.7162380.
21. Analysis on Web Frameworks / [H. C. Dasari, J. Joyce, Y. Jyoti et al.] // Journal of Physics : Conference Series. – 2019. – Vol. 1362. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/1362/1/012114.
22. Djuraev R. X. Analysis Of The Relationship Between The Indicators Of Controllability And Reliability Characteristics Of Data Transmission Systems / R. X. Djuraev, S. Y. Djabbarov, T. Q. Toshtemirov // Information Science and Communications Technologies (ICISCT) : International Conference, Tashkent, 04–06 November 2019 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2019. – P. 1–4. DOI: 10.1109/ICISCT47635.2019.9011980.

ІГРОВА МОДЕЛЬ ОНТОЛОГІЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПРОЕКТІВ

Кравець П. О. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Литвин В. В. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Висоцька В. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. У сучасному інформаційному суспільстві із розвиненими засобами телекомунікації за допомогою мобільних пристроїв та комп'ютерних мереж актуальним є формування різноманітних віртуальних організацій та спільнот. Такі віртуальні об'єднання людей за професійними або іншими інтересами призначені для оперативного розв'язування різноманітних задач: для виконання проектних завдань, створення стартапів з метою залучення інвесторів, організації мережного маркетингу, організації дистанційного навчання, вирішення складних питань в науці, економіці та державному управлінні, побудови різноманітних Інтернет-сервісів, обговорення політичних і соціальних процесів тощо.

Метою дослідження є розроблення адаптивного марковського рекурентного методу на основі стохастичної апроксимації модифікованої умови доповняльної нежорсткості, справедливої у точках рівноваги за Нешем для розв'язування задачі ігрового покриття проектів.

Метод. У цій роботі розроблена багатоагентна ігрова модель для формування віртуальних команд виконавців проектів на основі бібліотек предметних онтологій. Необхідні для виконання проектів компетенції та здібності агентів задаються наборами онтологій. Інтелектуальні агенти випадково, одночасно і незалежно вибирають один із проектів у дискретні моменти часу. Агенти, що обрали один і той же проект, визначають поточний склад команди його виконавців. Для команд агентів обчислюється поточний штраф за недостатнє покриття компетенцій об'єднаними здібностями агентів. Цей штраф використовується для адаптивного перерахунку змішаних стратегій гравців. Збільшуються імовірності вибору тих команд, поточний склад яких призвів до зменшення штрафу за непокриття онтологій. У ході повторювальної стохастичної гри агенти сформують вектори змішаних стратегій, які забезпечать мінімізацію усереднених штрафів за непокриття проектів.

Результати. Для розв'язування задачі ігрового покриття проектів розроблено адаптивний марковський рекурентний метод на основі стохастичної апроксимації модифікованої умови доповняльної нежорсткості, справедливої у точках рівноваги за Нешем.

Висновки. Комп'ютерне моделювання підтвердило можливість застосування моделі стохастичної гри для формування команд виконавців проектів з необхідною онтологічною підтримкою в умовах невизначеності. Збіжність ігрового методу забезпечується дотриманням фундаментальних умов та обмежень стохастичної оптимізації. Достовірність експериментальних досліджень підтверджується повторюваністю отриманих результатів для різних послідовностей випадкових величин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: багатоагентна система, онтологія, проект, стохастична гра, адаптивний ігровий метод.

АБРЕВІАТУРА

ІС – інформаційна система;
ІТ – інформаційна технологія.

НОМЕНКЛАТУРА

Ω – бібліотека онтологій;
 Π – множина проектів;
 O – онтологія;
 A – множина агентів або гравців;
 G – команда агентів;
 U^i – множина чистих стратегій i -го гравця, яка визначає його належність до однієї з команд;
 Ξ^i – платіжна функція i -го гравця;
 U – множина комбінованих стратегій, отриманих спільним вибором усіх гравців;
 χ – індикаторна функція події;
 $|*|$ – потужність множини;
 C – вартість покриття k -го проекту;
 λ – ваговий коефіцієнт;

μ_i – випадкова величина (адитивний білий гаусівський шум), що моделює стохастичну невизначеність задачі;

ξ – програвш/штраф;

M_t – поточне середнє значення випадкових завдань або поточна статистична оцінка математичного сподівання випадкових завдань;

t – час;

n – кількість ігрових агентів;

p – змішана стратегія;

$\{u_t^i\}$ – передісторія стратегій, вибраних гравцем з номером i ;

$\{\zeta_\tau^i\}$ – передісторія отриманих за це програвшів;

E – символ математичного сподівання;

ω – дійсне випадкове число з рівномірним розподілом;

m – кількість проектів, або кількість віртуальних команд, або кількість чистих стратегій ігрових агентів;

ε – параметр ε -симплекса;

β – коефіцієнт порядку розширення ε -симплекса.

ВСТУП

У сучасному інформаційному суспільстві із розвиненими засобами телекомунікації за допомогою мобільних пристроїв та комп'ютерних мереж актуальним є формування різноманітних віртуальних організацій та спільнот. Такі віртуальні об'єднання людей за професійними або іншими інтересами призначені для оперативного розв'язування різноманітних задач: для виконання проектних завдань, створення стартапів з метою залучення інвесторів, організації мережного маркетингу, організації дистанційного навчання, вирішення складних питань в науці, економіці та державному управлінні, побудови різноманітних Інтернет-сервісів, ІС та ІТ, обговорення політичних і соціальних процесів тощо [1–3].

Перевагами віртуальних спільнот є географічна розподіленість, децентралізована ієрархія, відсутність відомчих бар'єрів, висока мобілізаційна здатність, інтеграція найкращого досвіду та сучасних технологій для виконання проекту, можливість залучення професійних та різнопланових спеціалістів, створення сприятливих умов для професійного зростання, партнерство, співпраця, кооперація та координація зусиль у досягненні поставленої мети, конкурентоспроможність, оперативність вирішення актуальних проблем, скорочення життєвого циклу проекту, гнучкість структури та функцій, адаптивність до змін зовнішнього світу, можливість віддаленого доступу до комп'ютерних та інформаційних ресурсів.

Моделювання динаміки віртуальних об'єднань у розподіленому інформаційному середовищі можна виконати за допомогою багатоагентних систем [4–7]. Агент – це інформаційний об'єкт з елементами штучного інтелекту, який може приймати автономні рішення, взаємодіяти з іншими агентами та людиною для досягнення поставленої перед ним мети. Група таких агентів, які розв'язують спільну задачу у комп'ютерній інформаційній мережі, називається багатоагентною системою. Для розв'язування поставленої задачі агенти повинні володіти певними знаннями в одній або декількох предметних галузях. Для формального оперування знаннями їх зручно задати у вигляді онтологій. Взаємодіючи між собою, агенти можуть формувати запити до онтологій, порівнювати онтології, об'єднувати онтології для отримання нових знань, здійснювати перетин онтологій для виявлення спільних знань, поповнювати або корегувати онтології тощо [8–12].

Метою дослідження є розроблення самонавчальної ігрової моделі онтологічної підтримки проектів шляхом формування команд агентів в умовах невизначеності. Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

– сформулювати стохастичну ігрову задачу покриття проектів агентами онтологій,

– розробити адаптивний метод та алгоритм для розв'язування ігрової задачі,

– розробити комп'ютерну програмну модель ігрового підбору агентів онтологій для виконання проектів, провести аналіз отриманих результатів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай задана бібліотека онтологій $\Omega = \{O_1, O_2, \dots, O_q\}$, кожен елемент якої описує знання у певній проблемно-орієнтованій галузі. Необхідно організувати виконання m проектів $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_m\}$ з відповідною онтологічною підтримкою. Кожен проект задається набором онтологічних знань або компетенцій $\Pi_i = \{O_1, O_2, \dots, O_r\} \subseteq \Omega$, необхідних для його виконання.

Множина агентів $A = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$, $n \geq m$ визначає кваліфіковану робочу силу на ринку праці. Здібності кожного агента визначаються набором онтологій $A_i = \{O_1^i, O_2^i, \dots, O_s^i\} \subseteq \Omega$. У загальному випадку $A_i \cap A_j \neq \emptyset$, тобто агенти можуть мати однакові здібності в одній або декількох галузях знань. Введемо припущення про повноту здібностей множини агентів та множини компетенцій, необхідних для виконання проектів. Без втрати загальності будемо вважати, що знання усіх агентів точно покривають бібліотеку онтологій $\bigcup_{A_i \in A} A_i = \Omega$, необхідну для виконання проектів $\bigcup_{\forall \Pi_k \in \Pi} \Pi_k = \Omega$.

Звідси маємо, що онтологічні знання агентів є достатніми для виконання усіх проектів.

Необхідно сформулювати множину віртуальних команд агентів $\Pi' = \{G, G, \dots, G\}$ для виконання усіх проектів. Кожна команда складається із групи агентів $G_k = \{A_1^k, A_2^k, \dots, A_g^k\}$, $k = 1..m$, де $\bigcup_{k=1..m} G_k = A$, $G_k \cap G_j = \emptyset$. Здібності команд агентів повинні відповідати вимогам щодо компетенцій, необхідних для виконання відповідних проектів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Як правило, знання агентів є вузькоспеціалізованими. Для виконання проекту, зазвичай, необхідні онтології, які описують декілька різних предметних галузей. Тоді для повного інтелектуального та інформаційного забезпечення проекту агенти повинні вміти утворювати команди (спільноти, групи, коаліції). Команда – це спільнота агентів, сформована для досягнення поставленої мети або для розв'язування задачі, використовуючи спільні знання, співробітництво та взаємодію. Для успішного виконання проекту об'єднані здібності команди агентів у знанні предметно-орієнтованих онтологій повинні покривати необхідні для виконання проекту компетенції. Крім того, у межах команди спрощується організація та координація дій агентів, зменшується складність процесу комунікації, скорочується час реакції на зміни інформаційного середовища.

Для створення команди агенти повинні на основі переговорів вміти знаходити та ідентифікувати один одного у мережі за спільними цілями та атрибутами. Централізоване формування команди обмежує автономію агентів і проблематичне для розподілених джерел даних. Ідеально, коли агенти онтологій були б здатні групуватися самостійно на основі механізмів самоорганізації як результату їх скоординованої взаємодії та застосування адаптивних правил прийняття рішень, для вироблення яких використовується тільки локальна інформація [13–15].

Онтологічна підтримка проектів є динамічним процесом з елементами невизначеності, джерелами якої можуть бути нечітко задані цілі, недовизначені початкові дані, зміни у ході виконання проекту, розвиток онтологій у часі, недосконалість знань виконавців проекту, неконтрольовані зовнішні чинники тощо [16–19]. Тому агенти онтологій, залучені до виконання проектів, повинні будуватися як адаптивні, самонавчальні системи.

Багатоагентній підтримці віртуальних спільнот приділяється значна увага у сучасній науковій літературі [20–22]. Однак, проблема адаптивного покриття проектів онтологіями на основі формування команд агентів з проблемно-орієнтованими знаннями є недостатньо висвітленою.

Покриття проектів належить до класу NP-складних задач комбінаторної оптимізації. Для розв'язування таких задач за допустимий поліноміальний час використовують наближені алгоритми, наприклад, жадібний, генетичний, мурашиної колонії, штучних нейронних мереж та інші [23–28].

У цій роботі нами пропонується новий метод наближеного розв'язування задачі покриття проектів, який оснований на результатах теорії стохастичних ігор [29–31]. Формування команд агентів для виконання проектів формулюється як конкурентна задача закріплення агента за одним із проектів. У процесі пошуку оптимального покриття допускається перехід агента з одного проекту на інший, що тимчасово може порушити онтологічну підтримку проекту і обумовити неможливість його виконання. Розв'язування конкурентних задач вивчає теорія ігор, а в умовах невизначеності – теорія стохастичних ігор. Дискретна детермінована гра може бути розв'язана за скінченну кількість обчислювальних кроків. Дискретна стохастична повторювальна гра розгортається на безмежному відрізку часу. Така гра забезпечує багатокроковий адаптивний пошук одного із розв'язків задачі із заданою точністю за прийнятний для практичного застосування час. Може бути використана для розв'язування багатокритеріальних оптимізаційних задач у детермінованій або стохастичній постановці, але особливо доцільна та ефективна в умовах стохастичної невизначеності, коли повний перебір варіантів не може бути виконаний у зв'язку з випадковим відгуком керованої системи на вибір однієї і тієї ж стратегії у різні моменти часу.

© Кравець П. О., Литвин В. В., Висоцька В. А., 2021
DOI 10.15588/1607-3274-2021-1-17

Адаптивний механізм стохастичної гри дозволяє з плином часу компенсувати нестачу апріорної інформації на основі збору та опрацювання поточних даних на кожному кроці гри. Враховуючи наявність конкурентних цілей та факторів апріорної невизначеності при керуванні проектами, з наукової та практичної точок зору є актуальним застосування методів стохастичних ігор для онтологічного забезпечення проектів.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Формування віртуальних команд агентів виконаємо методом стохастичної гри, яка задається кортежем $(A, U^i, \Xi^i | \forall A_i \in A)$, де $U^i = \{u_1^i, u_2^i, \dots, u_m^i\}$; $\Xi^i: U \rightarrow R^1$; $U = \times_{A_i \in A} U^i$.

Агенти можуть самостійно вибирати одну із команд. Можливі варіанти вибору задаються векторами стратегій U^i . Вибір варіантів здійснюється незалежно і випадково у моменти часу $t=1, 2, \dots$. Агент $A_i \in A$ заноситься у групу G_k , якщо вибрана ним чиста стратегія u_t^i відповідає стратегії групи u_t^k :

$$G_k = \bigcup_{A_i \in A} \chi(u_t^i = u_t^k) \cdot A_i, k = 1..m,$$

де $\chi(*) \in \{0, 1\}$, $1 \cdot A_i = A_i$, $0 \cdot A_i = \emptyset$.

Необхідною умовою успішного виконання проекту Π_k є його повна онтологічна підтримка командою агентів. Здібності команди агентів повинні покривати компетенції, необхідні для виконання проекту:

$$\bigcup_{A_j^k \in G_k} A_j^k \supseteq \Pi_k, k = 1..m.$$

Бажано забезпечити ідеальне покриття усіх проектів, коли $\Pi' = \Pi$.

За порушення покриття проекту Π_k нараховується штраф, який вимірюється відносною кількістю непокритих онтологій проекту (безрозмірна величина):

$$\xi_t^k[\Pi] = \left| \Pi_k \setminus \bigcup_{A_j^k \in G_k} A_j^k \right| / |\Pi_k|, k = 1..m, \quad (1)$$

де $\Pi_k \neq \emptyset$, $\xi_t^k[\Pi] \in [0, 1]$.

Оцінка (1) не виключає варіант, коли всі агенти оберуть один або декілька проектів, а решта проектів залишаться непокритими. Так, вибравши тільки один з проектів, агенти завідомо (у силу повноти покриття бібліотеки онтологій здібностями агентів та компетенціями, необхідними для виконання проектів) забезпечать його покриття і отримають мінімальний програш, що надалі спонукає їх залишатися на цьому проекті. Отже, така оцінка є недостатньою для

забезпечення покриття усіх проектів. Оскільки декілька агентів можуть мати знання в однакових предметних галузях, то виникає задача комбінаторної оптимізації про мінімально необхідне покриття проектів, яка належить до класу NP-складних задач.

Замість розв'язування складної задачі про мінімальне покриття множин введемо платіж за відхилення від запланованої вартості проекту Π_k (безрозмірна відносна величина):

$$\xi_t^k[2] = (C'(\Pi_k) - C(\Pi_k)) / \max\{C'(\Pi_k), C(\Pi_k)\}, \quad (2)$$

де $C'(\Pi_k) = \sum_{A_j^k \in G_k} C(A_j^k)$ – вартість покриття k -го проекту, $C(A_j^k) > 0$ – вартість послуг j -го агента, залученого до виконання k -го проекту (самооцінка здібностей агента у грошовому вимірі), $C(\Pi_k) > 0$ – собівартість виконання k -го проекту, $\xi_t^k[2] \in [-1, 1]$.

Якщо $\xi_t^k[2] < 0$, то маємо заохочення (від'ємний штраф), інакше – штраф. Так заохочується підбір команди агентів з мінімальною сумарною вартістю пропонованих послуг. Якщо сумарна вартість пропонованих послуг перевищує заплановану вартість проекту, то підбір такого складу команди штрафується. Тим самим уникаємо надмірного покриття проекту онтологіями команди виконавців робіт (у межах запланованої вартості проекту), або інакше – надмірного дублювання здібностей агентів, які вибрали конкретний проект.

Комплексний штраф за недостатню організацію виконання проекту Π_k складається із штрафів (1) та (2):

$$\zeta_t^k = \lambda \zeta_t^k[1] + (1 - \lambda) \xi_t^k[2] + \mu_t, \quad (3)$$

де $\lambda \in [0, 1]$. Якщо $\mu_t = 0 \quad \forall t = 1, 2, \dots$, то поточний програвш $\zeta_t^k \in [-1, 1]$.

Усі агенти команди G_k , залучені до виконання проекту Π_k , отримують однаковий поточний програвш (3):

$$\zeta_t^i = \zeta_t^k \quad \forall A_i \in G_k, \quad \forall G_k \in \Pi'. \quad (4)$$

Приймається припущення, що випадкові програвші $\{\zeta_t^i(u)\}$ гравців є незалежними $\forall u \in U$, $i = 1..m$, $t = 1, 2, \dots$, мають постійне математичне сподівання $E\{\zeta_t^i(u)\} = v(u) = \text{const}$ та обмежений другий момент $\sup_t E\{[\zeta_t^i(u)]^2\} = \sigma^2(u) < \infty$. Стохастичні характеристики випадкових програвшів не відомі гравцям априорі.

Хід гри оцінюється функціями середніх програвшів ігрових агентів:

$$Z_t^i = \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t \zeta_\tau^i = \lambda \Xi_t^i[1] + (1 - \lambda) \Xi_t^i[2] + M_t, \quad \forall A_i \in A, \quad (5)$$

де $\Xi_t^i[1] = \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t \xi_\tau^i[1]$ – функція середніх програвшів за недостатню онтологічну підтримку проекту, $\Xi_t^i[2] = \frac{1}{t} \sum_{\tau=1}^t \xi_\tau^i[2]$ – функція середніх програвшів за порушення запланованої вартості проекту, $M_t = t^{-1} \sum_{\tau=1}^t \mu_\tau$. Для білого гаусівського шуму $\lim_{t \rightarrow \infty} M_t = 0$.

Метою кожного гравця є мінімізація власної функції середніх програвшів (5) у часі:

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} Z_t^i \rightarrow \min \quad \forall A_i \in A. \quad (6)$$

Отже, стохастична гра онтологічної підтримки проектів полягає у наступному. Обчислюючи поточні програвші $\{\zeta_t^i\}$, кожен гравець $A_i \in A$ повинен навчитися вибирати чисті стратегії $\{u_t^i\}$ так, щоб з плином часу $t = 1, 2, \dots$ забезпечити виконання системи критеріїв (6). Якість ігрового формування команд агентів оцінюється такими характеристиками:

1) системною функцією середніх програвшів багатоагентної системи:

$$Z_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_t^i = \lambda \Xi_t[1] + (1 - \lambda) \Xi_t[2] + M_t, \quad (7)$$

де $\Xi_t[1] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Xi_t^i[1]$ – системна складова програвшів за

недосконалість покриття проектів, $\Xi_t[2] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Xi_t^i[2]$ – системна складова програвшів за порушення балансу вартості проектів;

2) середньою нормою змішаних стратегій гравців:

$$\Delta_t = \frac{1}{nt} \sum_{\tau=1}^t \sum_{i=1}^n \|p_\tau^i\|, \quad (8)$$

де $\|\cdot\| \in R^1$ – евклідова норма вектора.

Розв'язки ігрової задачі повинні задовольняти одну з умов колективної оптимальності, наприклад, Неша, Парето або іншу, залежно від методу формування послідовностей стратегій $\{u_t^i\} \forall A_i \in A$.

Необхідні для розв'язування ігрової задачі послідовності чистих стратегій $\{u_t^i\}$ отримаємо з випадкових розподілів, отриманих на основі динамічних векторів змішаних стратегій $p_t^i = (p_t^i[1], p_t^i[2], \dots, p_t^i[m]) \forall i \in D$, елементи яких є умовними імовірностями входження i -го агента в k -ту команду:

$$p_t^i[k] = P\left\{u_t^i = u^i[k] \mid u_\tau^i, \zeta_\tau^i (\tau = 1, 2, \dots, t-1)\right\},$$

де $k = 1..m$.

Побудову методу розв'язування стохастичної гри виконаємо на основі стохастичної апроксимації умови доповняльної нежорсткості детермінованої гри, справедливої для змішаних стратегій у точках рівноваги за Нешем [32].

Для цього визначимо полілінійну функцію середніх програвів для детермінованої гри:

$$V^i(p) = \sum_{u \in U} v^i(u) \prod_{A_j \in A; u^j \in u} p^j(u^j),$$

де $v(u) = M\{\zeta_t^i(u)\}$.

Тоді умова доповняльної нежорсткості у векторній формі матиме вигляд:

$$\nabla_{p^i} V^i(p) - e^m V^i(p) = 0 \quad \forall A_i \in A,$$

де $\nabla_{p^i} V^i(p)$ – градієнт полілінійної функції середніх програвів; $e^m = ((1)_k \mid k = 1..m)$ – вектор, всі елементи якого дорівнюють 1; $p \in S^M$ – комбінована змішана стратегія гравців, задана на одиничному симплексі S^M ($M = m^n$).

Щоб врахувати розв'язки на межі одиничного симплексу, виконаємо зважування вектора доповняльної нежорсткості елементами вектора змішаних стратегій:

$$\text{diag}(p^i) (\nabla_{p^i} V^i(p) - e^m V^i(p)) = 0,$$

де $\text{diag}(p^i)$ – квадратна діагональна матриця порядку m , складена з елементів вектора $p^i \forall A_i \in A$.

Враховуючи, що

$$\text{diag}(p^i) [\nabla_{p^i} V^i - e^m V^i] = E\{\zeta_t^i [e(u_t^i) - p_t^i] \mid p_t^i = p^i\}$$

методом стохастичної апроксимації [34–35] отримаємо таку рекурентну залежність:

$$p_{t+1}^i = \pi_{\varepsilon_{t+1}}^m \left\{ p_t^i - \gamma_t \zeta_t^i (e(u_t^i) - p_t^i) \right\} \quad \forall A_i \in A, \quad (9)$$

де $\pi_{\varepsilon_{t+1}}^m$ – проєктор на m -вимірний одиничний симплекс S^m [33]; $\gamma_t > 0$ та $\varepsilon_t > 0$ – монотонно спадні послідовності додатних величин; $e(u_t^i)$ – одиничний вектор, який вказує на вибір агентом чистої стратегії $u_t^i = u^i \in U^i$.

Проектування $\pi_{\varepsilon_{t+1}}^m$ на розширений ε_t -симплекс $S_{\varepsilon_{t+1}}^m \subseteq S^m$ забезпечує виконання умови $p_t^i[k] \geq \varepsilon_t, k = 1..m$, необхідної для повноти статистичної інформації щодо вибору чистих стратегій, а параметр $\varepsilon_t \rightarrow 0$ використовується як додатковий елемент керування збіжністю рекурентного методу.

Параметри γ_t та ε_t можуть бути обчислені так:

$$\gamma_t = \gamma t^{-\alpha}, \quad \varepsilon_t = \varepsilon t^{-\beta}, \quad (10)$$

де $\gamma > 0; \alpha > 0; \varepsilon > 0; \beta > 0$.

Збіжність змішаних стратегій (9) до оптимальних значень з імовірністю 1 та в середньоквадратичному визначається співвідношеннями параметрів γ_t та ε_t , які повинні задовольняти фундаментальні умови стохастичної апроксимації [33–35].

Вибір чистої стратегії $u_t^i[k] \forall A_i \in A$ виконується гравцями на основі динамічного випадкового розподілу (9):

$$k = \arg \left(\min_{k=1..m} \sum_{j=1}^k p_t^i(u_t^i[j]) > \omega \right) \in \{1..m\}, \quad (11)$$

де $\omega \in [0, 1]$.

Стохастична гра розпочинається з ненавчених змішаних стратегій зі значеннями елементів $p_0^i[k] = 1/m$, де $k = 1..m$. На протязі наступних моментів часу динаміка векторів змішаних стратегій визначається за марковським рекурентним методом (9) – (11).

Отже, в моменти часу $t = 1, 2, \dots$ кожен гравець на основі змішаної стратегії p_t^i вибирає чисту стратегію u_t^i (11) і до моменту часу $t+1$ отримує поточні програти ζ_t^i (4), після чого обчислює змішану стратегію p_{t+1}^i згідно з (9)–(10).

Завдяки цілеспрямованій динамічній перебудові змішаних стратегій на основі опрацювання поточних програвів, метод (9)–(11) забезпечує адаптивний вибір чистих стратегій у часі.

Алгоритм розв'язання стохастичної гри.

Крок 1. Задати початкові значення параметрів:

$t = 0$ – початковий момент часу;

m – кількість проектів, або кількість віртуальних команд, або кількість чистих стратегій ігрових агентів;

n – кількість агентів;

$\Omega = \{O_1, O_2, \dots, O_q\}$ – бібліотека онтологій;

$\Pi_k = \{O_1, O_2, \dots, O_r\} \subseteq \Omega$, $k = 1..m$ – набори онтологічних знань або компетенцій, необхідних для виконання проектів;

$A_i = \{O_1^i, O_2^i, \dots, O_s^i\} \subseteq \Omega$, $i = 1..n$ – набори онтологій, що визначають здібності агентів;

$C(\Pi) = (C(\Pi_1), C(\Pi_2), \dots, C(\Pi_m))$ – собівартість проектів;

$C(A) = (C(A_1), C(A_2), \dots, C(A_n))$ – вартість послуг агентів;

$U^i = \{u^i[1], u^i[2], \dots, u^i[m]\}$, $i = 1..n$ – вектори чистих стратегій агентів;

$p_0^i = ((1/m)_k | k = 1..m)$, $i = 1..n$ – початкові значення змішаних стратегій агентів;

$\gamma > 0$ – параметр кроку навчання;

$\alpha \in (0, 1]$ – коефіцієнт порядку кроку навчання;

ε – параметр ε -симплекса;

$\beta > 0$ – коефіцієнт порядку розширення ε -симплекса;

$\lambda \in [0, 1]$ – ваговий коефіцієнт;

t_{\max} – максимальна кількість кроків методу.

Крок 2. Вибрати чисті стратегії (команди) $u_t^i \in U^i$ агентів $i = 1..n$ згідно з (11).

Крок 3. Обчислити значення поточних програшів ζ_t^i , $i = 1..n$ згідно з (4).

Крок 4. Обчислити величину параметрів γ_t та ε_t згідно з (10).

Крок 5. Обчислити елементи векторів змішаних стратегій p_t^i , $i = 1..n$ згідно з (9).

Крок 6. Обчислити якісні характеристики Z_t (7) та Δ_t (8) покриття проектів.

Крок 7. Задати наступний момент часу $t := t + 1$.

Крок 8. Якщо $t < t_{\max}$, то перейти на крок 2, інакше – кінець гри.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Потрібно підібрати агентів для виконання двох проектів $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2\}$ з онтологічним забезпеченням $\Omega = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5\}$. Необхідні для виконання проектів знання (компетенції) задаються множинами онтологій: $\Pi_1 = \{O_1, O_3, O_5\}$, $\Pi_2 = \{O_2, O_4\}$. Претенденти на участь у проектах задаються множиною агентів $A = \{A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6\}$, кожен

елемент якої визначається множиною онтологій (здібностями агентів): $A_1 = \{O_1, O_2\}$, $A_2 = \{O_2, O_3\}$, $A_3 = \{O_3, O_4\}$, $A_4 = \{O_4, O_5\}$, $A_5 = \{O_1, O_4\}$, $A_6 = \{O_2, O_5\}$. Заплановані витрати для виконання проектів (собівартість) становлять

$C(\Pi) = (10000, 6000)$ грошових одиниць. Вартість кваліфікованої робочої сили на ринку праці визначається таким масивом значень: $C(A) = (4000, 2500, 1500, 3500, 2500, 2000)$.

Необхідно сформувати дві віртуальних команди агентів $\Pi' = \{G_1, G_2\}$, онтологічні знання яких покривають кожен з проектів при обмеженнях на вартість проектів $C'(\Pi) \leq C(\Pi)$, де $C'(\Pi)$ – масив вартостей покриття проектів.

Задача онтологічної підтримки проектів може мати декілька розв'язків. Для даних контрольного прикладу можливі такі варіанти покриття проектів $\Pi' \supseteq \Pi$:

1) $G_1 = \{A_1, A_2, A_4\}$, $G_2 = \{A_3, A_5, A_6\}$,

$C'(\Pi) = (10000, 6000)$;

2) $G_1 = \{A_1, A_3, A_6\}$, $G_2 = \{A_2, A_4, A_5\}$,

$C'(\Pi) = (7500, 8500)$;

3) $G_1 = \{A_2, A_4, A_5\}$, $G_2 = \{A_1, A_3, A_6\}$,

$C'(\Pi) = (8500, 7500)$;

4) $G_1 = \{A_3, A_5, A_6\}$, $G_2 = \{A_1, A_2, A_4\}$,

$C'(\Pi) = (6000, 9000)$;

5) $G_1 = \{A_2, A_4, A_5, A_6\}$, $G_2 = \{A_1, A_3\}$,

$C'(\Pi) = (10500, 5500)$;

6) $G_1 = \{A_2, A_3, A_5, A_6\}$, $G_2 = \{A_1, A_4\}$,

$C'(\Pi) = (8500, 7500)$;

7) $G_1 = \{A_2, A_3, A_4, A_6\}$, $G_2 = \{A_1, A_5\}$,

$C'(\Pi) = (9500, 6500)$;

8) $G_1 = \{A_1, A_4, A_5, A_6\}$, $G_2 = \{A_2, A_3\}$,

$C'(\Pi) = (12000, 4000)$;

9) $G_1 = \{A_1, A_3, A_5, A_6\}$, $G_2 = \{A_2, A_4\}$,

$C'(\Pi) = (10000, 6000)$;

10) $G_1 = \{A_1, A_3, A_4, A_6\}$, $G_2 = \{A_2, A_5\}$,

$C'(\Pi) = (11000, 5000)$;

11) $G_1 = \{A_1, A_2, A_4, A_5\}$, $G_2 = \{A_3, A_6\}$,

$C'(\Pi) = (12500, 3500)$;

12) $G_1 = \{A_1, A_2, A_3, A_5\}$, $G_2 = \{A_4, A_6\}$,

$C'(\Pi) = (10500, 5500)$;

$$13) G_1 = \{A_1, A_2, A_3, A_4\}, G_2 = \{A_5, A_6\}, \\ C'(\Pi) = (11500, 4500).$$

Усі варіанти забезпечують надлишкове покриття обох проектів командами агентів, що представляють онтології. Надлишковість покриття визначається зовнішніми обставинами, пов'язаними з тим, що агенти володіють знаннями більш ніж в одній предметній галузі.

Варіанти 1 та 9 визначають квазіоптимальний розв'язок задачі, оскільки для них виконуються обмеження по вартості проектів, але в обох варіантах є надлишкові покриття проектів групами агентів:

– варіант 1:

$$\Pi'_1(G_1) = A_1 \cup A_2 \cup A_4 = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5\} \supset \Pi_1,$$

$$\Pi'_2(G_2) = A_3 \cup A_5 \cup A_6 = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5\} \supset \Pi_2,$$

– варіант 9:

$$\Pi'_1(G_1) = A_1 \cup A_3 \cup A_5 \cup A_6 = \{O_1, O_2, O_3, O_4, O_5\} \supset \Pi_1$$

$$\Pi'_2(G_2) = A_2 \cup A_4 = \{O_2, O_3, O_4, O_5\} \supset \Pi_2.$$

Крім того, якщо декілька агентів мають знання в одній і тій же предметній галузі, то всередині команди може виникнути конкуренція за можливість застосування цих знань при виконанні проекту. Так, у варіанті 1 агенти A_1 та A_2 групи G_1 конкурують щодо застосування онтології O_2 для виконання проекту Π_1 , а агенти A_3 та A_5 групи G_2 конкурують щодо онтології O_4 для виконання проекту Π_2 . У варіанті 9 у групі G_1 виконавців проекту Π_1 виникає конкуренція за використання онтології O_1 агентами A_1 та A_5 , використання онтології O_2 агентами A_1 та A_6 , використання онтології O_4 агентами A_3 та A_5 . Альтернативою конкуренції є кооперація і взаємне підсилення знань агентів в одній і тій же предметній галузі. У варіантах 2 – 4, 6, 7 перевищена вартість виконання проекту G_2 . У варіантах 5, 8, 10 – 13 перевищена вартість виконання проекту G_1 .

Ігровий алгоритм повинен навчитися вибирати один із наведених варіантів покриття проектів (у межах їх заданої собівартості) агентами-виконавцями робіт, що мають необхідні для цього знання у вигляді наборів онтологій.

5. РЕЗУЛЬТАТИ

Комп'ютерне моделювання виконаємо ігровим методом (9) – (11) з такими параметрами: $U^i = \{u_1^i, u_2^i\}$, $\gamma = 1$, $\varepsilon = 0,999/m$, $\alpha = 0,01$, $\beta = 2$, $\lambda = 0,5$, $t_{\max} = 10^4$.

На рис. 1 та рис. 2 в логарифмічному масштабі зображено графіки функцій середніх програвів гравців Z_t , $\Xi_t[1]$, $\Xi_t[2]$ та середньої норми змішаних стратегій Δ_t , які характеризують збіжність стохастичної гри онтологічної підтримки проектів.

© Кравець П. О., Литвин В. В., Висоцька В. А., 2021
 DOI 10.15588/1607-3274-2021-1-17

Вибір логарифмічного масштабу зумовлений необхідністю компактного зображення результатів моделювання з великим діапазоном значень. Для логарифмічної шкали програмно опрацьовуються винятки подій, коли поточні значення характеристичних функцій гри менші від нуля або дорівнюють нулю. Як видно на рис. 1 та рис. 2, ігровий метод (9)–(11) забезпечує мінімізацію функцій середніх програвів Z_t , $\Xi_t[1]$, $\Xi_t[2]$ у часі. Функція середньої норми змішаних стратегій Δ_t досягає логарифмічного нуля, що ілюструє отримання розв'язків гри у чистих стратегіях.

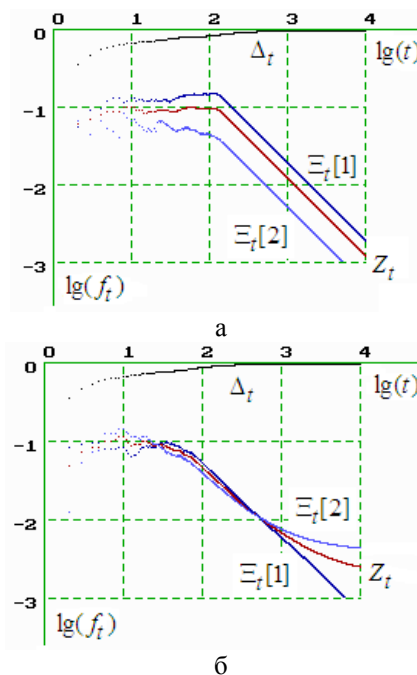


Рисунок 1 – Розв'язування стохастичної гри при відсутності завад: а) для варіанту 1; б) для варіанту 10

Зображене на рис. 1а лінійне (на логарифмічній шкалі) спадання графіків функцій системних програвів гравців Z_t , $\Xi_t[1]$, $\Xi_t[2]$ свідчить про досягнення квазіоптимального розв'язку задачі покриття проектів онтологіями. Практика комп'ютерного моделювання показує, що майже у 90% експериментів метод (9)–(11) забезпечує отримання квазіоптимального покриття, що відповідає варіантам 1 або 9.

Для інших допустимих варіантів покриття, наприклад, для варіанту 10, значення функції середніх програвів $\Xi_t[1]$ за недосконалість покриття проектів лінійно зменшується, що вказує на забезпечення покриття усіх проектів (рис. 1б). Значення функції середніх програвів $\Xi_t[2]$ за порушення балансу вартості проектів прямує до стабільного значення, що свідчить про відхилення витрат на виконання проектів від запланованої вартості проектів.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Збіжність методу (9)–(11) до оптимального колективного розв'язку залежить від точності налаштування його параметрів, співвідношення яких повинні задовольняти фундаментальні умови стохастичної апроксимації. Експериментально встановлено, що зменшення параметра $\beta \in (0, 2]$ пригальмує швидкість розширення ε -симплекса і призводить до зростання кількості кроків стохастичної гри, необхідних для пошуку одного з варіантів покриття проектів. Аналогічний ефект спостерігається при збільшенні параметра $\alpha \in (0, 1]$, що прискорює зменшення пошукового кроку рекурентного методу. Іншими словами, для запровадженого рекурентного перетворення (9) із прийнятим способом формування штрафів (4) розширення ε -симплекса повинно бути досить швидким, а зменшення пошукового кроку – повільним. Швидке розширення ε -симплекса практично не обмежує величини кроку пошукового методу. Велике, на початковому відрізку часу, значення пошукового кроку призводить до значної динаміки векторів змішаних стратегій, що дає можливість гравцям випадково вибрати інші чисті стратегії (переходити від одного проекту до іншого), шукаючи оптимальний варіант покриття проектів необхідними онтологіями. З плином часу величина пошукового кроку стає меншою, динаміка векторів змішаних стратегій стабілізується, закріплюючи сформовані команди агентів на виконанні конкретних проектів. Хід розв'язання стохастичної гри в умовах дії завад зображено на рис. 2. Стохастична невизначеність покриття проектів задається нормальним розподілом $\mu_t \sim Normal(e, d)$ з математичним сподіванням $e = 0$ та дисперсією $d = 0, 25$. Емпіричний нормальний розподіл отримано за формулою:

$$\mu_t = e + \sqrt{d} \left(\sum_{j=1}^{12} \omega_{j,t} - 6 \right),$$

де $\omega \in [0, 1]$ – дійсне випадкове число з рівномірним розподілом.

Дія випадкового шуму спричиняє нерегулярність величини пошукового кроку рекурентного методу, який на кожному кроці стохастичної гри додатково змінюється пропорційно до дисперсії завади. Це позначається на вигляді системної функції середніх програшів Z_t , яка веде себе як більш виражений випадковий процес.

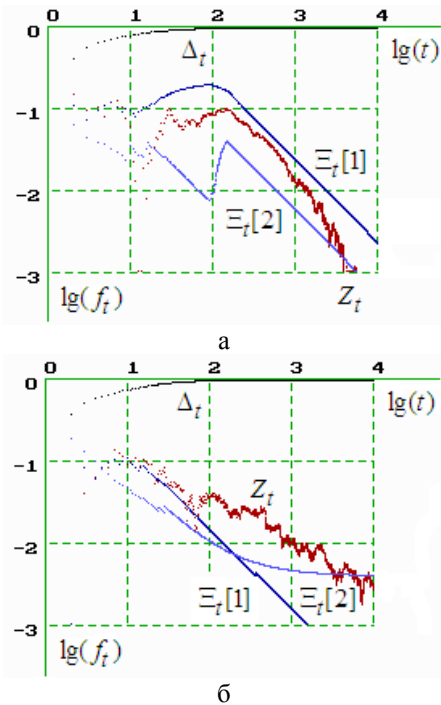


Рисунок 2 – Розв'язування стохастичної гри в умовах завад: а) для варіанту 1; б) для варіанту 10

Додаткова рандомізація поточних програшів білим гаусівським шумом з невеликою дисперсією (для прикладу, $d = 0, 25$) не справляє значного впливу на результат навчання стохастичної гри. Однак, збільшення дисперсії завад призводить до сповільнення або унеможливлення розв'язання ігрової задачі покриття проектів.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано новий самонавчальний ігровий метод формування віртуальних команд агентів для виконання проектів в умовах невизначеності. На початку гри змішані стратегії ігрових агентів є ненавченими і забезпечують рівномірний вибір проектів. Процес навчання агентів полягає у цілеспрямованій зміні векторів змішаних стратегій на кожному кроці гри з метою мінімізації функції середніх програшів за недостатню онтологічну підтримку проектів. На фінальному етапі навчання стохастичної гри відбувається стабілізація змішаних стратегій агентів. Елементи навчених змішаних стратегій задають імовірності належності агентів до однієї з команд. Результатом гри є формування команд агентів, онтологічні знання яких покривають компетенції, необхідні для виконання проектів.

Адаптивний багатокроковий метод розв'язування стохастичної гри побудовано на основі стохастичної апроксимації модифікованої умови доповняльної нежорсткості, справедливої у точках рівноваги за Нешем. Збіжність гри визначається фундаментальними умовами стохастичної апроксимації і залежить від розмірності ігрової задачі (кількості

гравців і стратегій) та співвідношення параметрів рекурентного методу її розв'язування. Запропонований метод ґрунтується на опрацюванні поточних реакцій ігрового середовища в умовах апіорної невизначеності і у зв'язку з цим має повільну швидкість збіжності, що компенсується високою обчислювальною потужністю сучасних комп'ютерних систем.

Недоліком запропонованого ігрового методу є те, що у загальному випадку він не гарантує ідеального покриття, оскільки не забезпечує відсіювання агентів, здібності яких є надлишковими для виконання проекту. Як варіант вирішення цієї проблеми можна запропонувати створення додаткових фіктивних проектів з пропозиціями, які будуть привабливими для зайвої робочої сили інших проектів.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної теми «Методи та засоби функціонування систем підтримки прийняття рішень на основі онтологій» (ID:839 2017-05-15 09:20:01 (2459-315)). Дослідження провадились в межах спільних наукових досліджень кафедри інформаційних систем та мереж НУ «Львівська політехніка» на тему «Дослідження, розроблення і впровадження інтелектуальних розподілених інформаційних технологій та систем на основі ресурсів баз даних, сховищ даних, просторів даних та знань з метою прискорення процесів формування сучасного інформаційного суспільства». Наукові дослідження провадилися також в рамках ініціативної тематики досліджень кафедри ІСМ НУ «Львівська політехніка» на тему «Розроблення інтелектуальних розподілених систем на основі онтологічного підходу з метою інтеграції інформаційних ресурсів».

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Virtual Communities: Concepts, Methodologies, Tools and Applications / Information Resources Management Association (USA). – Vol. 1–4. – Hershey : IGI Global, 2011. – 2930 p. – DOI: 10.4018/978-1-60960-100-3.
2. Hutchings T. Real Virtual Community / T. Hutchings // *Word & World*. – 2015. – Vol. 35, № 2. – P. 151–161.
3. Roy A. A Typology of Virtual Communities on the Internet: Contingency Marketing Approaches / A. Roy // *Marketing & Tourism : First International Academic Research Conference*, Dubai-UAE, 22–24 May 2015 : proceedings. – Dubai : MTCL, 2015. – P. 1–11.
4. Weiss G. Multiagent Systems / G. Weiss. – Cambridge : The MIT Press, 2016. – 920 p.
5. Byrski A., Kisiel-Dorohinicki M. Evolutionary Multi-Agent Systems: From Inspirations to Applications / A. Byrski, M. Kisiel-Dorohinicki. – Cham : Springer International Publishing, 2017. – 210 p. – DOI: 10.1007/978-3-319-51388-1
6. Radley N. Multi-Agent Systems – Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications / N. Radley. – Wilmington : Scitus Academics Llc, 2017. – 276 p.
7. Agent for Games and Simulations: Trends in Techniques, Concepts and Design / [F. Dignum, J. Bradshaw, B. G. Silverman, W. Doesburg]. – Cham : Springer International Publishing, 2009. – 237 p. – DOI : 10.1007/978-3-642-11198-3
8. Gaming Method of Ontology Clusterization / [P. Kravets, Y. Burov, V. Lytvyn, V. Vysotska] // *Webology*. – 2019. – Vol. 16, № 1. – P. 55–76.
9. Stuart D. Practical Ontologies for Information Professionals / D. Stuart. – London : Facet Publishing, 2016. – 224 p.
10. Aleman Y. A proposal for domain ontological learning / Y. Aleman, M. J. Somodevilla // *Research in Computing Science*. – 2017. – Vol. 133. – P. 63–70.
11. Keet C. M. An introduction to Ontology Engineering [Electronic resource] / C. M. Keet. – Access mode: <http://hdl.handle.net/11427/28312>.
12. Thomas C. Ontology in Information Science / C. Thomas. – London : IntechOpen, 2018. – 132 p. – DOI: 10.5772/65599.
13. Sun Z. Cooperative Coordination and Formation Control for Multi-agent Systems / Z. Sun. – Cham : Springer International Publishing, 2018. – 179 p. – DOI : 10.1007/978-3-319-74265-6
14. Iterative Learning Control for Multi-agent Systems Coordination / [S. Yang, J.-X. Xu, X. Li, D. Shen]. – New York : Wiley-IEEE Press, 2017. – 272 p.
15. Scerri P. Coordination of Large-Scale Multiagent Systems / P. Scerri, R. Vincent, R. T. Mailler. – Cham : Springer International Publishing, 2010. – 352 p. – DOI : 10.1007/0-387-27972-5
16. Perminova-Harikovski O. Defining Uncertainty in Projects – A New Perspective / O. Perminova-Harikovski, M. Gustafsson, K. Wikstrom // *International Journal of Project Management*. – 2008. – Vol. 26, № 1. – P. 73–79. – DOI: 10.1016/j.ijproman.2007.08.005
17. Zheng E.Z.H. Managing Uncertainty in Projects: A Review, Trends and Gaps. *Revista de Gestao e Projetos GeP* / E. Z. H. Zheng, M. M. Carvalho // *Journal of Business and Projects*. – 2016. – Vol. 7, № 2. – P. 95–99.
18. Cleden D. Managing Project Uncertainty (Advances in Project Management) / D. Cleden. – New York : Routledge, 2017. – 138 p.
19. Macedo K. Uncertainty Management in Software Projects: A Case Study in a Public Company / K. Macedo, M. Marinho, S. Santos // *Journal of Convergence Information Technology*. – 2019. – Vol. 14, № 1. – P. 61–67.
20. Bryl V. ToothAgent: A Multi-agent System for Virtual Communities Support / V. Bryl, P. Giorgiani, S. Fante // *Lecture Notes in Computer Science*. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – Vol. 4898. – P. 212–230. –DOI: 10.1007/978-3-540-77990-2_13
21. Smart Places: Multi-Agent based Smart Mobile Virtual Community Management System / [M. Fahad, O. Boissier, P. Maret et al] // *Applied Intelligence*. – Springer Verlag, Germany, 2014. – Vol. 41, № 4. – P. 1024–1042. – DOI: 10.1007/s10489-014-0569-2.hal-01015456
22. Lee Y. Multi-agent Systems Support for Community-Based Learning / Y. Lee, Q. Chong // *Interacting with Computers*. – 2003. – Vol. 15, № 1. – P. 33–55. – DOI: 10.1016/S0953-5438(02)00057-7
23. Comparing problem solving strategies for NP-hard optimization problems / [M. Hidalgo-Herrero, P. Rabanal, I. Rodriguez, F. Rubio] // *Fundamenta Informaticae*. – 2013. – Vol. 124, № 1–2. – P. 1–25.
24. Abdulrahman S. M. Using Swarm Intelligence for Solving NP-hard Problems / S. M. Abdulrahman // *Academic Journal of Nawroz University*. – 2017. – Vol. 6, № 3. – P. 46–50.

25. Huang X. A polynomial-time algorithm for solving NP-hard problems in practice / X. Huang // ACM SIGACT News. – 2003. – Vol. 34, № 1. – P. 101–108.
26. Reus B. How to Solve NP-Complete Problems / B. Reus // Limits of Computation. Undergraduate Topics in Computer Science. – Springer, Cham, 2016. – P. 275–297. – DOI: 10.1007/978-3-319-27889-6_21.
27. Panchal G. Solving NP hard Problems using Genetic Algorithm / G. Panchal, D. Panchal // International Journal of Computer Science and Information Technology. – 2015. – Vol. 6, № 2. – P. 1824–1827.
28. Learning to solve NP-complete problems : A graph neural network for decision TSP / [M. Prates, P.H.C. Avelar, H. Lemos et al] // Artificial Intelligence : The Thirty-Third AAAI Conference, Honolulu, Hawaii, USA, January 27 – February 1, 2019 : proceedings. – Honolulu : Hilton Hawaiian Village, 2019. – Vol. 33, № 1. – P. 4731–4738. DOI : 10.1609/aaai.v33i01.33014731
29. Chen B.-S. Stochastic Game Strategies and their Applications / B.-S. Chen. – Boca Raton : CRC Press, 2019. – 610 p.
30. Ummels M. Stochastic Multiplayer Games: Theory and Algorithms / M. Ummels. – Amsterdam : Amsterdam University Press, 2014. – 174 p.
31. Ungureanu V. Pareto-Nash-Stackelberg Game and Control Theory: Intelligent Paradigms and Applications / V. Ungureanu. – Cham : Springer International Publishing, 2018. – 343 p. – DOI : 10.1007/978-3-319-75151-1
32. Neogy S. K. Mathematical Programming and Game Theory / S. K. Neogy, R. B. Bapat, D. Dubey. – Cham : Springer International Publishing, 2018. – 226 p. – DOI : 10.1007/978-981-13-3059-9
33. Назин А. В. Адаптивный выбор вариантов: Рекуррентные алгоритмы / А. В. Назин, А. С. Позняк. – Москва : Наука, 1986. – 288 с.
34. Kushner H. Stochastic Approximation and Recursive Algorithms and Applications / H. Kushner, G. Yin. – New York : Springer-Verlag, 1997. – 417 p. – DOI : 10.1007/978-1-4899-2696-8
35. Benveniste A. Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations / A. Benveniste, M. Metivier, P. Priouret. – Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990. – 365 p. – DOI : 10.1007/978-3-642-75894-2

Стаття надійшла до редакції 07.12.2020.
Після доробки 03.01.2021.

УДК 004.852; 004.89; 004.93'14

ИГРОВАЯ МОДЕЛЬ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДДЕРЖКИ ПРОЕКТОВ

Кравець П. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Литвин В. В. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Висоцька В. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В современном информационном обществе с развитыми средствами телекоммуникации с помощью мобильных устройств и компьютерных сетей актуальным является формирование различных виртуальных организаций и сообществ. Такие виртуальные объединения людей по профессиональным или другими интересами предназначены для оперативного решения различных задач: для выполнения проектных заданий, создания стартапов с целью привлечения инвесторов, организации сетевого маркетинга, организации дистанционного обучения, решения сложных вопросов в науке, экономике и государственном управлении, построения различных Интернет-сервисов, обсуждения политических и социальных процессов и тому подобное.

Целью исследования является разработка адаптивного марковского рекуррентного метода на основе стохастической аппроксимации модифицированного условия дополняющей нежесткости, справедливого в точках равновесия по Нэшу для решения задачи игрового покрытия проектов.

Метод. В этой работе разработана многоагентная игровая модель для формирования виртуальных команд исполнителей проектов на основе библиотек предметных онтологий. Необходимые для выполнения проектов компетенции и способности агентов задаются наборами онтологий. Интеллектуальные агенты случайно, одновременно и независимо выбирают один из проектов в дискретные моменты времени. Агенты, которые выбрали один и тот же проект, определяют текущий состав команды его исполнителей. Для команд агентов исчисляется текущий штраф за недостаточное покрытие компетенций объединенными способностями агентов. Этот штраф используется для адаптивного пересчета смешанных стратегий игроков. Увеличиваются вероятности выбора тех команд, текущий состав которых привел к уменьшению штрафа за непокрытие онтологий. В ходе повторяющейся стохастической игры агенты сформируют векторы смешанных стратегий, которые обеспечат минимизацию усредненных штрафов за непокрытия проектов.

Результаты. Для решения задачи игрового покрытия проектов разработан адаптивный марковский рекуррентный метод на основе стохастической аппроксимации модифицированного условия дополняющей нежесткости, справедливого в точках равновесия по Нэшу.

Выводы. Компьютерное моделирование подтвердило возможность применения модели стохастической игры для формирования команд исполнителей проектов с необходимой онтологической поддержкой в условиях неопределенности. Сходимость игрового метода обеспечивается соблюдением фундаментальных условий и ограничений стохастической оптимизации. Достоверность экспериментальных исследований подтверждается повторяемостью полученных результатов для различных последовательностей случайных величин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: многоагентная система, онтология, проект, стохастическая игра, адаптивный игровой метод.

GAME MODEL OF ONTOLOGICAL PROJECT SUPPORT

Kravets P. – PhD, Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Lytvyn V. – Doctor of Sciences, Professor, Head of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Vysotska V. – PhD, Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. In today's information society with advanced telecommunications through mobile devices and computer networks, it is important to form a variety of virtual organizations and communities. Such virtual associations of people by professional or other interests are designed to quickly solve various tasks: to perform project tasks, create startups to attract investors, network marketing, distance learning, solving complex problems in science, economics and public administration, construction of various Internet services, discussion of political and social processes, etc.

Objective of the study is to develop an adaptive Markov recurrent method based on the stochastic approximation of the modified condition of complementary non-rigidity, valid at Nash equilibrium points for solving the problem of game coverage of projects.

Method. In this work the multiagent game model for formation of virtual teams of executors of projects on the basis of libraries of subject ontologies is developed. The competencies and abilities of agents required to carry out projects are specified by sets of ontologies. Intelligent agents randomly, simultaneously and independently choose one of the projects at discrete times. Agents who have chosen the same project determine the current composition of the team of its executors. For agents' teams, a current penalty is calculated for insufficient coverage of competencies by the combined capabilities of agents. This penalty is used to adaptively recalculate mixed player strategies. The probabilities of selecting those teams whose current composition has led to a reduction in the fine for non-coverage of ontologies are increasing. During the repetitive stochastic game, agents will form vectors of mixed strategies that will minimize average penalties for non-coverage of projects.

Results. For solve the problem of game coverage of projects, an adaptive Markov recurrent method based on the stochastic approximation of the modified condition of complementary non-rigidity, valid at Nash equilibrium points, was developed.

Conclusions. Computer simulation confirmed the possibility of using the stochastic game model to form teams of project executors with the necessary ontological support in conditions of uncertainty. The convergence of the game method is ensured by compliance with the fundamental conditions and limitations of stochastic optimization. The reliability of experimental studies is confirmed by the repeatability of the results obtained for different sequences of random variables.

KEYWORDS: multi-agent system, ontology, project, stochastic game, adaptive game method.

REFERENCES

1. Virtual Communities: Concepts, Methodologies, Tools and Applications, *Information Resources Management Association (USA)*, Vol. 1–4. Hershey, IGI Global, 2011, 2930 p. DOI: 10.4018/978-1-60960-100-3.
2. Hutchings T. Real Virtual Community, *Word & World*, 2015, Vol. 35, No. 2, pp. 151–161.
3. Roy A. A Typology of Virtual Communities on the Internet: Contingency Marketing Approaches, *Marketing & Tourism: First International Academic Research Conference, Dubai-UAE, 22–24 May 2015: proceedings*. Dubai, MTCI, 2015, pp. 1–11.
4. Weiss G. Multiagent Systems. Cambridge, The MIT Press, 2016, 920 p.
5. Byrski A., Kisiel-Dorohinicki M. Evolutionary Multi-Agent Systems: From Inspirations to Applications. Cham, Springer International Publishing, 2017, 210 p. DOI: 10.1007/978-3-319-51388-1
6. Radley N. Multi-Agent Systems – Modeling, Control, Programming, Simulations and Applications. Wilmington, Scitus Academics LLC, 2017. – 276 p.
7. Dignum F., Bradshaw J., Silverman B. G., Doesburg W. Agent for Games and Simulations: Trends in Techniques, Concepts and Design. Cham, Springer International Publishing, 2009, 237 p. DOI: 10.1007/978-3-642-11198-3
8. Kravets P., Burov Y., Lytvyn V., Vysotska V. Gaming Method of Ontology Clusterization, *Webology*, 2019, Vol. 16, № 1, pp. 55–76.
9. Stuart D. Practical Ontologies for Information Professionals. London, Facet Publishing, 2016, 224 p.
10. Aleman Y., Somodevilla M. J. A proposal for domain ontological learning, *Research in Computing Science*, 2017, Vol. 133, pp. 63–70.
11. Keet C. M. An introduction to Ontology Engineering [Electronic resource]. Access mode: <http://hdl.handle.net/11427/28312>.
12. Thomas C. Ontology in Information Science. London, IntechOpen, 2018, 132 p. DOI: 10.5772/65599.
13. Sun Z. Cooperative Coordination and Formation Control for Multi-agent Systems. Cham, Springer International Publishing, 2018, 179 p. DOI: 10.1007/978-3-319-74265-6
14. Yang S., Xu J.-X., Li X., Shen D. Iterative Learning Control for Multi-agent Systems Coordination. New York, Wiley-IEEE Press, 2017, 272 p.
15. Scerri P., Vincent R., Mailler R. T. Coordination of Large-Scale Multiagent Systems. Cham, Springer International Publishing, 2010, 352 p. DOI: 10.1007/0-387-27972-5
16. Perminova-Harikovski O., Gustafsson M., Wikstrom K. Defining Uncertainty in Projects – A New Perspective, *International Journal of Project Management*, 2008, Vol. 26, No. 1, pp. 73–79. DOI: 10.1016/j.ijproman.2007.08.005
17. Zheng E.Z.H. Managing Uncertainty in Projects: A Review, Trends and Gaps. *Revista de Gestao e Projetos GeP / E.Z.H. Zheng, M.M. Carvalho // Journal of Business and Projects*. – 2016. – Vol. 7, № 2. – P. 95-99.
18. Cleden D. Managing Project Uncertainty (Advances in Project Management). New York, Routledge, 2017. – 138 p.
19. Macedo K., M. Marinho, S. Santos Uncertainty Management in Software Projects: A Case Study in a Public

- Company, *Journal of Convergence Information Technology*, 2019, Vol. 14, No. 1, pp. 61-67.
20. Bryl V., Giorgiani P., Fante S. ToothAgent: A Multi-agent System for Virtual Communities Support, *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, Vol. 4898, pp. 212–230. DOI: 10.1007/978-3-540-77990-2_13
21. Fahad M., Boissier O., Maret P., Moalla N., Gravier C. Smart Places: Multi-Agent based Smart Mobile Virtual Community Management System, *Applied Intelligence*. Springer Verlag, Germany, 2014, Vol. 41, No. 4, pp. 1024-1042. – DOI: 10.1007/s10489-014-0569-2.hal-01015456
22. Lee Y., Chong Q. Multi-agent Systems Support for Community-Based Learning, *Interacting with Computers*, 2003, Vol. 15, No. 1, pp. 33–55. DOI: 10.1016/S0953-5438(02)00057-7
23. Hidalgo-Herrero M., Rabanal P., Rodriguez I., Rubio F. Comparing problem solving strategies for NP-hard optimization problems, *Fundamenta Informaticae*, 2013, Vol. 124, No. 1–2, pp. 1–25.
24. Abdulrahman S. M. Using Swarm Intelligence for Solving NP-hard, *Academic Journal of Nawroz University*, 2017, Vol. 6, No. 3, pp. 46-50.
25. Huang X. A polynomial-time algorithm for solving NP-hard problems in practice, *ACM SIGACT News*, 2003, Vol. 34, No. 1, pp. 101–108.
26. Reus B. How to Solve NP-Complete Problems. Limits of Computation. Undergraduate Topics in Computer Science. Springer, Cham, 2016, pp. 275–297. DOI: 10.1007/978-3-319-27889-6_21.
27. Panchal G. Panchal D. Solving NP hard Problems using Genetic Algorithm, *International Journal of Computer Science and Information Technology*, 2015, Vol. 6, No. 2, pp. 1824–1827.
28. Prates M., Avelar P. H. C., Lemos H., Lamb L. C., Vardi M. Y. Learning to solve NP-complete problems : A graph neural network for decision TSP, *Artificial Intelligence : The Thirty-Third AAAI Conference, Honolulu, Hawaii, USA, January 27 – February 1, 2019 : proceedings*. Honolulu, Hilton Hawaiian Village, 2019, Vol. 33, No. 1, pp. 4731-4738. DOI : 10.1609/aaai.v33i01.33014731
29. Chen B.-S. Stochastic Game Strategies and their Applications. Boca Raton, CRC Press, 2019, 610 p.
30. Ummels M. Stochastic Multiplayer Games: Theory and Algorithms. Amsterdam, Amsterdam University Press, 2014, 174 p.
31. Ungureanu V. Pareto-Nash-Stackelberg Game and Control Theory: Intelligent Paradigms and Applications. Cham, Springer International Publishing, 2018, 343 p. DOI: 10.1007/978-3-319-75151-1
32. Neogy S. K., Bapat R. B., Dubey D. Mathematical Programming and Game Theory. Cham, Springer International Publishing, 2018, 226 p. DOI : 10.1007/978-981-13-3059-9
33. Nazin A. V., Poznyak A. S. Adaptivnyi vybor variantov: Rekurrentnye algoritmy. Moscow, Nauka, 1986, 288 p.
34. Kushner H., Yin G. Stochastic Approximation and Recursive Algorithms and Applications. New York, Springer-Verlag, 1997, 417 p. DOI : 10.1007/978-1-4899-2696-8
35. Benveniste A., Metivier M., Priouret P. Adaptive Algorithms and Stochastic Approximations. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990, 365 p. DOI : 10.1007/978-3-642-75894-2

INFLUENCE OF DIGITAL IMAGES PRELIMINARY NOISING ON STATISTICAL STEGDETECTORS PERFORMANCE

Progonov D. O. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Information Security Systems, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of sensitive information protection during data transmission in communication systems was considered. The case of reliable detection of stego images formed according to advanced embedding methods was investigated. The object of research is digital images steganalysis of adaptive steganographic methods.

Objective. The goal of the work is performance analysis of statistical stegdetectors for adaptive embedding methods in case of preliminary noising of analyzed image with thermal and shot noises.

Method. The image pre-processing (calibration) method was proposed for improving stego-to-cover ratio for state-of-the-art adaptive embedding methods HUGO, MG and MiPOD. The method is aimed at amplifying negligible changes of cover image caused by message hiding with usage of Gaussian and Poisson noises. The former one is related to influence the thermal noise of charge-coupled device (CCD) based image sensor during data acquisition. The latter one is related to shot noise that originates from stochastic process of electron emission by photons hitting of CCD elements. During the research, parameters of thermal noise were estimated with two-dimensional Wiener filter, while sliding window of size 5·5 pixels was used for parameters evaluation for shot noise.

Results. The dependencies of detection error on cover image payload for advance HUGO, MG and MiPOD embedding methods were obtained. The results were presented for the case of image pre-noising with both Gaussian and Poisson noises, and varying of feature pre-processing methods.

Conclusions. The conducted experiments confirmed effectiveness of proposed approach for image calibration with Poisson noise. Obtained results allow us to recommend linearly transformed features to be used for improving stegdetector performance by natural image processing. The prospects for further research may include investigation usage of special noises, such as fractal noises, for improving stego-to-cover ratio for advanced embedding methods.

KEYWORDS: digital image steganalysis, adaptive embedding method, Gaussian noise, Poisson noise.

ABBREVIATIONS

AEM is an adaptive embedding method;
CCD is a charge-coupled device;
CI is a cover image;
DI is a digital image;
EM is an embedding method;
IC is an image calibration;
SD is a stegdetector.

NOMENCLATURE

β_l is the change rate;
 Δ_p is a cover image payload;
 ζ^2 is the deflection coefficient between cover and stego images distributions;
 λ_L is the Lagrange multiplier;
 ξ is a signal whose variance is need to be estimated with a linear model;
 π is a probability distribution function of selection certain stego image from set of all possible stego images;
 $\rho_{ij}(\cdot)$ is a cost function for estimation CI alteration due to individual stego bit hiding into $(i,j)^{\text{th}}$ pixel of CI;
 Y is the set of all possible stego images;
 ω, u, v, w are weights;
 a is the vector of a linear model parameters;
 $C(\cdot)$ is an image calibration operator;
 C is the set of three-elements cliques for four-pixels adjacency directions;
 D is an array of differences between adjacency pixels values;

$D(X, Y)$ is an empirical distortion estimation function;

$E_{\pi}(D)$ is the averaging operator for function $D(X, Y)$ over distribution π ;

F is a feature row vector;

F_{dn} is a denoising filter for image context suppression;

$F_e(\cdot)$ is a feature extraction operator from an image;

G is a mixing matrix;

H is the normalized adjacency matrix that is calculated for each type of cliques C ;

H_4 is the ternary entropy function;

$H(\pi)$ is the entropy function;

\mathfrak{I} represents brightness range for 8-bits grayscale image;

$I_{L \cdot L}$ is an identity matrix with size $L \cdot L$ elements;

k is the number of parameters for the SPAM model;

M is a binary message to be embedded;

M^a, M^b are adjacency matrices for Markov model by scanning grayscale image from left-bottom to right-top and from right-top to left-bottom directions respectively;

M^c, M^d are adjacency matrices for Markov model by scanning grayscale image from left-top to right-bottom and from right-bottom to left-top directions correspondingly;

P_G^{\perp} is the orthogonal projection of residual r_l on subspace spanned by left eigenvectors of matrix G ;

P_e is the detection error;

P_{FA} is the probability of false alarm during detection (assignment cover image as stego one);

P_{MD} is the probability of missed detection (assignment of stego image as cover one);

r_l are residuals r inside $p \times p$ block surrounding the l^{th} pixel of CI;

T is a threshold;

U is an unprocessed (non-calibrated) image;

X is a cover image;

Y is a stego image;

$\Pr(a)$ is the probability of event a ;

$[a]$ is the Iverson bracket that equals to one if Boolean expression a is true, and zero otherwise;

$\|\cdot\|$ is the Euclidean norm for scalars, or Frobenius norm for matrices.

INTRODUCTION

Counteraction to sensitive data leakage is topical task today. This includes data protection during on-device processing as well as transmission in communication systems. More recently, the latter task has been taken special interest due to development of adaptive embedding methods. These methods aimed at sensitive data hiding into transmitted files, such as digital images, by preserving minimal distortion of cover image [1, 2].

Reliable detection of formed stego images requires utilization of a priori information about applied distortion minimization techniques. This information may be limited or even absent for modern AEM that negatively impact on stegdetectors performance.

The object of study is methods for detection of stego images formed according to AEM.

The promising approach to detection of stego images formed according to AEM is increasing stego-to-cover ratio by pre-processing (calibration) of analyzed image. Modern methods for image calibration are aimed at estimation of cover image parameters from the stego one. This requires usage of accurate statistical model of CI that may be inappropriate in case of processing natural images that characterize a high level of parameters variability. Therefore, the development of new IC methods is needed.

The subject of study is methods for increasing stego-to-cover ratio to be used in steganalysis of stego images formed according to advanced AEM.

One of possible solution of mentioned task is amplification of CI negligible changes caused by message hiding [3]. Unlike known calibration methods that require CI model, this approach utilizes only a priori information about message hiding into highly textured and noised areas of cover images. Since messages embedding can be represented as adding anisotropic noise to DI [1], we may apply technique of image preliminary noising (pre-noising) for accentuation these changes.

Effectiveness of this approach was shown in paper [4] for state-of-the-art S-UNIWARD adaptive embedding method. Nevertheless, the approach performance is still

unknown for advanced adaptive model-based EM, such as MG and MiPOD.

The purpose of the work is to analyze performance of statistical stegdetectors for advanced AEM in case of preliminary noising of analyzed image.

1 PROBLEM STATEMENT

For a given set of pairs $(X_i, Y_i) \in \mathfrak{S}^{M \times N}$, $i \in [1; Q]$ the task of stegdetector training can be presented as the optimization problem [1, 2]:

$$P_e = \min_{P_{FA}} \frac{1}{2} (P_{FA} + P_{MD}(P_{FA})). \quad (1)$$

Solving of (1) is done under constrain of applying to images a predefined IC transformation $C(\cdot): \mathfrak{S}^{M \times N} \rightarrow \mathfrak{S}^{M \times N}$.

Selection of calibration transformation $C(\cdot)$ should be done according to known a priori information about used embedding method. Nevertheless, this information is limited or even absent in most cases. Therefore, the choice of appropriate transformation $C(\cdot)$ that allows solving problem (1) in case of limited a priori information about steganographic method remains an open question. The paper focuses on the case when $C(\cdot)$ relates to image pre-noising with thermal (Gaussian) or shot (Poisson) noises that model physical processes during image capturing.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Modern steganographic methods for DI are aimed at message hiding in CI by preserving minimal alterations of its perception quality [1, 2]. This is achieved by negligible changes of cover elements, namely pixels brightness, in textured areas that are hard to model. Proposed statistical models of CI allow reliably detection these changes in case of analysis either a distortion introduced by known embedding methods or DI with low noise level.

For overcoming mentioned issue, image pre-processing approach has been proposed. The IC is aimed at increasing stego-to-cover ratio by utilization of information about features of either CI or used embedding method. The former case relates to original idea of calibration – to obtain a good estimation of cover image parameters from a stego one [3]. The latter case is based on analysis of a priori information about specific distortions introduced to CI during message embedding.

The seminal work of cover image estimation [5] proposed to use message re-embedding into JPEG-images for quantitatively estimation of CI payload. Despite accurate estimation, the work requires a priori knowledge of used EM that may be inappropriate in real cases. Fridrich et al. [3] proposed to provide multi-stage processing of JPEG images to estimate CI parameters – firstly, JPEG decomposition, then cropping image by 4 first rows and columns and, finally, JPEG compression with same JPEG quality factor. This approach showed outstanding results for widespread embedding methods, such as StegHide,

OutGuess etc. Nevertheless, the approach is suitable only for compressed JPEG images.

The effective IC method was proposed for SRM model of cover image [6]. The method is based on image pre-processing with set of high-pass filters for suppression of image context. Effectiveness of proposed model was proved for wide range of modern EM, such as HUGO [7], WOW [8] etc. This became possible due to painstaking selection of enormous set of two-dimensional high-pass filters. Modification of SRM model, namely maxSRMd2 [9], pursued the same idea by adaptation of used filters to reliably detection of state-of-the-art AEM.

The PSRM model [10] and SR-Net [11] are further evolution of SRM model. The former model is based on post-processing of residuals obtained after image filtering – theirs projection on vectors generated from multivariate Gaussian distribution. The latter model is convolutional artificial neural network that allows learning appropriate filters (convolutional kernels) during training on image dataset. It should be noted that these modifications of SRM model are either compute-intensive or requires usage of a priori information about used EM for laborious selection of appropriate high-pass filters.

For overcoming mentioned drawbacks of CI restoration scheme, methods for feature estimation from stego images were proposed [3, 4]. One of these methods is message re-embedding into stego image for amplifying negligible changes of CI caused by data hiding. This makes these changes “accessible” for further analysis with statistical models. The effectiveness of this approach was shown in papers [4, 12] for state-of-the-art adaptive embedding methods, such as HUGO and S-UNIWARD.

In spite of considerable improving detection accuracy for medium (10–25%) and high (more than 25%) payload of CI [4], message re-embedding approach still needs a priori information about EM for maximization alterations caused by message hiding. Since re-embedding procedure can be represented as introducing additional noise to DI [4], we may apply other types of noises for amplifying negligible changes of CI caused by data hiding.

The well-known types of noises, which are specific for image capturing pipeline [13], are thermal and shot noises. They related to influence of discrete nature of photons (shot noise) and ambient temperature (thermal noise) on parameters of CCD used in cameras/scanners. These noises can be accurately modelled with Gaussian and Poisson distribution [13]. Therefore, the paper is aimed at performance analysis of statistical stegdetectors in case of preliminary noising of stego images formed according to AEM with Gaussian and Poisson noises.

3 MATERIALS AND METHODS

The paper focuses on state-of-the art AEM. The feature of these methods is minimization of total cost by message $M \in \{0,1\}^K$ hiding into a cover image X [14]:

$$D(X, Y) = \sum_{i,j} \rho_{i,j}(X, Y) \xrightarrow{|M|=const} \min. \quad (2)$$

Ideally, cost function $\rho(\cdot)$ in (2) can estimate both CI alteration due to changing of individual pixel, and non-linear interaction between these changes [14]. The former estimation can be done with widespread statistical models of CI [1]. The latter estimation requires compute-intensive analysis of pixels changes combinations that becomes intractable even for short messages M (about 100 bits) [14]. Therefore, the simplified function $\rho(\cdot)$ that estimate only CI distortions caused by individual stego bit hiding is used in most real cases.

Selection of pixels to be used during message embedding (2) is performed by heuristic rules that assess noise level in a local neighborhood of $(i,j)^{\text{th}}$ pixel [14]. This allows achieving state-of-the-art empirical security of formed stego images while preserving computational effective optimization methods for cost estimation.

The examples of state-of-the-art AEM are HUGO [7], MG [15] and MiPOD [16] methods. Let us consider in more detail these methods. The HUGO method is based on minimization of CI distortion under constrain of message length $|M| = H(\pi)$ [7]:

$$\begin{aligned} \min_{\pi} E_{\pi}(D) &= \sum_{Y \in \mathcal{Y}} \pi(Y) \cdot D(X, Y), \\ \text{wrt. } |M| &= -\sum_{Y \in \mathcal{Y}} \pi(Y) \cdot \log(\pi(Y)). \end{aligned} \quad (3)$$

Filler et al. [7] proposed to numerical solving of eq. (3) by using adjacency matrix $C_{kl}(X)$ for estimation of CI distortions during message hiding:

$$\begin{aligned} D(X, Y) &= \sum_{c \in \mathcal{C}} \sum_{(k,l) \in \mathfrak{S}} \omega_{k,l} H_{(k,l)}^c(Y), \\ \forall (k,l) \in \mathfrak{S} : \omega_{k,l} &> 0. \end{aligned} \quad (4)$$

For instance, matrix H in the case of row-wise image processing and left-to-right pixels scanning can be calculated as [7]:

$$\begin{aligned} H_{(k,l)}^{\rightarrow}(X, Y) &= (N \cdot (M - 2))^{-1} \cdot \\ &\cdot \sum_{i,j} \left[\left[\left(D_{i,j}^{\rightarrow}, D_{i,j+1}^{\rightarrow} \right) (Y) = (k,l) \right]_I - \right. \\ &\quad \left. - \left[\left(D_{i,j}^{\rightarrow}, D_{i,j+1}^{\rightarrow} \right) (X) = (k,l) \right]_I \right], \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \left(D_{i,j}^{\rightarrow}, D_{i,j+1}^{\rightarrow} \right) (X) &= (k,l) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \left(D_{i,j}^{\rightarrow}(X) = k \right) \wedge \left(D_{i,j+1}^{\rightarrow}(X) = l \right) \end{aligned} \quad (6)$$

Matrix H for other types of cliques $\mathcal{C} = \mathcal{C}^{\rightarrow} \cup \cup \mathcal{C}^{\leftarrow} \cup \mathcal{C}^{\uparrow} \cup \mathcal{C}^{\downarrow}$ can be calculated in a way similar to eq. (5)–(6) [7].

In contrast to HUGO method, MG and MiPOD embedding methods are aimed at minimization both CI distortion and statistical detectability of formed stego image [15, 16]. It is achieved by usage of locally-estimated multivariate Gaussian model of CI noises. The model allows deriving the closed-form expression of SD performance

as well as capturing the non-stationary character of natural images [16].

The CI processing pipeline is similar for both MG [15] and MiPOD [16] methods. Firstly, image context is suppressed using denoising filter F_{dn} :

$$r = X - F_{dn}(X).$$

Secondly, the variance σ_l^2 of obtained residuals r is measured with linear model:

$$r_l = Ga_l + \xi, l \in [1; M \cdot N] \quad (7)$$

Sedighi et al. [16] proposed to use Maximum Likelihood estimation of model parameters:

$$\sigma_l^2 = \left\| P_G^\perp r_l \right\|^2 / (p^2 - q), q \in N.$$

Here, P_G^\perp represents the orthogonal projection of residual r_l on $(p^2 - q)$ dimensional sub-space spanned by left eigenvectors of matrix G . Residuals r_l are evaluated within $p \cdot p$ block surrounding the l^{th} pixel of CI.

The simplified estimation of variance σ_l^2 is used for MG method [15]:

$$\sigma_l^2 = \left\| r_l - G(G^T G)^{-1} G^T r_l \right\|^2 / (p^2 - q), q \in N.$$

Thirdly, embedding changes β_l , $l \in [1; M \cdot N]$ that minimizes deflection coefficient ζ^2 is estimated:

$$\zeta^2(\beta_l) = 2 \sum_{l=1}^{M \cdot N} \beta_l^2 \sigma_l^{-4} \xrightarrow{\sum_{l=1}^{M \cdot N} H_4(\beta_l) = \text{const}} \min, \quad (8)$$

$$H_4(z) = -2z \log(z) - (1-2z) \log(1-2z).$$

The deflection coefficient ζ^2 (7) is used as a measure of divergence between cover and stego images distributions [15, 16].

The optimization problem (8) can be solved using Lagrange multiplier method [16]. Then, change rate β_l and Lagrange multiplier λ_L can be determined by numerical solving of next equations:

$$\beta_l^2 \sigma_l^{-4} = \frac{1}{2\lambda_L} \ln \left(\frac{1-2\beta_l}{\beta_l} \right), l \in [1; M \cdot N]$$

Then, estimated β_l is converted to corresponding cost ρ_l of stego bit hiding in l^{th} pixel of CI:

$$\rho_l = -\ln(\beta_l - 2) \quad (9)$$

Finally, a message M is embedded into CI using syndrome-trellis codes with pixel costs determined according to eq. (9).

The locally-estimated multivariate Gaussian model (7) allows accurately measuring local distortions of CI caused by message hiding [16]. This makes possible achieving state-of-the-art empirical security of formed stego images without taking compute-intensive statistical models.

Wide range of DI statistical models was proposed for revealing stego images formed according to AEM, such as SRM [6], PSRM [10]. Feature of these models is image pre-processing stage for increasing stego-to-cover ratio. In most cases, this stage includes image high-pass filtering with enormous set of two-dimensional filters for image context suppression [6]. This approach shown outstanding result for detection of stego images formed according to AEM. Nevertheless, it became possible due to meticulous selection of filters that allows revealing specific alterations of CI for each embedding method. The selection requires a priori information about peculiarity of EM that may be unavailable in real cases. Therefore, the topical task is development of new IC techniques that do not depend on a priori information of embedding process.

For solving mentioned task we proposed to increase stego-to-cover ratio by amplification of negligible changes of CI. It can be achieved by image noising since message hiding is performed with usage of noise components. The paper focuses on the case of DI noising with thermal and shot noises that accompanied image capturing process. These noises can be accurately modeled with Gaussian and Poisson distributions. Therefore, we may substitute pre-processing stage for widespread DI statistical models with noising operation.

Unfortunately, features obtained for modern statistical models of DI are closely related to image high-pass filtering [6]. Therefore, we took SPAM model [17] that allows estimation correlation features of calibrated DI without any additional processing. Let us describe this model in details.

The calculation of SPAM-features starts by computation the difference array D by processing an image in row-wise and column-wise orders. For example, the array D for the case of row-wise processing and left-to-right pixels scanning of grayscale image U with size $M \cdot N$ pixels can be calculated as [17]:

$$D_{i,j}^{\rightarrow} = U_{i,j} - U_{i,j+1},$$

$$U \in \mathfrak{S}^{M \cdot N}, i \in [1; M], j \in [1; N-1]$$

The first-order SPAM features F_1 are used for modeling array D with first-order Markov process [17]. For the considered example, it leads to:

$$M_{u,v}^{\rightarrow} = \Pr(D_{i,j+1}^{\rightarrow} = u \mid D_{i,j}^{\rightarrow} = v) \quad (10)$$

$$u, v \in [-T; T], T \in N.$$

If probability $\Pr(D_{i,j}^{\rightarrow} = v)$ is equal to zero, then $M_{u,v}^{\rightarrow} = 0$ as well.

The second-order SPAM features F_2 are taken for modeling difference array D with second-order Markov process [17]. Similarly to eq. (10), we obtain:

$$M_{u,v,w}^{\rightarrow} = \Pr\left(D_{i,j+2}^{\rightarrow} = u \mid D_{i,j+1}^{\rightarrow} = v, D_{i,j}^{\rightarrow} = w\right), \quad (11)$$

$$u, v, w \in [-T; T], T \in \mathbb{N}.$$

Similarly to F_1 features, $M_{u,v,w}^{\rightarrow}$ is equal to zero if $\Pr\left(D_{i,j+1}^{\rightarrow} = v, D_{i,j}^{\rightarrow} = w\right) = 0$.

The features F_1 and F_2 for other scanning directions, namely $c \in \{\rightarrow, \leftarrow, \uparrow, \downarrow\}$, can be estimated in the same way to eq. (10)–(11).

For decreasing dimensionality of SPAM-features, the assumption that statistics in natural images are symmetric with respect to mirroring and flipping [17] is used. Thus, we can separately averaging matrices for horizontal, vertical and diagonal directions to form the final features:

$$F_{1\dots k} = \left(M^{\rightarrow} + M^{\leftarrow} + M^{\uparrow} + M^{\downarrow}\right) / 4,$$

$$F_{(k+1)\dots 2k} = \left(M^a + M^b + M^c + M^d\right) / 4.$$

Number of parameters for the first-order SPAM model is $k = (2T + 1)^2$, while for the second-order one – $k = (2T + 1)^3$.

Practical application of SPAM-features requires their pre-processing before using in a classifier. The modern methods of feature pre-processing for DI steganalysis can be divided into next groups [3, 12]:

1. Non-calibrated features – corresponds to the case of feature extraction from unprocessed image:

$$F_{nc} = F_e(U). \quad (12)$$

2. Features of calibrated image – corresponds to features obtained after image noising:

$$F_{noise} = F_e(C(U)). \quad (13)$$

3. Linearly transformed features of calibrated image – correspond to the difference between features of calibrated and unprocessed images:

$$F_{DF} = F_{noise} - F_{nc}. \quad (14)$$

4. Cartesian calibrated features – corresponds to the case of merging features of unprocessed and calibrated images:

$$F_{CC} = [F_{nc}; F_{noise}] \quad (15)$$

Today, non-calibrated features (12) are rarely used due to their negligible differences for cover and stego images [1]. On the other hand, Cartesian calibrated features (15) are widely used for improving SD performance since they preserve features for both initial and calibrated images [3]. Linearly transformed features (14) do not get much attention today [12]. Therefore, performance analysis of stegdetector by usage of these features takes special interest.

4 EXPERIMENTS

Performance analysis of statistical SD by image noising was performed on ALASKA dataset [18]. The sub-set of 10,000 grayscale images with size 512·512 pixels was

pseudo randomly chosen from the dataset. The case of message embedding into CI with HUGO, MG and MiPOD methods was considered. The CI payload Δ_p was changed in range – 3%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%.

The SD includes ensemble classifier with Fisher Linear Discriminant base learner [19] trained with second-order SPAM model [17] with threshold parameter $T=3$, leading to 686 features.

The stegdetector was tested according to cross-validation procedure by minimization of detection error P_e (1) [19]. The dataset was divided 10 times into training (50%) and testing (50%) sub-sets during cross-validation for estimation averaged values of P_e .

Image noising was performed with usage of Gaussian and Poisson noises. The former noise is related to thermal noise that influence of CCD based image sensor during data acquisition. In most cases, this noise is well modelled with zero mean Gaussian process. The latter noise is related to shot noise that originates from stochastic process of electron emission by photons hitting of CCD elements.

During the analysis, variance of thermal noises was estimated with two-dimensional Wiener filter [13, 20]. The window size w_s was varied in range – 3·3, 5·5, 7·7, 9·9, and 11·11 pixels. The estimated variance was used for generation of corresponding zero-mean Gaussian noise. The mean λ for Poisson distribution was estimated with sliding window of size 5·5 pixels.

5 RESULTS

After performance analysis of statistical SD by image noising with Gaussian and Poisson noises the dependencies of detection error for AEM and features (13)–(15) were plotted. Fig. 1–5 graphically illustrates the averaged detection error as a function of CI payload and size of sliding windows for F_{noise} (Fig. 1–2), F_{DF} (Fig. 3) and F_{CC} (Fig. 4) features for the case of image Gaussian noising.

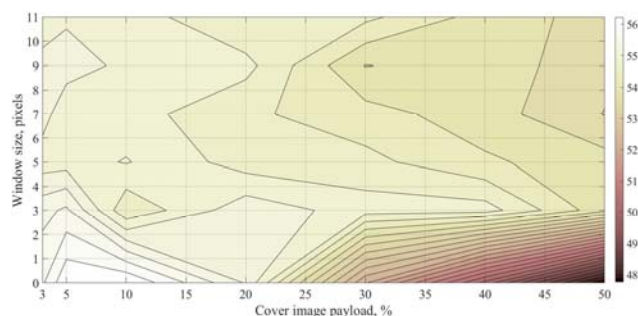


Figure 1 – Detection error P_e as a function of the cover image payload and size w_s of sliding windows for F_{noise} features and Gaussian noising for HUGO method. The P_e values for F_{mn} features are represented by $w_s = 0$ (pixels)

It can be seen from the Fig. 1–2 that images noising with Gaussian noise leads to significant increasing of P_e (about 5%) for medium ($\Delta_p \in [10; 25]$) and high ($\Delta_p > 25$) payloads of CI even for small sliding window ($w_s = 3$).

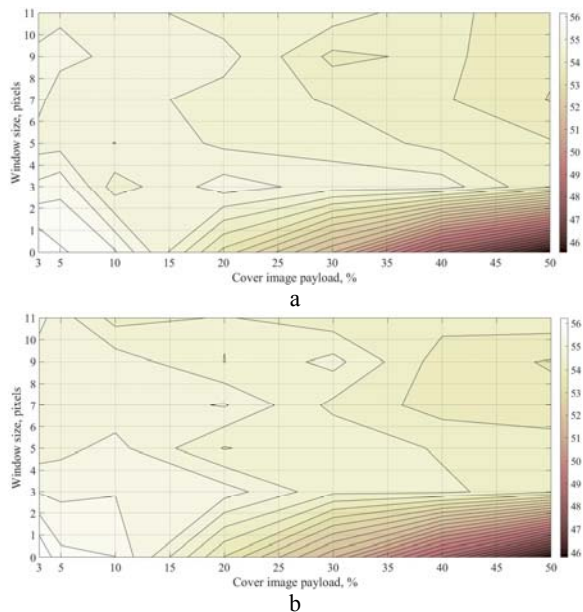


Figure 2 – Detection error P_e as a function of the cover image payload and size w_s of sliding windows for F_{noise} features and Gaussian noising: a – MG method; b – MiPOD method. The P_e values for F_{ni} features are represented by $w_s = 0$ (pixels)

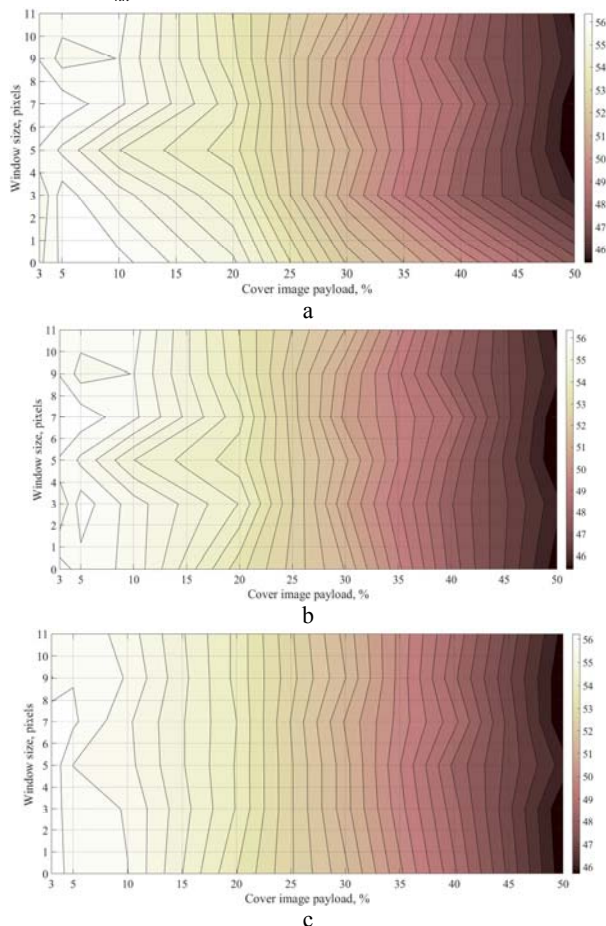


Figure 3 – Detection error P_e as a function of the cover image payload and size w_s of sliding windows for F_{DF} features and Gaussian noising: a – HUGO method; b – MG method; c – MiPOD method. The P_e values for F_{nc} features are represented by $w_s = 0$ (pixels)

Usage of linearly transformed features F_{DF} (Fig. 3) leads to negligible decreasing of detection error for HUGO embedding method (about 2–3%, Fig. 3) for medium and high values of Δ_p while preserving similar P_e values for MG (Fig. 3b) and MiPOD (Fig. 3c) methods. On the other hand, applying of Cartesian calibrated features allows increasing detection error values (about 1–2%) for all considered methods.

Applying of Cartesian calibrated features F_{CC} (Fig. 4) allows achieving P_e similar to transformed features F_{DF} (Fig. 3). Therefore, usage of these features is impractical since significant decreasing of P_e was not achieved.

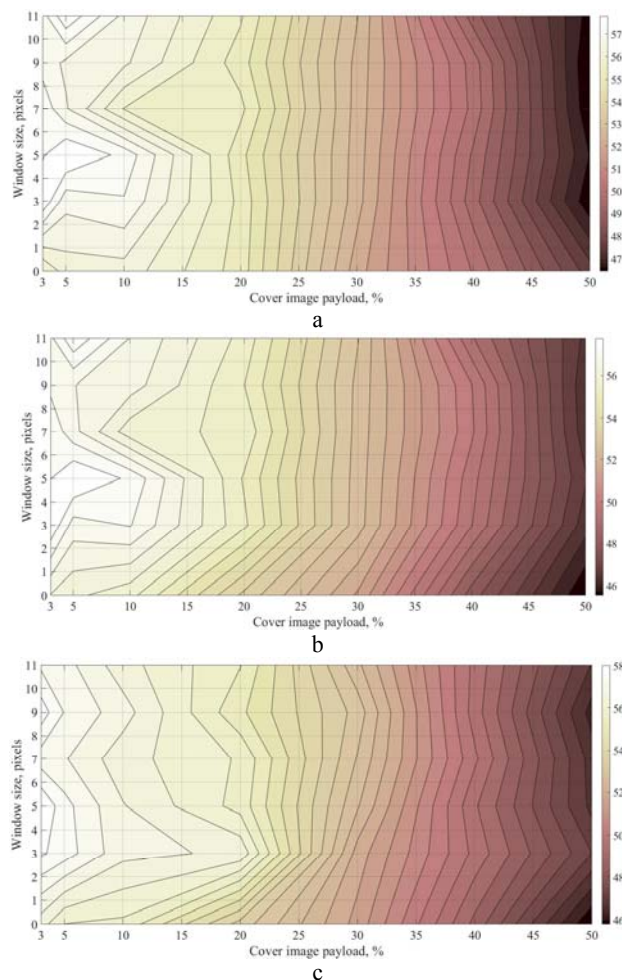


Figure 4 – Detection error P_e as a function of the cover image payload and size w_s of sliding windows for F_{CC} features and Gaussian noising: a – HUGO method; b – MG method; c – MiPOD method. The P_e values for F_{nc} features are represented by $w_s = 0$ (pixels)

Detection error P_e as a function of CI payload by Poisson noising is represented at Fig. 5–6.

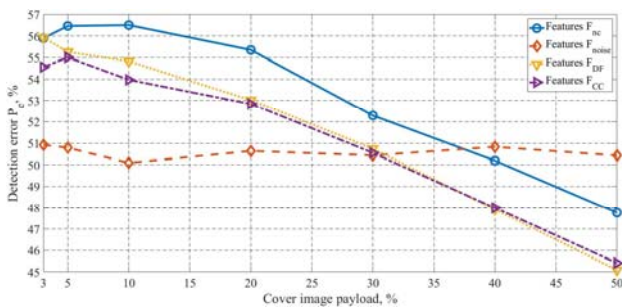
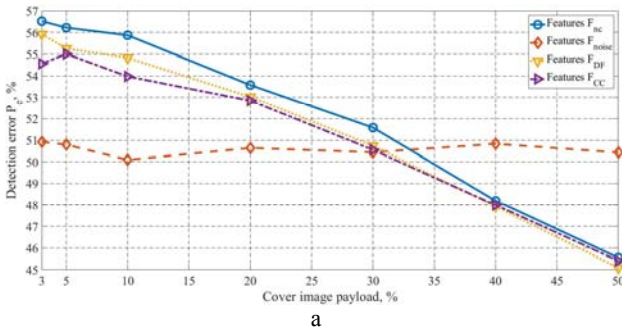
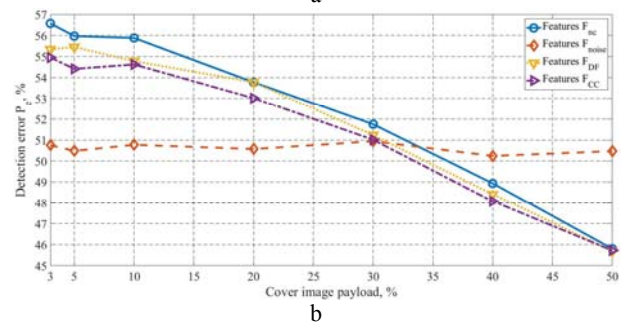


Figure 5 – Detection error P_e as a function of the cover image payload by Poisson noising for HUGO method



a



b

Figure 6 – Detection error P_e as a function of the cover image payload by Poisson noising: a – MG method; b – MiPOD method

It can be seen from the Fig. 5–6 that proposed approach allows decreasing detection error up to 2%–3% for all considered AEM. The biggest impact on P_e values was obtained for HUGO method (Fig. 5) while reducing of P_e values for MG (Fig. 6a) and MiPOD (Fig. 6b) methods is negligible (up to 1%–1.5%). Usage of features for noised images F_{noise} leads to detection accuracy closed to random guessing.

6 DISCUSSION

Message embedding into CI can be represented as adding noises into high-textures areas of images [1, 2]. Amplification of these changes can be achieved by additional noising of analyzed image, for example with noises related to image capturing process [4]. Obtained results for Gaussian noise (Fig. 1–4) showed that this approach is ineffective irrespective of used features (13)–(15). Applying of F_{noise} features leads to catastrophic decrease of detection accuracy in whole range of CI payload (Fig. 1–2). This can be explained by substantial excess of introduced noise’s energy in comparison to changes caused by mes-

sage hiding. Therefore, added Gaussian noise totally eliminates CI influence caused by data embedding for all considered steganography methods.

Applying of linearly transformed features F_{DF} (Fig. 3) allows improve detection accuracy a bit for HUGO embedding method (Fig. 1) – up to 2%–3% for medium and high payload of CI (more than 25%). Changes of detection error P_e are negligible and close to calculation errors for model-based MG (Fig. 2a) and MiPOD (Fig. 2b) methods. In this case, obtained amplification of CI alterations is insufficient for improving SD performance.

A similar situation exists for Cartesian calibrated features (Fig. 4) – image pre-noising leads to decreasing stegdetector accuracy a bit (about 1.5%–2%) for considered EM. Therefore, usage of these features is impractical – stored information about initial and noised images do not allow distinguishing stego images from cover ones.

On the other hand, adding Poisson noises to DI allows reducing detection error P_e even for low payload of CI (less than 10%). Similar to previous case, this is achieved for Cartesian and linearly transformed features (Fig. 5–6). Noteworthy that revealed decreasing of detection error was obtained for all considered EM. This makes image preprocessing with Poisson noise valuable for steganalysis of natural digital images.

Obtained results for Gaussian and Poisson noises showed that introduced distortions to analyzed image effectively masking negligible changes caused by message hiding. This masking effect can be reduced only by usage of special types of features, namely Cartesian and linearly transformed ones. Therefore, further research of special types of images noising for accurate amplification of CI distortions caused by message hiding is needed.

CONCLUSIONS

The topical problem of reliable detection of stego images formed by advanced adaptive embedding methods was considered. The case of stego-to-cover ratio increasing by image pre-noising with Gaussian and Poisson noises was investigated.

The scientific novelty of obtained results is performance analysis of special types of digital image calibration, namely image noising. Proposed approach allows amplifying negligible changes of cover image caused by message hiding even in case of limited a priori information about used embedding method. This gives opportunity to improve statistical stegdetectors performance in case of analysis natural images that characterize high level of parameters variability.

The practical significance of obtained experimental results is dependencies of detection error on cover image payload for state-of-the-art adaptive embedding methods HUGO, MG and MiPOD. These results allow us to recommend Cartesian and linearly transformed features to be used for improving stegdetector performance by natural image pre-noising.

Prospects for further research are to investigate effectiveness of special types of images noising, such as

fractal noises, for amplification of cover image cover image distortions caused message hiding.

REFERENCES

1. Fridrich J. Steganography in Digital Media: Principles, Algorithms, and Applications. Cambridge, Cambridge University Press, 2009, 437 p. ISBN 978-0-521-19019-0. DOI: 10.1017/CBO9781139192903.
2. Konachovych G., Progonov D., Puzyrenko O. Digital steganography processing and analysis of multimedia files. Kyiv, 'Tsentr uchbovoi literatury' publishing, 2018, 558 p. ISBN 978-617-673-741-4.
3. Kodovsky J., Fridrich J. Calibration revisited, *Multimedia and security: 11th ACM workshop, Princeton, 7–8 September, 2009: proceedings*. Princeton: ACM, 2009, pp. 63–74. DOI: 10.1145/1597817.1597830.
4. Progonov D. Analysis of the detection accuracy of stego images generated by adaptive embedding methods, with additional noise of images, *Radioengineering Fields, Signals, Devices and Systems: International scientific and technical conference, Kyiv, 18–24 November, 2019: proceedings*. Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019, pp. 225–227.
5. Yoan M., Bas P., Amaury L. Using multiple re-embeddings for quantitative steganalysis and image reliability estimation: TKK reports in information and computer science. Department of Information and Computer Science, Aalto University, 2010, 19 p. ISBN 978-952-60-3250-4.
6. Fridrich J., Kodovsky J. Rich models for steganalysis of digital images, *IEEE Transactions on Information Forensics Security*, 2012, Vol. 7, pp. 868–882. DOI: 10.1109/TIFS.2012.2190402.
7. Filler T., Fridrich J. Gibbs construction in steganography, *IEEE Transactions on Information Forensics Security*. – 2010, Vol. 5, pp. 705–720. DOI: 10.1109/TIFS.2010.2077629.
8. Holub V., Fridrich J. Designing Steganographic Distortion Using Directional Filters, *Information Forensic and Security: IEEE International Workshop, Tenerife, 2–5 December, 2012: proceedings*. Tenerife, IEEE, 2012. DOI: 10.1109/WIFS.2012.6412655.
9. Denmark T., Sedighi V., Holub V., Cogan R., Fridrich J. Selection-Channel-Aware Rich Model for Steganalysis of Digital Images, *Information Forensic and Security: IEEE International Workshop, Atlanta, 3–5 December, 2014: proceedings*. IEEE, 2014. DOI: 10.1109/WIFS.2014.7084302.
10. Holub V., Fridrich J. Random Projections of Residuals for Digital Image Steganalysis, *IEEE Transactions on Information Forensics Security*, 2013, Vol. 8, pp. 1996–2013. DOI: 10.1109/TIFS.2013.2286682.
11. Boroumand M., Chen M., Fridrich J. Deep residual network for steganalysis of digital images, *IEEE Transactions on Information Forensics Security*, 2018, Vol. 14, pp. 1181–1193. DOI: 10.1109/TIFS.2018.2871749.
12. Progonov D., Lucenko V. Steganalysis of adaptive embedding methods by message re-embedding into stego images, *Information Theories and Applications*, 2020, Vol. 27, Issue 4, pp. 3–24
13. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. London, Pearson Press, 2017, 1192 p. ISBN 978-0133356724.
14. Filler T., Fridrich J. Design of adaptive steganographic schemes for digital images, *Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics: The International Society for Optical Engineering, San Francisco, 24–26 January, 2011: proceedings*. San Francisco, SPIE, 2011. DOI: 10.1117/12.872192.
15. Sedighi V., Fridrich J., Cogan R. Content-adaptive primary steganography using the multivariate generalized gaussian cover model, *Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics: The International Society for Optical Engineering, San Francisco, 24–26 January, 2015: proceedings*. San Francisco, SPIE, 2015. DOI: 10.1117/12.2080272.
16. Sedighi V., Cogan R., Fridrich J. Content adaptive steganography by minimizing statistical detectability, *IEEE Transactions on Information Forensics Security*, 2015, Vol. 11, pp. 221–234. DOI: 10.1109/TIFS.2015.2486744.
17. Pevny T., Bas P., Fridrich J. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix, *IEEE Transactions on Information Forensics Security*, 2010, Volume 5, pp. 215–224. DOI: 10.1109/TIFS.2010.2045842.
18. Cogan R., Gilboulot Q., Bas P. The alaska steganalysis challenge: A first step towards steganalysis, *Information Hiding and Multimedia Security: ACM workshop, Paris, 1–3 July, 2019: proceedings*. Paris, ACM Press, 2019, pp. 125–137. DOI: 10.1145/3335203.3335726.
19. Kodovsky J., Fridrich J. Ensemble classifiers for steganalysis of digital media, *IEEE Transactions on Information Forensics Security*, 2012, Vol. 7, pp. 432–444. DOI: 10.1109/TIFS.2011.2175919.
20. Lim J. Two-Dimensional Signal and Image Processing. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1989, 694 p. ISBN 978-0139353222.

Received 09.12.2020.
Accepted 25.01.2021.

УДК 004.056.54

ВПЛИВ ПОПЕРЕДНЬОГО ЗАШУМЛЕННЯ ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СТАТИСТИЧНИХ СТЕГОДЕТЕКТОРІВ

Прогинов Д. О. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізико-технічних засобів захисту інформації Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто проблему захисту конфіденційної інформації під час передачі даних у системах зв'язку. Досліджено випадок виявлення стеганограм, сформованих згідно новітніх методів приховання повідомлень. Об'єктом дослідження є методи виявлення стеганограм з даними, вбудованими згідно адаптивними стеганографічними методами.

Метод. Запропоновано метод попередньої обробки зображень (калібрування) для підвищення співвідношення стегоконтейнер для сучасних адаптивних методів вбудовування HUGO, MG та MiPOD. Метод спрямований на посилення незначних змін зображення-контейнеру, обумовлених прихованням повідомлень. Підвищення досягається шляхом внесення до

зображення додаткових шумів, що мають гаусовий або пуассоновий розподіл. Перший тип шуму пов'язаний з тепловим шумом, який впливає на матрицю фотоелементів під час формування зображення. Другий тип шуму пов'язаний зі стохастичною природою процесу випромінювання електронів фотонами, що потрапляють на елементи матриці фотоелементів. Дисперсія теплових шумів оцінювалася з використанням двовимірного фільтра Вінера при варіації розміру ковзного вікна. Параметри розподілу Пуассона було визначено з використанням ковзного вікна розміром 5×5 пікселів.

Результати. Побудовано залежності помилки виявлення від ступеня заповнення зображення-контейнеру стегоданими для методів вбудовування HUGO, MG та MiPOD. Результати представлені для випадку внесення до зображень шуму з гаусовим та пуассоновим розподілами, а також застосуванні різних методів попередньої обробки характеристик.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили ефективність запропонованого підходу до калібрування зображень з використанням пуассонівських шумів. Отримані результати дозволяють рекомендувати використання декартових і лінійно трансформованих ознак стегограм для підвищення точності роботи стегодетектору. Перспективи подальших досліджень можуть включати вивчення ефективності застосування спеціальних типів шумів, зокрема фрактальних шумів, з метою підвищення співвідношення стегодані-контейнер для сучасних стегографічних методів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: стегоаналіз цифрових зображень, адаптивні методи приховання, Гаусовий шум, Пуассоновий шум.

УДК 004.056.54

ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЗАШУМЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТАТИСТИЧЕСКИХ СТЕГОДЕТЕКТОРОВ

Прогинов Д. О. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры физико-технических средств защиты информации Национального технического университета «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена проблема защиты конфиденциальной информации при передаче данных в системах связи. Исследован случай выявления стегограмм, сформированных согласно современным методам скрытия информации. Объектом исследования являются методы выявления стегограмм с данными, встроенными согласно адаптивным стегографическим методам.

Метод. Предложен метод предварительной обработки (калибровки) изображений для повышения соотношения стегоданные-контейнер для современных адаптивных стегографических методов HUGO, MG и MiPOD. Метод направлен на усиление незначительных искажений изображения-контейнера, обусловленных встраиванием данных. Усиление искажений достигается путем внесения в изображение дополнительных шумов, имеющих гауссовый и пуассоновый распределения. Первый тип шумов связан с тепловым шумом, который влияет на датчик изображения на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС) во время формирования изображения. Второй тип шума связан с дробовым шумом, который возникает в результате случайного процесса испускания электронов фотонами, попадающими на элементы ПЗС. Дисперсия тепловых шумов оценивалась с помощью двумерного фильтра Винера при вариации размеров скользящего окна. Параметры распределения Пуассона оценивались с помощью скользящего окна размером 5×5 пикселей.

Результаты. Построены зависимости ошибки обнаружения от степени заполнения изображения-контейнера стегоданными для методов встраивания HUGO, MG и MiPOD. Результаты представлены для случая внесения в изображения шума с гауссовым и пуассоновым делениями, а также применении различных методов предварительной обработки характеристик.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность предложенного подхода к калибровке изображений с использованием пуассоновских шумов. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование декартовых и линейно преобразованных признаков стегограмм для повышения точности работы стегодетектора. Перспективы дальнейших исследований могут включать изучение эффективности специальных типов шумов, таких как фрактальные шумы, с целью повышения соотношения стегоданные-контейнер для современных стегографических методов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стегоанализ цифровых изображений, адаптивные методы встраивания, Гауссовый шум, Пуассоновский шум.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Fridrich J. Steganography in Digital Media: Principles, Algorithms, and Applications / J. Fridrich. – Cambridge: Cambridge University Press, 2009. – 437 p. – ISBN 978-0-521-19019-0. – DOI: 10.1017/CBO9781139192903.
2. Конахович Г. Ф. Комп'ютерна стегографічна обробка й аналіз мультимедійних даних / Г. Ф. Конахович, Д. О. Прогинов, О. Ю. Пузиренко. – Київ : «Центр учбової літератури», 2018. – 558 с. – ISBN 978-617-673-741-4.
3. Kodovsky J. Calibration revisited / J. Kodovsky, J. Fridrich // Multimedia and security: 11th ACM workshop, Princeton, 7–8 September, 2009 : proceedings. – Princeton : ACM, 2009. – P. 63–74. – DOI: 10.1145/1597817.1597830.
4. Прогинов Д. О. Аналіз точності виявлення стегограм, сформованих адаптивними методами, при додатковому зашумленні зображень-контейнерів / Д. О. Прогинов // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи: міжнародна науково-технічна конференція, Київ, 18–24 листопада, 2019 : матеріали. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 225–227.
5. Yoan M. Using multiple re-embeddings for quantitative steganalysis and image reliability estimation: TKK reports in information and computer science / M. Yoan, P. Bas, L. Amaury. – Department of Information and Computer Science, Aalto University, 2010. – 19 p. – ISBN 978-952-60-3250-4.
6. Fridrich J. Rich models for steganalysis of digital images / J. Fridrich, J. Kodovsky // IEEE Transactions on Information Forensics Security. – 2012. – Vol. 7. – P. 868–882. – DOI: 10.1109/TIFS.2012.2190402.
7. Filler T. Gibbs construction in steganography / T. Filler, J. Fridrich // IEEE Transactions on Information Forensics

- Security. – 2010. – Vol. 5. – P. 705–720. – DOI: 10.1109/TIFS.2010.2077629.
8. Holub V. Designing Steganographic Distortion Using Directional Filters / V. Holub, J. Fridrich // Information Forensics and Security: IEEE International Workshop, Tenerife, 2–5 December, 2012: proceedings. – Tenerife : IEEE, 2012. – DOI: 10.1109/WIFS.2012.6412655.
 9. Selection-Channel-Aware Rich Model for Steganalysis of Digital Images / [T. Denemark, V. Sedighi, V. Holub et al] // Information Forensics and Security: IEEE International Workshop, Atlanta, 3–5 December, 2014: proceedings. – IEEE, 2014. – DOI: 10.1109/WIFS.2014.7084302.
 10. Holub V. Random Projections of Residuals for Digital Image Steganalysis / V. Holub, J. Fridrich // IEEE Transactions on Information Forensics Security. – 2013. – Vol. 8. – P. 1996–2013. – DOI: 10.1109/TIFS.2013.2286682.
 11. Boroumand M. Deep residual network for steganalysis of digital images / M. Boroumand, M. Chen, J. Fridrich // IEEE Transactions on Information Forensics Security. – 2018. – Vol. 14. – P. 1181–1193. – DOI: 10.1109/TIFS.2018.2871749.
 12. Progonov D. Steganalysis of adaptive embedding methods by message re-embedding into stego images / D. Progonov, V. Lucenko // Information Theories and Applications – 2020. – Vol. 27, Issue 4. – P. 3–24
 13. Gonzalez R. Digital Image Processing / R. Gonzalez, R. Woods. – London : Pearson Press, 2017. – 1192 p. – ISBN 978-0133356724.
 14. Filler T. Design of adaptive steganographic schemes for digital images / T. Filler, J. Fridrich // Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics: The International Society for Optical Engineering, San Francisco, 24–26 January, 2011: proceedings. – San Francisco : SPIE, 2011. – DOI: 10.1117/12.872192.
 15. Sedighi V. Content-adaptive pentary steganography using the multivariate generalized gaussian cover model / V. Sedighi, J. Fridrich, R. Cogramne // Electronic Imaging, Media Watermarking, Security, and Forensics: The International Society for Optical Engineering, San Francisco, 24–26 January, 2015: proceedings. – San Francisco: SPIE, 2015. – DOI: 10.1117/12.2080272.
 16. Sedighi V. Content adaptive steganography by minimizing statistical detectability / V. Sedighi, R. Cogramne, J. Fridrich // IEEE Transactions on Information Forensics Security. – 2015. – Vol. 11. – P. 221–234. DOI: 10.1109/TIFS.2015.2486744.
 17. Pevny T. Steganalysis by subtractive pixel adjacency matrix / T. Pevny, P. Bas, J. Fridrich // IEEE Transactions on Information Forensics Security. – 2010. – Vol. 5. – P. 215–224. – DOI: 10.1109/TIFS.2010.2045842.
 18. Cogramne R. The alaska steganalysis challenge: A first step towards steganalysis / R. Cogramne, Q. Gilboulot, P. Bas // Information Hiding and Multimedia Security: ACM workshop, Paris, 1–3 July, 2019: proceedings. – Paris: ACM Press, 2019. – P. 125–137. – DOI: 10.1145/3335203.3335726.
 19. Kodovsky J. Ensemble classifiers for steganalysis of digital media / J. Kodovsky, J. Fridrich // IEEE Transactions on Information Forensics Security. – 2012. – Vol. 7. – P. 432–444. – DOI: 10.1109/TIFS.2011.2175919.
 20. Lim J. Two-Dimensional Signal and Image Processing / J. Lim. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1989. – 694 p. – ISBN 978-0139353222.

РЕКОНФИГУРИРУЕМАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА

Шевелев С. С. – канд. техн. наук, доцент кафедры информационный безопасности, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Современные универсальные вычислительные машины способны реализовать любой алгоритм, но при решении определенных задач по скорости обработки не могут конкурировать со специализированными вычислительными модулями. Специализированные устройства имеют высокое быстродействие, эффективно решают задачи по обработке массивов, задач искусственного интеллекта, используются в качестве управляющих устройств. Применение специализированных микропроцессорных модулей, которые реализуют обработку строк символов, логических и числовых значений, представленных в виде целых и действительных чисел, позволяет повысить быстродействие выполнения арифметических операций за счет использования параллелизма при обработке данных.

Цель. Разработать принципы построения микропроцессорных модулей для вычислительной модульной системы с перестраиваемой структурой, арифметико-символьного процессора, специализированных вычислительных устройств, коммутационных систем способных конфигурировать микропроцессоры и специализированные вычислительные модули в мультиконвейерную структуру для повышения быстродействия выполнения арифметических и логических операций, высокоскоростных алгоритмов проектирования специализированных процессоров-акселераторов символьной обработки. Разработать алгоритмы, структурные и функциональные схемы специализированных математических модулей, выполняющих арифметические операции в прямых кодах на нейроподобных элементах и систем децентрализованного управления работы блоков.

Метод. Построен информационный граф вычислительного процесса модульной системы с перестраиваемой структурой. Разработаны структурные и функциональные схемы, алгоритмы, реализующие построение специализированных модулей для выполнения арифметических и логических операций, поисковых операций и функций замены вхождений в обрабатываемых словах. Разработано программное обеспечение моделирования работы арифметико-символьного процессора, специализированных вычислительных модулей, систем коммутаций.

Результаты. Разработана структурная схема реконфигурируемой вычислительной модульной системы, которая состоит из совместимых функциональных модулей, она способна к статической и динамической реконфигурации, имеет параллельную структуру соединения процессора и вычислительных модулей за счет использование интерфейсных каналов. Система состоит из арифметико-символьного процессора, специализированных вычислительных модулей и систем коммутаций, выполняет специфические задачи символьной обработки информации, арифметические и логические операции.

Выводы. Архитектура реконфигурируемых вычислительных систем может динамически изменяться в процессе их функционирования. Появляется возможность адаптации архитектуры вычислительной системы под структуру решаемой задачи, создавать проблемно-ориентированные вычислители, структура которых соответствует структуре решаемой задачи. В качестве основного вычислительного элемента в реконфигурируемых вычислительных системах используются не универсальные микропроцессоры, а программируемые логические интегральные схемы, которые объединены с помощью высокоскоростных интерфейсов в единое вычислительное поле. Реконфигурируемые мультиконвейерные вычислительные системы на основе полей являются эффективным средством для решения потоковых задач обработки информации и управления.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: информационный граф, параллельно-конвейерная структура, модульная система, специализированные вычислительные блоки.

АББРЕВИАТУРЫ

БВАО – блок выполнения арифметических операций;

БППЗВОС – блок параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах;

БВЛО – блок выполнения логических операций;

БХР – блок хранения результатов;

КСБУ – коммутационные схемы блока управления;

СКПМ система коммутаций процессор-модуль;

СКММ система коммутаций модуль-модуль;

СПЕЦ МОД1 – первый специализированный модуль;

СПЕЦ МОД2 – второй специализированный модуль;

СПЕЦ МОД3 – третий специализированный модуль;

СПЕЦ МОД4 – четвертый специализированный модуль;

СПЕЦ МОД5 – пятый специализированный модуль;

СКММ – система коммутаций модуль-модуль;

БВД – блок ввода данных;

СМК – система электронных ключей;

БХРП – блок хранения результатов подстановок;

ЭЛВ – элементарные вычислители логических операций;

БПВС – блок памяти вхождений и обрабатываемых слов;

БАВС – блок сравнения и анализа вхождений в обрабатываемых словах;

БЗАМ – блок замены вхождений в обрабатываемых словах;

БРГОС – блок регистра обрабатываемого слова;

БРГВХ – блок регистра вхождений;
БРГЗМ – блок регистра замены;
КОМ – компаратор;
БРГРЗ – блок регистр результата замены;
ЭлКл – схема электронных ключей;
БПВ – блок поиска вхождений;
БАЗУ – блок ассоциативных запоминающих устройств;
БОРС – блок обработки результатов сравнения;
БХУС – блок хранения упорядоченных слов;
MR – младшие разряды двоичных чисел;
CR – старшие двоичных разряды чисел;
ДС – схема дешифратора;
ЛЦл – локализованные центры системы распределения ресурсов;
БВД – блок ввода данных;
БСПЧ – блок сортировки положительных чисел;
БСОЧ – блок сортировки отрицательных чисел;
БВАО – блок выполнения арифметических операций;
БППЗВОС – блока параллельного поиска и замены вхождений в обрабатываемых словах;
БВЛО – блок выполнения логических операций;
АСП – арифметико-символьный процессор;
БС – блок сортировки;
БДШ – блок дешифрации;
ЭКл – электронные ключи;
ШФ – шинный формирователь.

НОМЕНКЛАТУРА

S – множество вершин информационного графа;
 S_i – вершина информационного графа;
 O_i – допустимые операции, приписанные к вершинам графа;
 F – множество дуг графа;
 L – множество логических микроопераций;
 Z – количество входных векторов;
 N – количество векторов входных данных;
 $t_{БВД}$ – время обработки блоком ввода данных;
 $t_{Сик}$ – время обработки данных системой электронных ключей;
 $t_{ЭлВ}$ – время обработки данных элементарными вычислителями логических операций;
 $t_{БХР}$ – время обработки блоком хранения результатов;
 M – число вершин на графе $G(S,F)$;
 $S(O_i)$ – число тактов работы блока устройства;
 τ – продолжительность такта;
 $T_{Пос}$ – время результата последовательной обработки;
 $T_{Пар}$ – время результата параллельной обработки;
 $T_{Кон}$ – время результата конвейерной обработки;
 $V_{Пос}$ – время результата последовательной обработки;
 $V_{Кон}$ – скорость конвейерной обработки;

$V_{Пар}$ – скорость параллельной обработки;
 K – количество процессоров;
 P_i – число элементарных процессоров в устройстве;
 $T_{ТАВС}$ – самый максимальный по времени этап обработки данных;
 R – множество арифметических микроопераций;
 C – множество микроопераций символьной обработки информации;
 β – символы вхождения;
 α – символы обрабатываемого слова;
 s – позиция вхождения в обрабатываемом слове;
 m – число сдвигов вправо в слове;
 x – множество символов вхождения для поиска в обрабатываемом слове;
 w – множество символов обрабатываемого слова при параллельном поиске;
 a_i, b_i, g_i – двоичные переменные;
 T_{max} – длительность такта самого медленного этапа обработки;
 $T_{Кон}$ – время при конвейерной обработке;
 $t_{БОФЗ}$ – время работы блока операций в формате с фиксированной запятой;
 $t_{БОПРПЗ}$ – время работы блока операций порядков в формате с плавающей запятой;
 $t_{БОМПЗ}$ – время работы блока операций мантисс в формате с плавающей запятой;
 H – число процессоров в конвейерной организации вычислительного процесса;
 y – основание системы счисления;
 q – количество чисел в методе сортировки выбором;
 u – количество букв в регистре вхождения;
 A, B, P, Σ – двоичные разряды чисел;
 $\Sigma_0, \Sigma_1, \Sigma_{10}, \Sigma_{11}$ – блоки суммирования.

ВВЕДЕНИЕ

Идея концепции построения реконфигурируемых вычислительных систем заключается в аппаратной реализации всех операций, предписанных вершинами информационного графа задачи, всех каналов передачи данных между вершинами, соответствующими дугам графа, и всех информационных каналов, соответствующих входным и выходным вершинам. Задача, определенная информационным графом, будет выполнена максимально быстро, поскольку обеспечивается максимально возможное распараллеливание вычислений. Информационный граф большой задачи сегментируется на фрагменты – непересекающиеся базовые подграфы, физически реализуемые в аппаратуре реконфигурируемых вычислительных систем.

Основными вычислительными блоками в реконфигурируемой вычислительной системе являются макропроцессоры, которые позволяют реализовывать операции, предписанные вершинами информационно-

го графа. Макропроцессор представляет собой некоторый набор элементарных процессоров, объединяемых в единый программно-неделимый вычислительный ресурс с помощью локального пространственно-коммутирующего коммутатора. Для реализации информационного графа решаемой задачи макропроцессоры должны иметь возможность соединения в вычислительные параллельно-конвейерные структуры с помощью системного коммутатора, который обеспечивает различные варианты соединения макропроцессоров друг с другом. В состав системы входит распределенная память, обеспечивающая возможность параллельной выдачи массивов входных данных на входы макропроцессоров и записи результатов вычислений с их выходов [1].

Объектом исследования является процесс разработки алгоритмов работы устройств, структурных и принципиальных схем арифметико-символьного процессора, специализированных микропроцессорных модулей, систем коммутаций, реализующих вычислительную модульную систему с перестраиваемой структурой.

Применение специализированных микропроцессорных модулей позволяет повысить быстродействие выполнения арифметических операций за счет реализации конвейеризации. Надежность работы системы повышается за счет дублирования и резервирования каналов передачи информации.

Предметом исследования являются методы, модели, алгоритмы функционирования и структурно-функциональная организация устройств выполнения арифметических и логических операций, осуществление поисковых операций и функций замены в словах текста, сортировка информации и распределение ресурсов.

Универсальные микропроцессоры предназначены для решения широкого круга задач, они способны реализовать любой алгоритм. Специализированные микропроцессоры предназначены для решения определенного класса задач. Эти устройства имеют высокое быстродействие, производительно решают задачи по обработке массивов, интерпретации языков высокого уровня задач искусственного интеллекта, проектирования и создания управляющих устройств. Их существенными особенностями являются простота управления, компактность аппаратных средств, низкая стоимость и малая мощность потребления [1–2].

Целью работы является разработка теоретических основ и принципов построения микропроцессорных модулей для вычислительной открытой развиваемой асинхронной модульной системы с перестраиваемой структурой, арифметико-символьного процессора, специализированных вычислительных модулей и систем коммутаций.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– проанализировать современные методы, алгоритмы и принципы построения микропроцессорных

модулей вычислительной системы с перестраиваемой структурой;

– разработка коммутационной системы способной конфигурировать микропроцессоры и специализированные вычислительные модули в мультikonвейерную структуру;

– разработка аппаратно-ориентированных процедур и методов структурно-функциональной организации специализированных микропроцессорных модулей;

– разработка структурных и функциональных схем специализированных вычислительных модулей, систем коммутаций;

– экспериментальное подтверждение достоверности результатов и теоретических исследований функционирования алгоритмов.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Вычислительную систему можно представить как иерархию универсальной ЭВМ, систему специализированных вычислительных модулей и гибкую подсистему интерфейсных каналов параллельной передачи информации между устройствами. Задача заключается в создании и исследовании микропроцессорных специализированных модулей для потоковой обработки данных. Потоковая обработка данных заключается в преобразовании потоков векторов входных данных $A_i (i=1, 2, \dots, n)$ и $B_i (i=1, 2, \dots, n)$ в поток векторов $R_i \langle r^i_1, r^i_2, \dots, r^i_k \rangle (i=1, 2, \dots, n)$ выходных данных в соответствии с графом алгоритма $G(S, F)$. Блок арифметических операций выполняет операции: сум-

мирования $\sum_{i=1}^n (a_i + b_i)$, вычитания $V_{i=1}^n (a_i - b_i)$, про-

изведения $P_{i=1}^n (a_i * b_i)$, деления $D_{i=1}^n (a_i / b_i)$ в формате с фиксированной запятой и в формате с плавающей

$\sum_{i=1}^n (a_i 2^x + b_i 2^m)$, $V_{i=1}^n (a_i 2^x - b_i 2^m)$, $P_{i=1}^n (a_i 2^x * b_i 2^m)$,

$D_{i=1}^n (a_i 2^x / b_i 2^m)$ запятой. Блок параллельного поиска

и замены в обрабатываемых словах выполняет левую L_k и правую P_k конкатенацию цепочек

$\alpha = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_k$ и $\beta = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_k$. Левая конкатенация цепочек равна $L_k = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_k \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_k$, правая кон-

катенация цепочек α и β равна

$P_k = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_k \beta_1 \beta_2 \dots \beta_k$. Блок выполняет операцию

параллельного поиска вхождений в обрабатываемых словах. Требуется найти все вхождения $\beta = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_n$

в слове $\alpha = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_m$ в качестве подстроки. Определить все смещения S , для которых подстрока

$\alpha_s = \alpha_{s+1} \dots \alpha_{s+n}$ совпадает с $\beta_1 \dots \beta_n$. Для поиска вычисляется функция $F = (\alpha_1 = \beta_1) \& \dots \& (\alpha_n = \beta_n)$,

если F равно единице, то вхождение найдено в слове. Применяя конечный упорядоченный набор формул подстановки к обрабатываемому слову α : получается

новое слово $\alpha' = \alpha_1 \dots \alpha_s \beta_1 \beta_2 \dots \beta_n \alpha_{s+n+1} \alpha_m$. Блок логических операций выполняет: инверсию $\overline{a_i}$, конъюнкцию $a_i \& b_i$, дизъюнкцию $a_i \vee b_i$, исключающее ИЛИ $a_i \oplus b_i$, эквивалентность $a_i = b_i$, $a_i \in \{0,1\}$; $b_i \in \{0,1\}$.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В работе [1] рассмотрены основные архитектурные концепции построения средств обработки информации, модели функциональной организации вычислительных машин и параллельных вычислительных систем. Описаны канонические функциональные структуры конвейерных, матричных, мультипроцессорных распределенных систем.

Дальнейшие пути решения проблемы по перспективному развитию суперкомпьютеров это создание реконфигурированных вычислительных систем, в которых используются программируемые логические интегральные схемы. Данный подход обеспечивает высокую реальную производительность вычислительной системы [2].

В работе [3] представлена вычислительная система, блоки которой выполняют основные арифметические операции двоичных чисел в прямых кодах с фиксированной и плавающей запятой, осуществляют поисковые функции и операции замены, выполняют логические операции. В модульной системе устройства имеются собственные средства обработки, оперативные запоминающие устройства, локальная коммутация и автономный блок управления.

Недостатком представленной организацией возникает проблема организации коммутации и обменов между процессором и устройствами, а также функциональное соединение между вычислительными модулями.

В работе [4] рассмотрены основные вопросы организации параллельной обработки данных, проанализированы возникающие при этом проблемы, а также пути их решения. Показаны особенности организации вычислительного процесса в параллельных системах, рассмотрены языки параллельного программирования и характерные параллельные алгоритмы.

В работе [5] модульная система имеет параллельную структуру за счет использования интерфейсных каналов соединения процессора и вычислительных модулей, характеризуется также асинхронностью работы составляющих ее устройств. В структуру вычислительной системе входят специализированные устройства, которые позволяют сформировать шифротекст информационных данных, используя алгоритмы преобразования на основе операций поиска и замены, которые преобразовывают открытый текст в последовательность некоторых знаков в шифротекст.

В работе [6] предложено устройство, которое выполняет операции поиска вхождений и подстановку символов в словах текста. Новые слова можно формировать © Шевелев С. С., 2021
DOI 10.15588/1607-3274-2021-1-19

мировать с помощью операций поиска и замены вхождений, а также при выполнении операций левой и правой конкатенаций. Необходимо достигнуть высокой скорости поиска и замены вхождений в обрабатываемом слове. Поисковая операция выполняется в определении вхождений, имеющих общие части, так и без общих частей.

В работе [7] предложено устройство сортировки слов. При решении информационно-логических задач требуется выбирать слова по их признакам. Применение ассоциативного запоминающего устройства по упорядочению символьной информации повышает надежность и производительность, позволит упростить алгоритм работы сортировочного устройства.

Устройство сортировки слов содержит блоки поиска вхождений, схемы обработки результатов сравнения, хранения упорядоченных слов.

Недостатком представленной структуры является применение ассоциативных запоминающих устройств, слова в которых отыскиваются по их признакам, по их содержанию, а не по адресам ячеек, в которых записаны эти слова. В АЗУ, параллельных по словам и последовательных по разрядам, для обработки данных используются последовательные алгоритмы.

В работе [8] рассматривается вопрос по взаимораспределению ресурсов между процессорами.

Назначение системы взаимораспределения ресурсов должно обеспечивать режим управления информацией, который обеспечивает оптимальное сбалансированное функционирование системы взаимодействующих локализованных узлов.

В работе [9] в представленном сумматоре происходит сложение и вычитание двоичных чисел по правилам выполнения арифметических операций в троичной системе счисления, которая обладает наибольшей плотностью записи информации. Троичные компьютеры имеют большую удельную емкость памяти и большую удельную производительность процессора, чем двоичные ЭВМ.

В состав устройства входят: блоки выполнения операций, комбинационные схемы по формированию сигнала и перевода числа в код, дешифраторы, двоичные триггеры.

Недостатком представленной структуры является разработка комбинационных схем дешифраторов по определению комбинации суммы чисел, при которой необходимо ввести коррекцию для получения окончательного результата.

В работе [10] упорядочение данных включает анализ возможностей аппаратных средств вычислительных систем, расположения их каналов, объема оперативной памяти, частоты обращений, быстродействие, диапазона обработки входной числовой и символьной информации.

В представленном устройстве сортировки информации выполняется задача сортировки входной числовой и символьной информации по возрастанию и убыванию. В устройстве осуществляются поисковые

операции по указанному интервалу или по конкретному заданному символу или числу.

Недостатком представленной структуры является то, что устройство сортировки информации может использовать методы внешней сортировки данных. Внешние методы приемлемы для файлов данных, которые слишком велики, чтобы поместиться в оперативной памяти процессора.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Граф $G(S, F)$ рис. 1 называется информационным графом вычислительной открытой развиваемой асинхронной модульной системы, или графом алгоритма решения задачи. Граф $G(S, F)$ содержит множество вершин $s_i \in S$, каждой из которых приписана некоторая операция O_i , принадлежащая множеству допустимых операций. Дуги $f(s_i, s_{i+1}) \in F$ определяют последовательность выполнения операций, графа, причем если две вершины s_i и s_{i+1} соединены дугой $f(s_i, s_{i+1})$, то это означает, что результат операции O_i является входным данным для операции O_{i+1} . Граф $G(S, F)$ имеет также множество входных дуг $f(s_{0i}, s_i)$, которые определяются блоком входных данных, а также выходных дуг $f(s_i, s_k)$, определяющих хранение результатов ее решения.

Множество вершин S определяется множеством процессоров вычислительной открытой асинхронной системы. Множество дуг представляет собой множество каналов коммуникаций между процессорами. Входные и выходные дуги графа $G(S, F)$ определяются каналами связи с источником входных и приемником выходных данных, в частности, с памятью системы. Операции O_i из множества допустимых операций O реализуются в процессорах вычислительной системы в форме последовательных процедур обработки данных.

Вычислительную открытую развиваемую асинхронную модульную систему можно представить как иерархию универсальной ЭВМ, систему специализированных вычислительных модулей и гибкую подсистему интерфейсных каналов параллельной передачи информации между устройствами [2].

В представленной системе отдельное устройство имеет собственные средства обработки, оперативное запоминающее устройство для хранения данных, локальную коммутацию и автономный блок управления. Он становится самостоятельным, функционально полным вычислительным модулем.

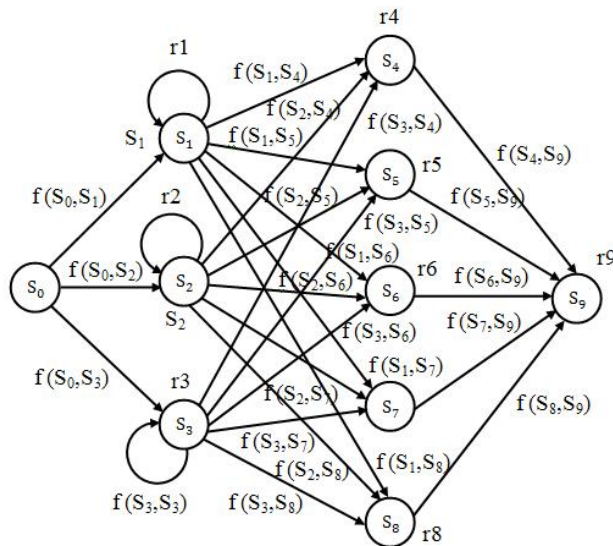


Рисунок 1 – Информационный граф вычислительной открытой развиваемой асинхронной модульной системы

Функциональное назначение устройств вычислительной системы (рис. 2): БВАО – блок выполнения арифметических операций, БПЗВОС – блок параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах, БВЛО – блок выполнения логических операций, БХР – блок хранения результатов, используемый для записи и чтения данных; коммутационные системы: КСБУ обеспечивает соединение между процессором и другими устройствами, СКПМ процессор–модуль обеспечивает двустороннюю передачу информации между процессором и специализированными вычислительными модулями, СКММ модуль–модуль обеспечивает соединения между специализированными модулями; специализированные модули: СПЕЦ МОД1 выполняет операции по символьной обработке, СПЕЦ МОД2 осуществляет сортировку слов входного текста, СПЕЦ МОД3 решает задачу распределения ресурсов со многими параметрами между локализованными центрами, СПЕЦ МОД4 выполняет арифметическую операцию сложения чисел. СПЕЦ МОД5 выполняет сортировку двоичной информации.

Семейство высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных систем с динамически перестраиваемой, программируемой архитектурой на основе реконфигурируемой элементной базы является конкурентоспособной альтернативой традиционной организации многопроцессорных систем, основанных на использовании микропроцессоров в качестве основного вычислительного элемента.

Вычислительная открытая развиваемая асинхронная модульная система сочетает в себя как последовательный, так и конвейерный способ обработки информации, поскольку входные данные обрабатываются одновременно по разным конвейерным цепочкам процессоров.

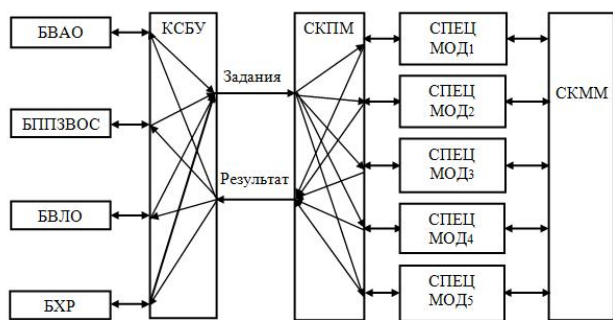


Рисунок 2 – Граф вычислительного процесса вычислительной открытой развиваемой асинхронной модульной системы

Основными вычислительными блоками в реконфигурируемой вычислительной системе являются макропроцессоры, которые позволяют реализовывать операции, предписанные вершинами информационного графа. Макропроцессоры соединяются в вычислительные параллельно-конвейерные структуры с помощью системного коммутатора, который обеспечивает различные варианты соединения вычислительных модулей друг с другом. В состав системы входит распределенная память, обеспечивающая параллельную выдачу массивов входных данных на входы макропроцессоров и записи результатов вычислений с их выходов.

Для решения этой задачи можно использовать блок выполнения логических операций с последовательной архитектурой, основными элементами которого являются элементарные вычислители, выполняющие логические операции: $\{\&, V, \bar{\quad}\}$, $\{\&, \bar{\quad}\}$, $\{V, \bar{\quad}\}$, $\{\&, \oplus, 1\}$, которые относятся к функционально полной системе булевых функций.

К множеству микроопераций $L = \{L_{12}, L_{13}, \dots, L_{1Z}\}$ выполняемых блоком логических операций S_3 относятся: инверсия $L_{12} \equiv g = \bar{a}$, конъюнкция $L_{12} \equiv g = a \& (a_i b_i)$, дизъюнкция $L_{12} \equiv g = a V (a_i b_i)$, исключающее ИЛИ $L_{12} \equiv g = a \oplus (a_i b_i)$, $g_i \in \{0, 1\}$; $a_i \in \{0, 1\}$; $b_i \in \{0, 1\}$, эквивалентность $L_{12} \equiv g = a \approx (a_i b_i)$, $g_i \in \{0, 1\}$; $a_i \in \{0, 1\}$; $b_i \in \{0, 1\}$.

На рис. 3 представлены: блок ввода данных БВД, система электронных ключей СиК, элементарные вычислители логических операций ЭлВ, блок хранения результатов БХР.

Время результата $T_{\text{пос}}$ обработки N векторов входных данных определяется по формуле

$$T_{\text{пос}} = N \cdot (t_{\text{БВД}} + t_{\text{СиК}} + t_{\text{ЭлВ}} + t_{\text{БХР}}) = N \sum_{i=1}^M s(O_i) \cdot \tau. \quad (1)$$

Сокращения времени $T_{\text{пар}}$ обработки потока входных векторов является распараллеливания про-
 © Шевелев С. С., 2021
 DOI 10.15588/1607-3274-2021-1-19

цесса обработки. В этом случае параллельный способ подразумевает наличие K процессоров $P_i (i=1, 2, \dots, K)$, каждый из которых может работать независимо от других процессоров. Каждый из процессоров $P_i (i=1, 2, \dots, K)$ запрограммирован на реализацию графа $G(S, F)$. Множество входных векторов $Z_i (i=1, 2, \dots, N)$ разбивается на (N/K) непересекающихся подмножеств, каждое из этих подмножеств входных векторов может быть обработано на процессоре P_i независимо, то есть параллельно с другими подмножествами.

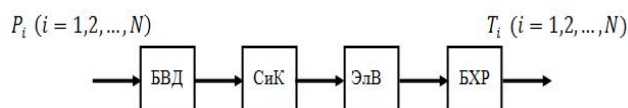


Рисунок 3 – Блоки выполнения логических операций с последовательной архитектурой

Для решения этой задачи можно использовать блок выполнения математических операций в форматах с фиксированной и плавающей запятой с параллельной архитектурой, который приведен на рис. 4. Основными элементами, которого являются математические вычислители, выполняющие арифметические и сдвиговые операции.

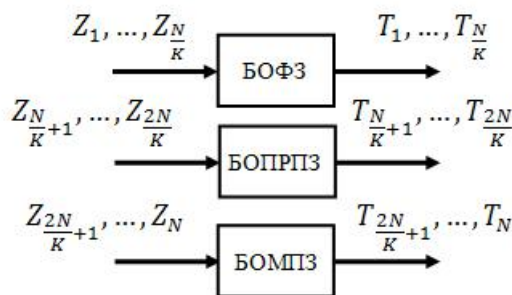


Рисунок 4 – Параллельный способ обработки векторов входных данных

К множеству микроопераций $R = \{R_{12}, R_{13}, \dots, R_{1k}\}$ выполняемых блоком арифметических операций S_1 относятся: суммирование $R_{12} = \sum_{i=1}^n (a_i + b_i)$, вычитание

$R_{13} = V_{i=1}^n (a_i - b_i)$, произведение $R_{14} = P_{i=1}^n (a_i * b_i)$, деление $R_{15} = D_{i=1}^n (a_i / b_i)$ в формате с фиксированной запятой и в формате с плавающей запятой $R_{16} = \sum_{i=1}^n (a_i 2^x + b_i 2^m)$, $R_{17} = V_{i=1}^n (a_i 2^x - b_i 2^m)$, $R_{18} = P_{i=1}^n (a_i 2^x * b_i 2^m)$, $R_{19} = D_{i=1}^n (a_i 2^x / b_i 2^m)$.

В этом случае время получения результата $T_{\text{пар}}$, при обработке всего множества векторов входных данных, будет вычисляться по формуле

$$T_{\text{пар}} = \left(\frac{N}{K}\right) \cdot (t_{\text{БОВФЗ}} + t_{\text{БОВПРПЗ}} + t_{\text{БОВМПЗ}}) = \left(\frac{N}{K}\right) \sum_{i=1}^M s(O_i) \cdot \tau. \quad (2)$$

Время обработки потока сокращается в K раз по сравнению с последовательной обработкой всех входных векторов.

К множеству микроопераций $C = \{C_{12}, C_{13}, \dots, C_{1t}\}$ выполняемых блоком параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах S_2 относятся: левая конкатенация β и α цепочек $\alpha = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_k$ и $\beta = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_p$ символы одного этого же алфавита V , $\alpha_i \in V$, $\forall i=1, \dots, k$ и $\beta_i \in V$, $\forall i=1, \dots, p$, равна $\gamma = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_p \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_k$, правая конкатенация цепочек α и β принимает вид $\gamma = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_k \beta_1 \beta_2 \dots \beta_p$ над тем же алфавитом V .

Блок выполняет операцию параллельного поиска вхождений в обрабатываемых словах. Требуется найти все вхождения $x = \beta_1 \beta_2 \dots \beta_m$ в слове $w = \alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n$ в качестве подстроки. Определить все смещения s , для которых подстрока $w_s = \alpha_{s+1} \dots \alpha_{s+m}$ совпадает с вхождением $x = \beta_1 \dots \beta_m$. Для поиска вычисляется функция $F = (\alpha_{s+1} = \beta_1) \& (\alpha_{s+2} = \beta_2) \& \dots \& (\alpha_{s+m} = \beta_m)$, если F равно единице, то вхождение найдено в слове. Смещение s определяет позицию вхождения в слове, сдвиг символов слова осуществляется на m позиций вправо [3].

В блоке выполняется операция замены вхождений в обрабатываемом слове, которая задается формулой подстановки. Применяя конечный упорядоченный набор формул подстановки к обрабатываемому слову w :

$$\begin{cases} \alpha_{s+1} \rightarrow \beta_1 \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ \alpha_{s+m} \rightarrow \beta_m \end{cases} \quad (k \geq 1), \quad (3)$$

получается новое слово $w' = \alpha_1 \dots \alpha_s \beta_1 \beta_2 \dots \beta_m \alpha_{s+m+1} \alpha_n$. Если это слово взять за исходное и применить те же процедуры, то получается новое слово w'' и так далее $w \rightarrow w' \rightarrow w'' \dots$.

Быстродействие конвейера при длительной работе будет значительно превышать быстродействие, которое достигается при последовательной обработке команд. Это увеличение будет тем больше, чем меньше длительность такта конвейера и чем больше количество выполненных за исследуемый период команд.

В блоке параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах вычислительной системы можно использовать конвейерную обработку. Блок имеет 4 элементарных процессора $P_i (i=1, 2, 3, 4)$, соединенных в цепочку, как показано на рис. 5, каждый из элементарных процессоров P_i запрограммирован на реализацию соответствующего подграфа

$G_i(S_i, F_i) (i=1, 2, 3, 4)$ общего графа алгоритма $G(S, F)$. На рис. 5 представлены процессоры: памяти вхождений и обрабатываемых слов БПВС, сравнения и анализа вхождений в обрабатываемых словах БАВС, замены вхождений в обрабатываемых словах БЗАМ, хранения результатов подстановок БХРП.

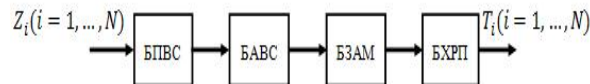


Рисунок 5 – Конвейерная организация работы блока параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах

Длительность такта T_{max} будет равна длительности самого медленного этапа обработки – блока сравнения и анализа вхождений в обрабатываемых словах БАВС.

$$T = \max \{T_{\text{БПВС}}, T_{\text{БАВС}}, T_{\text{БЗАМ}}, T_{\text{БХРП}}\} = T_{\text{БАВС}}. \quad (4)$$

Время $T_{\text{кон}}$ при конвейерной обработке N команд будет вычисляться следующей формулой

$$T_{\text{кон}} = P_i \cdot T_{\text{БАВС}} + (N-1) \cdot T_{\text{БАВС}} = T_{\text{БАВС}} \cdot (P_i + (N-1)). \quad (5)$$

Реконфигурируемые вычислительные системы с динамически перестраиваемой архитектурой превосходят по технико-экономическим характеристикам многопроцессорные вычислительные системы с традиционной архитектурой в сегментах рынка супер-ЭВМ и рабочих станций, а также ускорителей к персональному компьютеру.

Сравнительный анализ времени и скорости конвейерной и последовательной архитектур на примере работы блока параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах вычислительной системы. Время и скорость при последовательной организации работы блока вычислительной системы $T_{\text{пос}}$ и $V_{\text{пос}}$ определяются по формулам

$$\begin{aligned} T_{\text{пос}} &= N \cdot (\tau_1 + \tau_{\text{max}} + \tau_3 + \tau_4), \\ V_{\text{пос}} &= \frac{1}{4} = \frac{1}{\tau_1 + \tau_{\text{max}} + \tau_3 + \tau_4}, \end{aligned} \quad (6)$$

Время $T_{\text{кон}}$ и скорость $V_{\text{кон}}$ конвейерной организации работы блока параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах определяются из отношений

$$\begin{aligned} T_{\text{кон}} &= (N+4-1) \cdot \tau_{\text{max}} = (N+3) \cdot \tau_{\text{max}}, \\ V_{\text{кон}} &= (\tau_{\text{max}})^{-1} = \frac{1}{\tau_{\text{max}}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Отношение времени последовательной организации вычислительного процесса $T_{\text{пос}}$ к конвейерной $T_{\text{кон}}$ будет определяться как

$$\frac{T_{\text{пос}}}{T_{\text{кон}}} = \frac{\tau_1 + \tau_{\text{max}} + \tau_3 + \tau_4}{\tau_{\text{max}}} \approx \frac{4 \cdot \tau_{\text{max}}}{\tau_{\text{max}}} = 4. \quad (8)$$

Отношение скорости конвейерной $V_{\text{кон}}$ к последовательной $V_{\text{пос}}$ определится как

$$\frac{V_{\text{кон}}}{V_{\text{пос}}} = \frac{\tau_1 + \tau_{\text{max}} + \tau_3 + \tau_4}{\tau_{\text{max}}} \approx \frac{4 \cdot \tau_{\text{max}}}{\tau_{\text{max}}} = 4. \quad (9)$$

При большом значении числа входных векторов N конвейерная организация вычислительного процесса требует меньше времени, а скорость будет больше, чем последовательная более чем в 4 раза, где 4 – число элементарных процессоров в конвейерной цепочке блока. Эффективность архитектуры конвейерной организации вычислительного процесса по сравнению с последовательной приблизительно в N раз выше [4].

Время выполнения операции блоком параллельного поиска и замены в обрабатываемых словах конвейерной и последовательной архитектур приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Время определения поиска и замены в словах

Число входных векторов N	1	5	10	15	20
Время $T_{\text{пос}}$ нс	500	2500	5000	7500	10000
Время $T_{\text{кон}}$ нс	800	1600	2600	3600	4600

Сравнительный анализ времени конвейерной и последовательной архитектур. Изображенный график на рис. 6 иллюстрирует разницу в эффективности архитектуры конвейерной организации вычислительного процесса по сравнению с последовательной.

Важным компонентом массово-параллельных компьютеров является коммуникационная среда. Это набор аппаратных и программных средств, обеспечивающих обмен сообщениями между процессорами. Она предназначена для достижения высоких скоростей передачи с малым временем задержки и при этом обеспечивает масштабируемую архитектуру, позволяющую строить системы, состоящие из множества блоков.

Система коммутации процессор-модуль обеспечивает передачу информации от арифметико-символьного процессора на входы специализированных вычислительных модулей системы в виде заданий, а также формирует интерфейсный канал процессор-модуль передачи информации с выходов специализированных вычислительных модулей системы в виде результата для хранения его в памяти арифметико-символьного процессора.

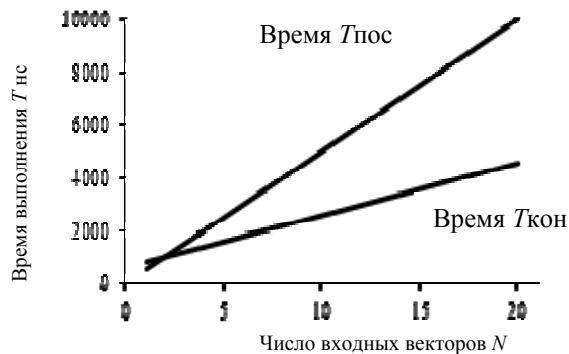


Рисунок 6 – График сравнение времени конвейерной и последовательной архитектур

Система коммутации модуль-модуль обеспечивает передачу информации с выходов специализированных вычислительных модулей на входы других специализированных вычислительных модулей системы в виде заданий и результатов, а также формирует интерфейсный канал передачи информации с выходов специализированных вычислительных модулей системы в виде результатов для хранения их в памяти арифметико-символьного процессора [11].

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод1 выполняет операции поиска вхождения в обрабатываемых словах приведен на рис. 7. Первый формат работы устройства определяет вхождение, которые имеют одинаковые части. Это означает, что предыдущие вхождение и последующие имеют общую часть, состоящую из одной буквы или цепочки символов. Вторым форматом работы системы характеризуется определением вхождений, не имеющих общих частей. В этом случае определяется адрес только через и сдвиг. Если необходимо произвести замену найденного вхождения на подстановку буквы или слово, заранее определенную и записанную в регистр подстановок.

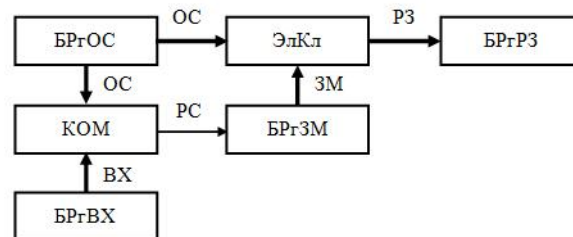


Рисунок 7 – Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод1

БРгОС – блок регистра обрабатываемого слова; БРгВХ – блок регистра вхождений; БРгЗМ – блок регистра замены; КОМ – компаратор; БРгРЗ – блок регистра результата замены; ЭлКл – схема электронных ключей.

В этом случае, вначале осуществляется операция поиска вхождений без общих частей, затем производится операция замены, найденного вхождения на подстановку. Процедуры сдвига возможны при помощи реверсивных регистров, которые осуществляют

сдвиг информации как влево, так и вправо. В параллельной системе поиска и замены осуществляется процесс обработки информации сразу с несколькими словами и несколькими входениями в параллельном формате. Для выполнения параллельной обработки в системе имеются n -блоков поиска и замены [6].

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод2 выполняет операцию сортировки слов с помощью ассоциативного запоминающего устройства приведен на рис. 8.

Поиск слов в памяти происходит по содержанию. В ассоциативном запоминающем устройстве для обработки данных используются последовательные алгоритмы, поиск осуществляется параллельно по словам и последовательно по разрядам. Это позволяет проводить операции на равенство искомых слов равных заданному признаку. В режиме поиска АЗУ считываются из памяти все слова, подчиняющиеся определенным условиям: равные, больше или меньше, поиск минимального, максимального значения, поиск величин, заключенных в заданном интервале, упорядоченная сортировка [7].

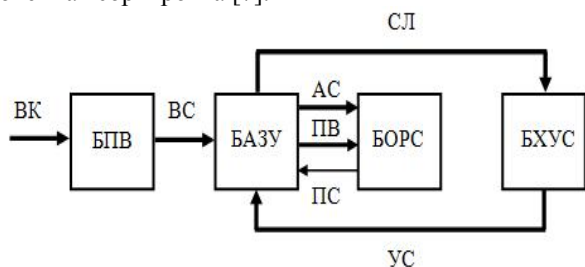


Рисунок 8 – Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод2

БПВ – блок поиска входений; БАЗУ – блок ассоциативных запоминающих устройств; БОРС – блок обработки результатов сравнения; БХУС блок хранения упорядоченных слов.

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод3 формирует режимы управления материальными потоками или информацией, которые обеспечивают оптимальное сбалансированное функционирование системы взаимодействующих локализованных узлов по многим ресурсам и параметрам приведен на рис. 9.

Локализованные центры системы служат для формирования избыточного ресурса, который необходимо распределить по ассоциативным запоминающим устройствам других блоков, а также для получения адреса хранения и анализа определенного количества ресурса, полученного от других блоков. Система распределения ресурсов определяет «свободные» места в ассоциативных запоминающих устройствах избыточных ресурсов и их параметров. Процесс передачи избытка на свободные места произойдет тогда, когда объемы избыточных ресурсов и параметров равны или меньше предоставленных объемов «свободных» мест [8].

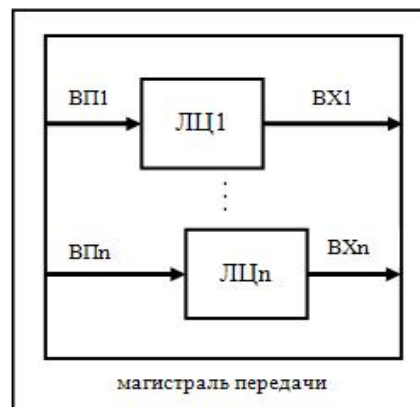


Рисунок 9 – Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод3

ЛЦЦ – локализованные центры системы распределения; магистраль передачи.

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод4 выполняет микрооперацию сложения чисел в троичной системе счисления приведен на рис. 10.

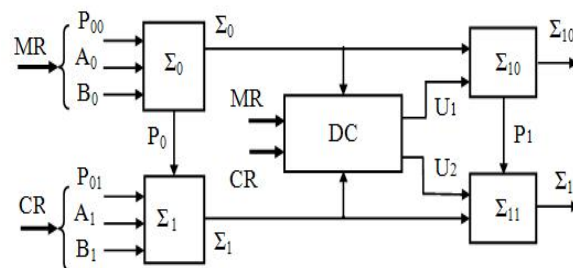


Рисунок 10 – Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод4

Использование троичной системы счисления обосновывается следующим результатом. При сложении младших разрядов A_0 и B_0 , старших A_1 и B_1 разрядов и переносов из младших разрядов в старшие P_{00}, P_{01} формируются суммы Σ_0, Σ_1 и переносы $P_0, P_1, A_i \in \{0,1\}; B_i \in \{0,1\}$. Сигналы Σ_{10} и Σ_{11} представляют младший и старший разряды окончательной суммы [9].

$$\Sigma_0 = \sum_{i=1}^3 \oplus (A_0 B_0 P_{00}), \Sigma_0 \in \{0,1\};$$

$$A_0 \in \{0,1\}; B_0 \in \{0,1\}; P_{00} \in \{0,1\}. \quad (10)$$

$$\Sigma_1 = (\sum_{i=1}^2 \oplus (P_0 P_{01})) \oplus (\sum_{i=1}^2 \oplus (A_1 B_1)),$$

$$\Sigma_1 \in \{0,1\}; P_0 \in \{0,1\}; P_{01} \in \{0,1\};$$

$$A_1 \in \{0,1\}; B_1 \in \{0,1\}. \quad (11)$$

$$\Sigma_{10} = \sum_{i=1}^2 \oplus (\Sigma_0 U_1), \Sigma_{10} \in \{0,1\};$$

$$\Sigma_0 \in \{0,1\}; U_1 \in \{0,1\}; \quad (12)$$

$$\Sigma_{11} = \sum_{i=1}^3 \oplus (P_1 \Sigma_1 U_2), \Sigma_{11} \in \{0,1\};$$

$$P_1 \in \{0,1\}; \Sigma_1 \in \{0,1\}; U_2 \in \{0,1\}. \quad (13)$$

Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод5 выполняет сортировку информации методом преобразования данных в адрес приведен на рис. 11. Входные данные поступают одновременно на информационные и адресные входы оперативных запоминающих устройств. По сформированным адресам данные и числа одинаковых символов и чисел записываются в оперативную память устройства.

Преобразования данных в адрес происходит с помощью хеш-функции, которая отображает каждый ключ из набора S во множество целых чисел без коллизий.

Инъективное отображение для целого $k \geq 1$ описывается функцией $h(k): U \rightarrow [m]$, она является k -идеальной хеш-функцией для $S \subseteq U$, если для каждого $j \in [m]$ имеем $|\{x \in S | h(x) = j\}| \leq k$.

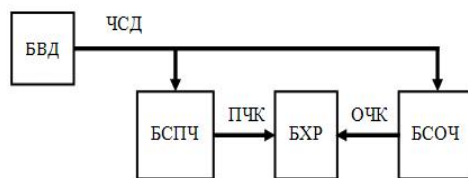


Рисунок 11 – Специализированный вычислительный модуль СпецВычМод5

БВД – блок ввода данных; БСПЧ – блок сортировки положительных чисел; БСОЧ – блок сортировки отрицательных чисел; БХР – блок хранения результата.

Блок-схема алгоритма работы устройства упорядочения информации методом преобразования данных в адрес приведена на рис. 12.

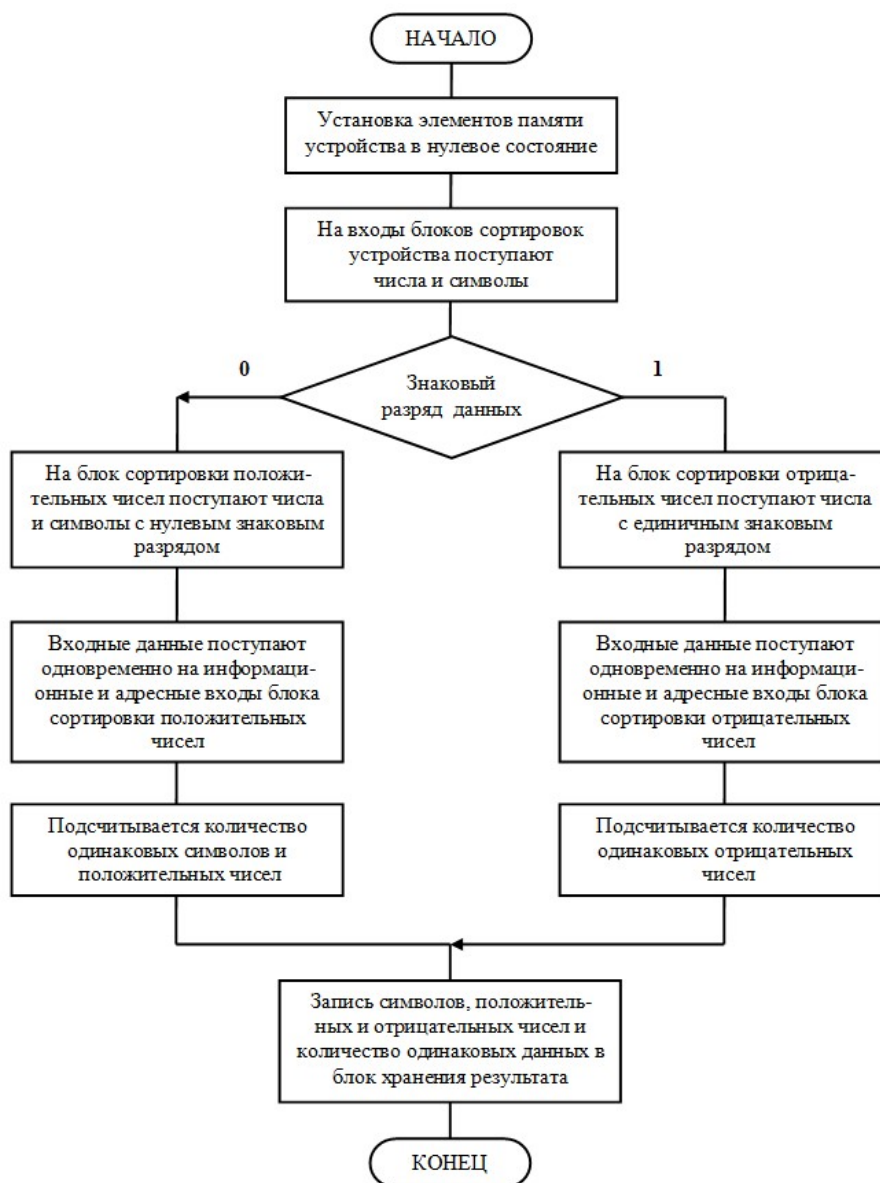


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма работы устройства упорядочения информации методом преобразования данных в адрес

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Целью эксперимента было моделирование работы арифметического вычислителя при выполнении операций суммирования, вычитания, умножения и деления в формате с фиксированной точкой в прямых кодах (табл. 2).

Если входные числа имеют разные знаки, то сравнения чисел в вычислителе не происходит, выполняется операция вычитания из первого числа второе. Если формируется заем из знакового разряда, то числа с помощью коммутатора меняются местами на входе нейронов сумматора-вычитателя. На втором такте от второго большего числа вычитается первое меньшее. Если заема не образуется, то от большего первого числа вычитается меньшее второе. Операция умножения выполняется в прямом коде умножением младшими разрядами множителя со сдвигом суммы частичных произведений влево. Операция деления выполняется по алгоритму деления чисел без восстановления остатков. Для определения следующей цифры частного, необходимо сдвинуть текущий остаток влево на один разряд, а затем алгебраически прибавить к нему модуль делителя, которому приписывается знак, противоположный знаку текущего остатка. Операция сдвигов и алгебраических сложений повторяется до тех пор, пока в частном не получится требуемое количество цифр.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проектирования вычислительной системы, специализированных модулей, систем коммутаций приведены на рис. 13–16, содержат:

1. Разработаны варианты структурно-функциональной организации вычислительной системы, специализированных вычислительных модулей и гибкой подсистемы интерфейсных каналов. Модули имеют свою систему команд и работают под управлением микропроцессора.

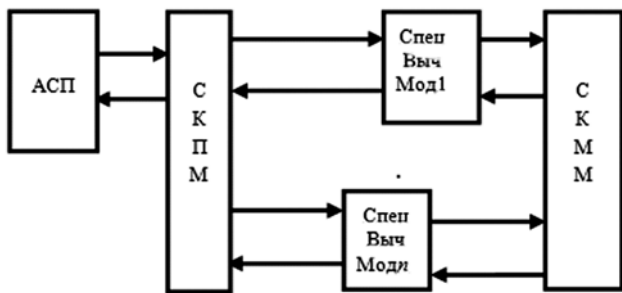


Рисунок 13 – Структурно-функциональная организация вычислительной открытой развиваемой асинхронной модульной системы

Таблица 2 – результаты выполнения арифметических операций в прямых кодах

1 число в $10^{\text{й}}$ с/с	2 число в $10^{\text{й}}$ с/с	1 число в $2^{\text{й}}$ с/с	2 число в $2^{\text{й}}$ с/с	Арифмет. операция	Результат в 2 й с/с	Результат в 10 й с/с
74	32	0.01001010	0.00100000	сложение	0.01101010	106
25	68	0.00011001	0.01000100	вычитание	1.00101011	-43
-9	14	1.1001	0.1110	умножение	1.01111110	-126
83	-24	0.1010011	1.11000	деление	1.11,0111	-3,4583

2. Разработаны варианты структурно-функциональной организации арифметико-символьного процессора, выполняющего основные арифметические операции, поисковые функции и операции замены, логические операции.

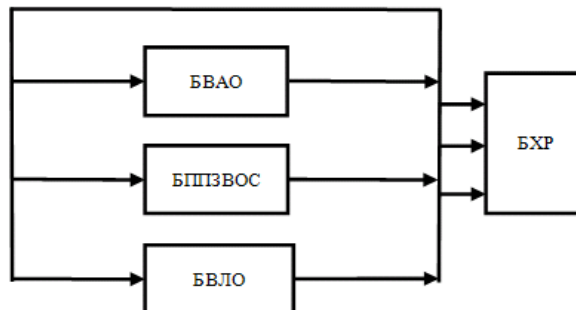


Рисунок 14 – Структурно-функциональная организация арифметико-символьного процессора

3. Разработаны варианты структурно-функциональной организации устройства сортировки информации методом дешифрации данных.

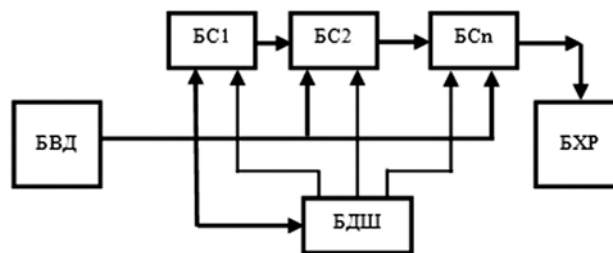


Рисунок 15 – Структурная схема устройства сортировки информации методом дешифрации данных

4. Разработана и исследована архитектура системы коммутации модуль-модуль, осуществляющая передачу информации с выходов специализированных вычислительных модулей на входы других специализированных вычислительных модулей системы в виде заданий и результатов.

ИНТЕРФЕЙСНЫЙ КАНАЛ

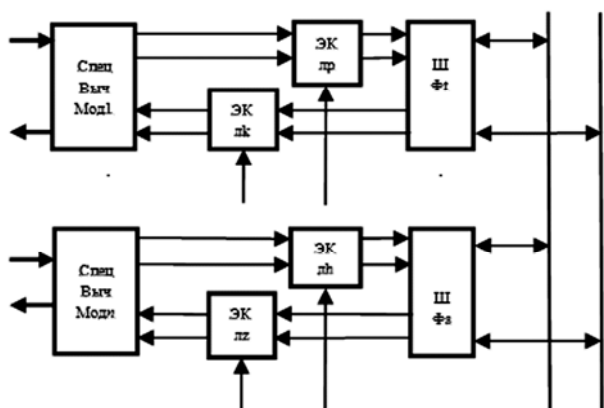


Рисунок 16 – Структурно-функциональная организация системы коммутации модуль-модуль

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Разработан алгоритм работы и структурно-функциональная организация устройства упорядочения информации методом преобразования данных в адрес [10], обеспечивающая повышение быстродействия по сравнению с методом сортировки выбором не менее чем в 1,5 раза. Сортировка выбором основана на формировании отсортированной последовательности путем присоединения к ней одного элемента за другим в правильном порядке [12]. Общее количество операций при этом методе равно $T_{\text{ОП}} = 1/2 * (2 * q + q) = 3/2 * q$. Упорядочение информации методом преобразования данных в адрес происходит без операции сравнения чисел.

Специализированное устройство системы реализует алгоритм ускоренного умножения младшими разрядами множителя вперед со сдвигом множимого влево [12]. Анализируются два разряда множителя, сдвиг осуществляется на два разряда вправо. Все цифры множителя такие, то суммирование выполняется при анализе каждой пары разрядов множителя. Максимальное время определяется как: $T_{\text{умн.мах}} = n/2 * (t_{\Sigma} + 2t_{\text{сдв}})$. Матричный умножитель вычисляет сумму поразрядных произведений двоичных чисел, которая является результатом умножения. Поразрядное произведение определяется, как логическая функция И. Разрядность произведения определяется, как сумма разрядностей сомножителей время умножения определяется как: $T_{\text{умн.мах}} = 2 * (n-1) * t_{\Sigma}$. Сравнивая максимальное время выполнения операции умножения приведенными алгоритмами можно сделать вывод, что операция умножения ускоренного умножителя двоичных чисел на нейронах не менее чем в 2 раза вычисляет результат быстрее, чем известное устройство.

Троичная позиционная несимметричная система счисления по затратам числа знаков наиболее экономична из позиционных показательных несимметричных систем счисления. Она обладает наибольшей плотностью записи информации, описывается уравнением $y = (\ln(y)) / y$. Троичные ЭВМ имеют большую

удельную емкость памяти и большую удельную производительность процессора, чем двоичные. При сложении тритов в троичных полусумматорах и в троичных сумматорах количество сложений в $\log_2 3 = 1,58$ раза меньше, чем при сложении битов в двоичных полусумматорах и в двоичных сумматорах, и, следовательно, быстродействие при сложении в 1,58.. раза (на 58 %) больше. Сумматор-вычитатель выполняет сложение и вычитание двоичных чисел по правилу выполнения арифметических операций в троичной системе счисления [9]. При выполнении арифметической операции анализируются знаковые разряды чисел и код операции. Если выполняется операция суммирования, то числа представлены в прямом коде, при выполнении вычитания в обратном коде.

ВЫВОДЫ

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что предложены микропроцессорные модули, которые могут использоваться для создания высокопроизводительных, быстродействующих вычислительных систем. Специализированные модули выполняют основные арифметические, символьные и логические операции.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что арифметические операции выполняются в прямых кодах с фиксированной и плавающей запятой, символьные операции выполняют поисковые функции и операции замены вхождений в обрабатываемых словах, выполняются логические операции на пороговых и нейроподобных элементах.

Микропроцессорные модули представляют собой цифровые специализированные устройства, которые выполняют определенную задачу в вычислительной системе. Модули представлены в виде структурной схемы устройства, структурно-функциональных схем блоков и алгоритма работы устройства.

Практическая значимость полученных результатов заключается в использовании микропроцессорных модулей в перестраиваемой вычислительной системе, что позволит повысить быстродействие выполнения арифметических операций за счет реализации конвейеризации и использование параллелизма при обработке данных, системы коммутации обеспечивают двухстороннюю информационную связь между блоками, позволяющая обеспечить распределенное децентрализованное управление ресурсами системы.

Перспективы дальнейших исследований состоят в создании вычислительной модульной системы с перестраиваемой структурой за счет системы коммутации процессор-модуль, обеспечивающая передачу информации от арифметико-символьного процессора на входы специализированных вычислительных модулей системы в виде заданий, а также система коммутаций модуль-модуль, осуществляющая передачу информации с выходов специализированных вычислительных модулей на входы других специализированных вычислительных модулей системы в виде заданий и результатов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы в ООО «НПЦ «ИнноТех» (г. Курск) для построения вычислительного кластера, где использовались созданные структурные и функциональные схемы, а также разработанные алгоритмы управления работой специализированных микропроцессоров.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Хорошевский В. Г. Архитектура вычислительных систем: учеб. пособие / В. Г. Хорошевский. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 520 с.
2. Гузик В. Ф. Реконфигурируемые вычислительные системы / В. Ф. Гузик, И. А. Каляев, И. И. Левин. – Таганрог: Изд-во Южный федеральный университет, 2016. – 472 с.
3. Пат. Российская Федерация, МПК G 06 F 15/76. Вычислительная открытая развиваемая асинхронная модульная система ВОРАМС / С. С. Шевелев; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. – № 2453910; заявл. 08.04.2009; опубл. 20.06.2012, Бюл. № 17. – 81 с.
4. Хокни Р. Параллельные ЭВМ. Архитектура, программирование и алгоритмы / Р. Хокни, К. Джессхоуп. – М.: Радио и связь, 1986. – 392 с.
5. Шевелев С. С. Вычислительная открытая развиваемая асинхронная модульная система / С. С. Шевелев // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – No. 4. – С. 86–92.
6. Пат. Российская Федерация, МПК G 11C 15/00. Способ параллельного поиска и замены строки и однородная запинающая матрица для его реализации / Е. А. Титенко, И. С. Зерин, В. С. Евсюков, К. С. Скорняков, Е. Б. Тутов; заявитель и патентообладатель Юго-Западный государственный университет. – № 2012113755; заявл. 06.04.2012; опубл. 20.10.2013, Бюл. № 29

7. Пат. Российская Федерация, МПК G06F 17/30. Устройство сортировки слов / С. С. Шевелев; заявитель и патентообладатель Курский государственный технический университет. – № 2223538; заявл. 08.04.2002; опубл. 10.02.2004, Бюл. № 4.
8. Пат. Российская Федерация, МПК G 06 F 17/50, G 06 N 7/08. Устройство для моделирования систем массового обслуживания / Е. А. Тимофеева, Н. Б. Парамонов, Ю. Н. Парамонов; заявитель и патентообладатель Е. А. Тимофеева, Н. Б. Парамонов, Ю. Н. Парамонов. – № 2447496; заявл. 24.12.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10
9. Пат. Российская Федерация, МПК G06F 7/50. Функциональная структура параллельного сумматора троичной системы счисления $f(+1,0,-1)$ в позиционно-знаковой ее реализации $f(+/-)$ / Л. П. Петренко; заявитель и патентообладатель Л. П. Петренко. – № 2008116450; заявл. 29.04.2008; опубл. 10.11.2009.
10. Пат. Российская Федерация, МПК G06F 7/08. Устройство сортировки информации / И. Н. Емельянова, В. В. Ефремов; заявитель и патентообладатель ГОУ высшего профессионального образования Курский государственный технический университет. – № 2004117660; заявл. 09.06.2004; опубл. 10.01.2006.
11. Каляев И. А. Реконфигурируемые мультимониторные вычислительные структуры / И. А. Каляев, И. И. Левин, Е. А. Семерников. – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2008. – 320 с.
12. Желтов С. А. Адаптация метода Шермана-Лемана решения задачи факторизации к вычислительной архитектуре CUDA / С. А. Желтов // Вестник РГГУ. – 2012. – № 14. – С. 84–91.
13. Кнут Д. Э. Искусство программирования, том 3. Сортировка и поиск, 2-е изд.: Пер с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 832 с.

Статья поступила в редакцию 24.11.2020.
После доработки 01.02.2021.

УДК 681.3

РЕКОНФІГУРУВАЛЬНА ОБЧИСЛЮВАЛЬНА МОДУЛЬНА СИСТЕМА

Шевельов С. С. – канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційної безпеки, Південно-Західний державний університет, Курськ, Росія.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Сучасні універсальні обчислювальні машини здатні реалізувати будь-який алгоритм, але при вирішенні певних завдань по швидкості обробки не можуть конкурувати зі спеціалізованими обчислювальними модулями. Спеціалізовані пристрої мають високу швидкість, ефективно вирішують завдання з обробки масивів, задач штучного інтелекту, використовуються у якості керуючих пристроїв. Застосування спеціалізованих мікропроцесорних модулів, які реалізують обробку рядків символів, логічних і числових значень, представлених у вигляді цілих і дійсних чисел, дозволяє підвищити швидкість виконання арифметичних операцій за рахунок використання паралелізму при обробці даних.

Мета. Розробити принципи побудови мікропроцесорних модулів для обчислювальної модульної системи з перебудовуваною структурою, арифметико-символьного процесора, спеціалізованих обчислювальних пристроїв, комутаційних систем, здатних конфігурувати мікропроцесори і спеціалізовані обчислювальні модулі у мультимониторну структуру для підвищення швидкості виконання арифметичних і логічних операцій, високошвидкісних алгоритмів проектування спеціалізованих процесорів-акселераторів символічної обробки. Розробити алгоритми, структурні і функціональні схеми спеціалізованих математичних модулів, що виконують арифметичні операції в прямих кодах на нейрорподібних елементах і систем децентралізованого управління роботи блоків.

Метод. Побудований інформаційний граф обчислювального процесу модульної системи з перебудовуваною структурою. Розроблено структурні та функціональні схеми, алгоритми, що реалізують побудову спеціалізованих модулів для виконання арифметичних і логічних операцій, пошукових операцій і функцій заміни входжень в оброблюваних словах. Розроблено програмне забезпечення моделювання роботи арифметико-символьного процесора, спеціалізованих обчислювальних модулів, систем комутацій.

Результати. Розроблено структурну схему реконфігурованою обчислювальної модульної системи, яка складається з сумісних функціональних модулів, вона здатна до статичної та динамічної реконфігурації, має паралельну структуру сполуки процесора і обчислювальних модулів за рахунок використання інтерфейсних каналів. Система складається з арифметико-символьного процесора, спеціалізованих обчислювальних модулів і систем комутацій, виконує специфічні завдання символічної обробки інформації, арифметичні і логічні операції.

Висновки. Архітектура реконфігурованих обчислювальних систем може динамічно змінюватися в процесі їх функціонування. З'являється можливість адаптації архітектури обчислювальної системи під структуру розв'язуваної задачі, створювати проблемно-орієнтовані обчислювачі, структура яких відповідає структурі розв'язуваної задачі. В якості основного обчислювального елемента в реконфігурованих обчислювальних системах використовуються не універсальні мікропроцесори, а програмовані логічні інтегральні схеми, які об'єднані за допомогою високошвидкісних інтерфейсів в єдине обчислювальне поле. Реконфігуровані мультимониторні пристрої.

вейерніе обчислювальні системи на основі полів є ефективним засобом для вирішення потокових задач обробки інформації та управління.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: інформаційний граф, паралельно-конвеєрна структура, модульна система, спеціалізовані обчислювальні блоки.

UDC 681.3

RECONFIGURABLE COMPUTING MODULAR SYSTEM

Shevelev S. S. – PhD, Associate Professor of the Department of Information Security, Southwestern State University, Kursk, Russia.

ABSTRACT

Context. Modern general purpose computers are capable of implementing any algorithm, but when solving certain problems in terms of processing speed they cannot compete with specialized computing modules. Specialized devices have high performance, effectively solve the problems of processing arrays, artificial intelligence tasks, and are used as control devices. The use of specialized microprocessor modules that implement the processing of character strings, logical and numerical values, represented as integers and real numbers, makes it possible to increase the speed of performing arithmetic operations by using parallelism in data processing.

Objective. To develop principles for constructing microprocessor modules for a modular computing system with a reconfigurable structure, an arithmetic-symbolic processor, specialized computing devices, switching systems capable of configuring microprocessors and specialized computing modules into a multi-pipeline structure to increase the speed of performing arithmetic and logical operations, high-speed design algorithms specialized processors-accelerators of symbol processing. To develop algorithms, structural and functional diagrams of specialized mathematical modules that perform arithmetic operations in direct codes on neural-like elements and systems for decentralized control of the operation of blocks.

Method. An information graph of the computational process of a modular system with a reconstructed structure has been built. Structural and functional diagrams, algorithms that implement the construction of specialized modules for performing arithmetic and logical operations, search operations and functions for replacing occurrences in processed words have been developed. Software has been developed for simulating the operation of an arithmetic-symbolic processor, specialized computing modules, and switching systems.

Results. A block diagram of a reconfigurable computing modular system has been developed, which consists of compatible functional modules, it is capable of static and dynamic reconfiguration, has a parallel structure for connecting the processor and computing modules through the use of interface channels. The system consists of an arithmetic-symbolic processor, specialized computing modules and switching systems, performs specific tasks of symbolic information processing, arithmetic and logical operations.

Conclusions. The architecture of reconfigurable computing systems can change dynamically during their operation. It becomes possible to adapt the architecture of a computing system to the structure of the problem being solved, to create problem-oriented computers, the structure of which corresponds to the structure of the problem being solved. As the main computing element in reconfigurable computing systems, not universal microprocessors are used, but programmable logic integrated circuits, which are combined using high-speed interfaces into a single computing field. Reconfigurable multipipeline computing systems based on fields are an effective tool for solving streaming information processing and control problems.

KEYWORDS: information graph, parallel pipeline structure, modular system, specialized computing units.

REFERENCES

1. Khoroshevskiy V. G. *Arkhitektura vychislitel'nykh sistem: ucheb. Posobiye.* Moscow, Izd-voMGU im. N. E. Bauman, 2008, 520 p.
2. Guzik V. F., Kalyayev I. A., Levin I. I. *Rekonfiguriruyemye vychislitel'nyye sistemy.* Taganrog, Izd-vo Yuzhnyy federal'nyy universitet, 2016, 472 p.
3. Shevelev S. S. Pat. Rossiyskaya Federatsiya, MPK G 06 F 15/76. *Vychislitel'naya otkrytaya razvivayemaya asinkhronnaya modul'naya sistema VORAMS ; zayavitel' i patentoobladatel' Yugo-Zapadnyy gosudarstvennyy universitet.* № 2453910; zayavl. 08.04.2009; opubl. 20.06.2012, Byul. № 17, 81 p.
4. Hockney R., Jesshope, K. *Parallel computers. Architecture, programming and algorithms.* Moscow, Radio and communication, 1986, 392 p.
5. Shevelev S. S. *Computational open developing asynchronous modular system, Problems of information security. Computer systems of the St. Petersburg State Polytechnic University,* 2013, No. 4, pp. 86–92.
6. Titenko E. A., Zerina I. S., Evsyukov V. S., Skorniyakov K. S., Tutov E. B. Pat. Russian Federation, IPC G 11C 15/00. *A method of parallel search and replacement of a string and a homogeneous memory matrix for its implementation /;* applicant and patent holder of the South-Western State University. No. 2012113755; application 06.04.2012; publ. 20.10.2013, Byul. no. 29
7. Shevelev S. S. Pat. Russian Federation, IPC G06F 17/30. *Word sorting device ; applicant and patentee Kursk State Technical University.* No. 2223538; declared 04/08/2002; publ. 10.02.2004, Bul. No. 4.
8. Timofeeva E. A., Paramonov N. B., Paramonov Yu. N.; applicant and patent holder E. A. Timofeeva, N. B. Paramonov, Yu. N. Paramonov Pat. Russian Federation, IPC G 06 F 17/50, G 06 N 7/08. *A device for modeling queuing systems.* No. 2447496; declared on 24.12.2010; published on 10.04.2012, Byul. No. 10
9. Petrenko L. P.; applicant and patent holder Petrenko L. P. Pat. Russian Federation, IPC G06F 7/50. *Functional structure of the parallel sum of the ternary number system $f(+1,0,-1)$ in its position-sign implementation $f(+/-) / -$* No. 2008116450; declared on 29.04.2008; published on 10.11.2009.
10. Emelianova I. N., Efremov V. V. Pat. Russian Federation, IPC G06F 7/08. *Information sorting system /;* applicant and patent holder of the Kursk State Technical University of Higher Professional Education. No. 2004117660; declared on 09.06.2004; published on 10.01.2006.
11. Kalyaev I. A., Levin I. I., Semernikov E. A. *Reconfigurable multiconveyor computational structures.* Rostov n / a, Publishing house of the SSC RAS, 2008, 320 p.
12. Zheltov S. A. *Adaptation of the Sherman-Lehman method for solving the factorization problem to the CUDA computing architecture, Vestnik RSUH,* 2012, No. 14, pp. 84–91.
13. Knut D. E. *The Art of Programming, Volume 3. Sorting and Searching,* 2nd ed. : Per from English. Moscow, Publishing house "Williams", 2001, 832 p.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

UDC 004.942:656.61.052

IDENTIFICATION OF MARINE EMERGENCY RESPONSE OF ELECTRONIC NAVIGATION OPERATOR

Nosov P. S. – PhD, Associate Professor of Navigation Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Cherniavskiy V. V. – Dr. Sc., Professor, Rector of Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Zinchenko S. M. – PhD, Senior Lecturer of Ship Handling Department, head of the laboratory of electronic simulators, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Popovych I. S. – Dr. Sc., Professor of the Department of General and Social Psychology, Kherson State University, Ukraine.

Nahrybelnyi Ya. A. – Dr. Sc., Associate Professor, Dean of the Department of Navigation at the Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Nosova H. V. – Senior Lecturer of Computer and software engineering Department, Kherson Polytechnic Special College of Odessa National Polytechnic University, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The article introduces an approach for analyzing the reactions of a marine electronic navigation operator as well as automated identification of the likelihood of the negative impact of the human factors in ergatic control systems for sea transport. To meet the target algorithms for providing information referring to the results of human-machine interaction of an operator in marine emergency response situations while managing increasing complexity of navigation operations' carrying out are put forward.

Objective. The approach delivers conversion of the operator's actions feature space into a logical-geometric one of p -adic systems making the level of the operator's intellectual activity by using automated means highly likely to be identified. It is sure to contribute to its dynamic prediction for the sake of further marine emergency situations lessening.

Method. Within the framework of the mentioned above approach attaining objective as automated identification of the segmented results of human-machine interactions a method for transforming deterministic fragments of an operator's intellectual activity in terms of p -adic structures is proposed to be used. To cope with such principles as specification, generalization as well as transitions to different perception spaces of the navigation situation by the operator are said to be formally specified. Having been carried out of simulation modeling has turned out to confirm the feasibility of the proposed above approach causing, on the grounds of temporary identifiers, the individual structure of the operator's reactions to be determined. As a result, the data obtained has delivered the possibility of having typical situations forecasted by using automated multicriteria methods and tools. This issue for its part is said to be spotted as identification of individual indicators of the operator's reaction dynamics in complex man-machine interaction.

Results. In order to have the proposed formal-algorithmic approach approved an experiment was performed using the navigation simulator Navi Trainer 5000 (NTPRO 5000). Automated analysis of experimental server and video data have furnished the means of deterministic operator actions identification in the form of metadata of the trajectory of his reactions within the space of p -adic structures. Thus, the results of modeling involving automated neural networks are sure to facilitate the time series of the intellectual activity of the electronic marine navigation operator to be identified and, therefore, to predict further reactions with a high degree of reliability.

Conclusions. The proposed formal research approaches combined with the developed automated means as well as algorithmic and methodological suggestions brought closer to the objectives for solving the problem of automated identification of the negative impact of the human factors of the electronic navigation operator on a whole new level. The efficiency of the proposed approach is noticed to have been approved by the results of automated processing of experimental data and built forecasts.

KEYWORDS: reaction identification systems, automated data processing systems, simulation of operator reactions, computer navigation simulators, analysis of the human factor, automated control systems.

ABBREVIATIONS

ECDIS is the Electronic Chart Display and Information System;
 ARPA is an Automatic Radar Plotting Aid;
 AIS is the Automatic Identification System;
 GPS is the Global Positioning System;
 NTPRO 5000 is the navigation simulator “Navi Trainer 5000”;
 UTC is the Universal Time Coordinated;
 ETA is the Estimated Time of Arrival;
 MAICS is a module for automated identification of critical situations.

NOMENCLATURE

$\tilde{\psi}$ is a navigation signal;
 r_1 is a dimension of an l -dimensional vector;
 ψ is a signal parameters;
 k is a correlation functions;
 A is the “Subjective” identification system;
 B is the “Ideal” identification system;
 \mathbf{X}_1 is the difference between “ideal” and “subjective” navigation signal identification system
 $\Delta\psi$ is a stochastic uncertainty of the identification process;
 β_e is an emotionally reactive activity of the operator;
 σ_i, η_i is an alternatives to reactions;
 x_i is a points of space of perception;
 k is a correlation functions;
 Q is the effectiveness of decision making by the operator
 $X_{(p=2)}$ is a perception space with $p = 2$;
 $Y_{(p=3)}$ is a perception space with $p = 3$;
 $Z_{(p=4)}$ is a perception space with $p = 4$;
 A, V is an operator skill levels;
 R, R^{-1} is a strategies of operators U, V ;
 f is a payoff function;
 S_a is a set alternatives;
 j is an accompanied emotion;
 μ^+ is a normalization factor;
 U, L is a positive and negative decision-making strategy;
 ε^+ is an emotion level;
 \tilde{x}^S is a random strategy;
 y is an uncertainty factor;
 Z_p is a set of nodal points x ;
 x_0 is an initial situation of the cycle γ ;
 $U(\tau)$ is a graph vertices;
 $\{a\}, \{b\}$ is a threshold values of perception;
 Gv is a directions of transition to systems of perception on the basis of p -adicity;
 P is the probability of a transition to systems of perception with respect to p -adicity;
 a, b is a detailing and generalization;

ρ_p the distance between the situations-nodes of the p -adicity system graph;
 H_π is a subjective operator entropy;
 N is a number of reaction alternatives;
 π is a performance index of alternatives;
 ζ_i is a density of situation identification;
 Δ_i is a response time range.

INTRODUCTION

The cause analysis of catastrophic situations in maritime transport is definitely to uncover the problems associated with the accuracy of identification of navigation situations by operators with increasing frequency [1–2]. In most cases, deficiency of data and metadata for effective decision-making associated with the critical situation occurrence during navigation is to be mentioned as being first-ranked one [3–4]. It goes without saying that the decisive factor settling it is highly likely to be the skill level of the operators. Taking into consideration the fact of most maneuvers and tasks being typical in navigation the skipper gets used to identifying the current situation relatively to several, the most significant, universal criteria. Due to the fact that the navigation situation at each moment of time is said to be having a set of incoming information signals (visual observation; sound commands (walkie-talkie); radar; ECDIS; ARPA; AIS; GPS, etc.), the operator gets used to reacting to these signals by classifying them according to their skill level and experience.

Thus, a process with two systems functioning simultaneously for the sake of identifying the navigation situation: “subjective”, depending on the level of the operator, and “ideal”, accommodating all significant information signals, is eventuating.

The formal description of the process is believed to be that the navigation signal $\tilde{\psi}$ in the form of an l -dimensional vector of dimension r_1 with regard to the parameters ψ and the correlation function k is about to have the following form:

$$\tilde{\psi}(k) = \psi(k) + \Delta\psi(k) = \psi(k) + B_1(k)\mathbf{X}_1(k).$$

Meanwhile, the vector \mathbf{X}_1 is to be characterised as the difference between the “ideal” and “subjective” navigation signal identification system in the following form:

$$\mathbf{X}_1(k) = A_1[\mathbf{X}_1(k-1), k] + W_1(k),$$

$$B_1 = [l \times r_1], \Delta\psi = B_1 X_1.$$

Consequently, the efficiency of decision-making by operator Q can be reflected as:

$$Q(k) = F[\Delta\psi(k), k] + n(k).$$

In this formal description the vector $\Delta\psi$ is noticed to be a random one being able to represent the stochastic uncertainty of the given process. However, the formulation of the question needs to be taken into account with a high degree of accuracy attempting to determine the distortion when identifying the situation by the operator. This issue is to be coped with to construct predictive models driving to the accident and disaster risks lessening. At the same time, the analysis of statistical data fails in being able to define $\Delta\psi$ as well as the questionnaires of experienced sea captains [5].

All these items are certain to highlight the objective problem of constructing mathematical, simulation models as well as automated systems for having "subjective" navigation situations analysed with a view to preventing dangerous cognitive biases as a negative human factor manifestation.

Hence, the **object of research** is said to be human-machine interaction in information systems of maritime navigation.

The **subject of the research** is supposed to be models and algorithms for automated analysis and identification of operator reactions occurring in critical situations.

The **purpose of the study** is defined as implementing formal and algorithmic approaches to transform data of the intellectual activity of an electronic navigation operator with an aim to identify and predict his reactions in tight situations.

The purpose of the article is chosen to be the applying special purpose solution method embracing the following problems:

1. To analyze the existing approaches with an eye toward determining the principles of formal description of the operator's emotional-reactive activity β_ε in the space of alternatives σ_i .

2. To propose the principle of data transformation of individual operator's reactions in the process of decision-makings based on p -adic systems in the form of points-situations $f_s(x) = x^s$ on a geometrically defined space of perception.

3. To introduce attribute perception spaces of the navigation situation by operators $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$ and $Z_{(p=4)}$ within the framework of p -adicity to sketch the level of reactions and time fragments of their operation on the grounds of the analysis of server data.

4. To carry out the experiment using the navigation simulator Transas navigation simulator NTPRO 5000 targeting to establish terminal data of the operators reactions during typical navigation operations.

5. To analyse the time series of operator reactions using automated neural networks setting the focus to getting the proposed approach validated. Over and above, to train the most effective neural networks, to deal with ahead of the operator's reactions for 5 cycles as well as to determine the stability of the forecast data over time.

The obtained predictive models based on neural networks as well as the cyclic correction of the models built on subsequent experiments are supposed to be on the point of having a whole class of operators' reactions in the main navigation situations identified. The foretold options are definitely to provide fair contribution into enhancement of sea transportation safety.

1 PROBLEM STATEMENT

Consider the evolution of the perception of the situation depending on the levels of operators A and V within the framework of game theory [6]. To begin with, let us assume an existing set of navigation situations requiring the operator to make decisions based on individual strategies in the system being finite: $\Gamma = \langle A, V, X, R, f \rangle$. In this case, the set of decision making X should be taken as being the same for each of the operators counting on the ship's control capabilities, location, weather conditions and traffic intensity. On the premises of $A \times V \rightarrow X$ we are able to come to the conclusion that the values of strategies R and R^{-1} are noticed to be normalized having a general framework of gain (efficiency) of the type $R \cap R^{-1}$. Nevertheless, this issue does not seem to be fitted to the criteria for the evolution of the subject's consciousness [7] and, therefore, has to be mentioned as inappropriate in being used in work.

Consecutively, the approaches based on the theory of subjective entropy [8] and the theory of preferences [9] are likely to be treated as challenging tasks being consistent to our study. Then, the formal description of these processes is depicted to be founded on the preference of functions $\pi(\sigma_i)$, $\sum_{i=1}^N \pi(\sigma_i) = 1$. In addition, within the framework of this theory interrelated values are certain to be described: $A(\sigma_i) \rightarrow A_{ij}$ is a positive decision-making strategy and $L(\sigma_i) \rightarrow L_{ij}$ is considered as a negative one. This theory is up to succeed in dealing with analyzing the impact of the human factor in aviation. Nevertheless, the formal apparatus is noticed to be incapable of implying levels of discretization welcoming a qualitative change in the structure of the perception of the situation. To a greater extent, the theory is doomed to gear forward determining the situational emotion by the subject as a whole based on the positive effect of decision-making:

$$\varepsilon^+(\eta_{jt}^+ | \sigma_{it-1}) = \mu^+ \frac{\varepsilon^+(\eta_{jt-1}^+) \cdot U_{jt-1} \cdot e^{\beta_\varepsilon U_{jt-1}}}{\sum_{q=1}^M \varepsilon^+(\eta_{qt-1}^+) \cdot U_{qt-1} \cdot e^{\beta_\varepsilon U_{qt-1}}}$$

It should be mentioned that a formal description is said to be involving the use of a parameter of the emotion β_ε accompanying the decision taking. However, in this study there is surely an evitable necessity to be faced in

expanding this concept into the form of a discrete, class-forming quantity leveraging the effects of the operator's decision-making process qualitatively.

2 LITERATURE REVIEW

In [10] the problem of automating the construction of models of quantitative dependencies by precedents was managed to have been solved. To settle it a tree-like cluster-regression approximation method was proposed to be used trenching in the construction of a hierarchical clustering tree of instances. This approach needs to be drawing attention to as being considered as a worthwhile one by the hierarchical manner in which the cluster areas are presented. Subsequently, this item delivers a great possibility to have them classified as separate elements (nodes) of the tree. One more proposed method worth speaking about is neural networks usage heading for constructing a cluster-regression model.

Furthermore, in the theory of operations research [11] in situations with inhomogeneous strategies set splitting into families of non-empty subsets that form subclasses of strategies happens to have been effectively described. The criterion for this partition is named as the evaluation of the effectiveness of the random strategy \tilde{x}^S : $\inf_{y \in N} F(\tilde{x}^S, y)$. In this way, the subsets are to be treated as parts of the universal set despite their being the formed subclasses of strategies. However, we are striving to pursue the goal of finding an evolutionary formal principle to describe a qualitative transition to another level of perception of the navigation situation.

The theory of p -adic numbers rooting out from the theory of numbers is grounded on the principle of partitioning of sets superior to Archimedes' axiom [12] being highly likely close enough for possible application. Besides, the foretold above approaches considered in the theory are said to be mostly about the construction and formal description of tree-like class-forming structures leading to the process of approximating the mental functions of the subject in the form of a fundamentally new structural composition [13, 14].

Analysis of the literature has definitely revealed the dominating tendency to have been having a search for processes similar to our research in related areas of knowledge for a long time. [15–18]. It is quite vividly seen the problem presented in the study has necessitated an enhancement in the approach on the grounds of p -adic systems with a target to formally describe the qualitative transient processes of situation identification for its subsequent automation to be reached.

Approximating the approach of p -adic systems [19] to the objectives of the study the existence of an objective information space of situations identified and classified by the operator within the framework of the subject area regarding decision-making processes might be hypothesized. Let us suppose that the subject area is to be the navigation problem [20, 21] and the space of situations is to be treated as a finite set Z_p of nodal points x on a graph with a tree-like hierarchical structure. Consequently, the

evolutionary dynamics of identification on a graph node will be the following: $f: Z_p \rightarrow Z_p, x \rightarrow f(x)$, as for the node points on the graph it would be true to express the dependency as the following: $x_n = f^n(x_0)$, $\gamma = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$.

Taking into account the nature of the perception of objective reality, the operator tends to be generalizing the identified points-situations with concurrent reducing the range of input information parameters to an image close to the image from his own experience.

Thus, the identified point-situation is noticed to contain a lot of close associations – parameters:

$\lim_{n \rightarrow \infty} y_n = x_0 = \{y \in Z_p : y_n \rightarrow x_0\}$. Therewith, each subsequent point turns out to be generated by the function $f_s(x) = x^s, s = 2, 3, \dots, n$ and, therefore, it is sure to be acquiring the previous experience of the operator with regard to the class of the situation according to the principle of perception evolution.

It must be noted that its p -adicity is changing being conditioned by the level of the operator.

Thence, for example, it is true to say that for cadets-trainees $p = 2$. Therefore, cadets tend to react to the parameters of the situation by means of coding in the form: “yes” – “no”; “exists” – “does not exist”; “significant” – “not significant”, etc. In its turn, for the third and second mates it is sure enough to have it as $p = 3$ in the form: “weak” – “medium” – “strong”; “ignore” – “keep in mind” – “react”; “do not include into account” – “fall-back” – “main option”, etc. Considering the p -adicity of the chief mates and the captains themselves it certainly expands significantly highly likely to have $p = 4, 5, 6$, etc.

There from, the raised question worth speaking about is: how can the evolution of decision-making during the transitions from the lowest p -adicity to the highest for operators of electronic marine navigation be identified and demonstrated?

3 MATERIALS AND METHODS

It goes without saying that there is the classification – coding inheritance to be observed, i.e. the operator, passing, for example, from $p = 2$ to $p = 3$, appears to add a linguistic variable to the already adopted system for identifying incoming information signals. This process should be processed as a completely natural one owing to the fact that knowledge is being expanded consistently not having psyche drastically changed during life-being.

Taking into consideration this very issue, the quite logical conclusion to be drawn is that in the system $p = 2$: “yes” – “no” with a high degree of probability for $p = 3$ the items tend to appear as: “yes” – “I do not know” – “no”, etc.

Thus, the task to be spoken about is to determine the trajectories of the individual development of the perception of situations by operators of electronic maritime navigation during the transition to $p = n + 1$.

In addition, there is certainly a need in paying regard to the fact that the p -adicity of operators according to the full range of navigation situations is biased to be evolving equitably since being dependable not so much on qualifications as on the frequency of occurrence of typical situations. Thereupon, in some cases, the situation, due to its simplicity, is noticed to be less likely to require high p -adicity despite the experience of the captain. This issue becomes obvious enough resting on the principle of preserving emotional energy and strength. Consequently, the map of mental states relative to the spectrum of navigation situations seems to be heterogeneous getting different p -adicity.

On this subject it causes the dependence in the construction of a tree-like hierarchical structure to be existing: an increase in p -adicity gives rise to an increase in detail and, in its turn, a decrease contributes to generalization. Based on the formal theory of creativity and the theory of systems development [22] conclusion is about to be made that it is sure to occur within the set of internal nodes of the graph $U(\tau)$, between the threshold values $\{a\}$ and $\{b\}$. This item is supposed to generate the possibility to move to the nearest systems of p -adicity upward and downward being conditioned by the situation $U(\tau) = \left[\bigcap_{j=1, \dots, n} Gv^\uparrow(\tau|a_j) \right]$.

In this case, the transition process appears to be symmetric regardless of the direction:

$$Gv^\downarrow(\tau|b) = Gv^\uparrow(\tau|a) \Rightarrow \langle \tau, P \rangle_W$$

$$\text{at } Gv^\uparrow(\tau|a_i) \cap Gv^\uparrow(\tau|b_j) = \emptyset.$$

Based on the proposed dependencies we are on the point of summing up of having a certain kind of balance of p -adicities for which it is considered to be equally true:

$$\forall x \in [Gv(\tau)] \Rightarrow \exists a \in \{a\}, \\ x \in [Gv^\uparrow(\tau|a)] \& \exists b \in \{b\}, x \in [Gv^\downarrow(\tau|b)].$$

Thus, the observed balance of transition in p -adic structures can definitely be contingent upon both factors: the level of complexity of the navigation situation (necessity) and the skill level of the operator (possibility):

$$Gv(\tau) = \cup_{a \in \{a\}} Gv^\uparrow(\tau|a) = \cup_{b \in \{b\}} Gv^\downarrow(\tau|b).$$

Being aware of spoken above approaches and formal descriptions a method containing the following sequence of actions is assumed to be used:

1. To add, setting on the accepted theory of p -adic systems a metric is possible to be defined in the following way: $\rho_p(x, y) = |x - y|_p, x \rightarrow |x|_p$ [23]. Simultaneously, the assumption is sure to be proposed that p -adicity is to be nothing but a perception criterion delivering the oppor-

tunity to evaluate the navigation situation at a qualitatively new level as well as to make management decisions. It should be highlighted that the last one happens to be of great benefit at the time of making decisions being in conditions of a navigational hazard identified as a critical situation. So, the complexity of the situation requires the operator to be having an appropriate and meaningful level of perception possible to be expressed by spaces $(X, \rho) \& (Y, \rho')$. For example, decision making in binary logic ($p = 2$) is seen to be the most consistent with monosyllabic tasks driving to switching on or off with respect to a given indicator of the operator. In its turn, ($p = 3$) is noticed to be adding a linguistic variable according to the

principle: $\rho'(j(x_{1_{p=2}}, j|x_{2_{p=2}})) = \rho(x_{1_{p=3}}, x_{2_{p=3}})$ directing it to a higher level. This is likely to come up to the sense that problems being able to be solved in space Y cannot be settled in space X . Thus, metric spaces determined by the adicity level might be represented in the form of graphs. So, to confirm the hypothesis of the study, let us consider the levels of perception of a critical navigation situation within the framework of $p = 2, p = 3, p = 4$ – adicity on the example having representation of the problem of crossing the separation lines in the Singapore Strait (Fig. 1). In the figure, using the module for predicting the time trajectories of ships in the TRANSAS Navi Trainer 5000 system, two groups I and II are capable of being clearly distinguished. It has to be beared in mind that they are supposed to be different from each other only according to the decision-making experience. Alongside with it, the group I is following a parallel course relative to the separation lines but group II deviated from group I by $31^\circ - 33^\circ$. Therefore, the conclusion might be drawn that the decision-making of the group of vessels I and II is supposed to have been bounded up by different sets of information signals. This means that groups I and II were likely to assess navigation situation in a different system of p -adicity shaping spaces X and Y as the following: $X \subseteq Y | X \setminus Y = \emptyset$.

So, targeting to compare two systems of perception let us build a graph describing the isometric essence of the spaces X and Y (Fig. 2).

When considering the graphs X and Y eventual conclusion being able to be made is that, for example, identification of the navigation situation No. 25 in space $X_{(p=2)}$ can be probably done with the help of going through 5 steps. Besides, there is a need to define the values of 5 parameters, respectively, in binary coding. Nevertheless, as for identifying the same situation in space $Y_{(p=3)}$ three steps are definitely to be required with a ternary coding system. However, it should be taken into account that the lower the p -adicity is more brutal the decision-making results are about to be. Wherefore, two approaches are supposed to be compared when laying the route of the vessel's movement (Fig. 3).

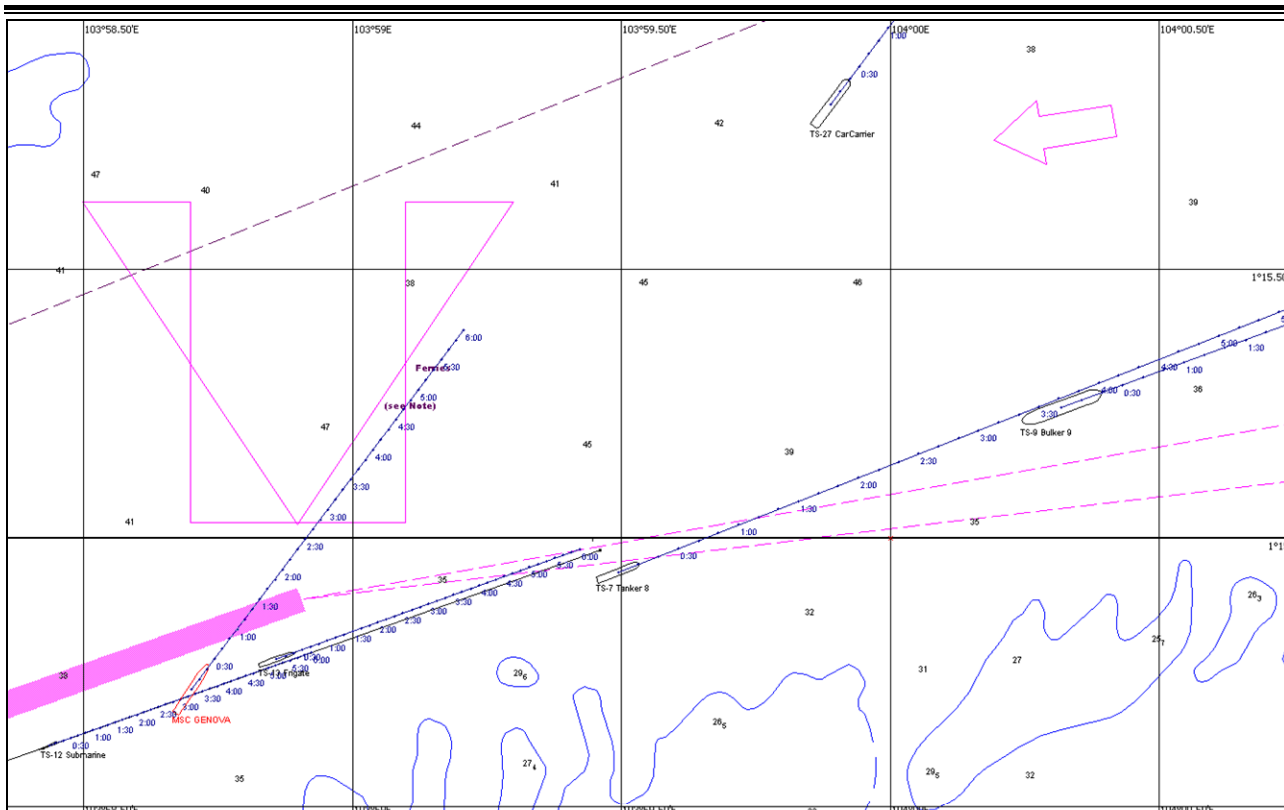


Figure 1 – The beginning of the maneuver of crossing the lines of separation in the Singapore Strait

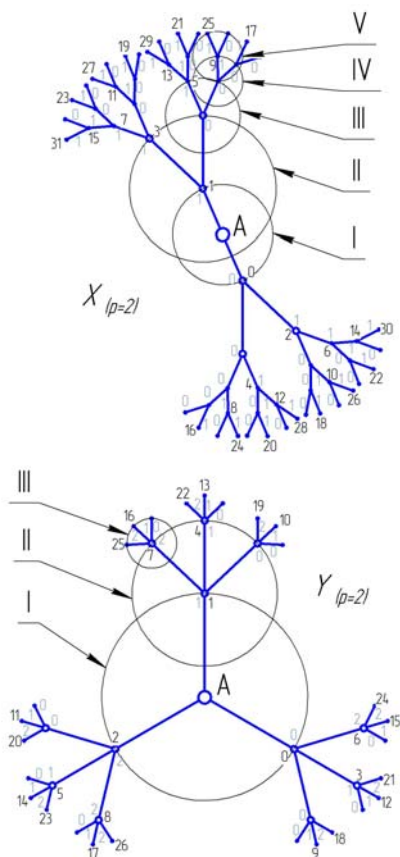


Figure 2 – Spaces of identification of the navigation situation X and Y

As can be clearly seen from Figure 3, in case a, the operator gets used to making a decision in space $X_{(p=2)}$ with no regard to the parameter (the value of the safe depth) acting mostly according to the principle: the water surface can be treated as “yes” or “no”. For its part, the operator making decisions in space $Y_{(p=3)}$ is noticed to have a different classification of the water surface: “shallow water”, “safe depth”, “open sea / ocean”. Nonetheless, $Y_{(p=3)}$ is already characterized by values in meters of depth and knowledge of the ship’s draft to determine the boundaries of each linguistic variable. The most dangerous option of the given example does not only concern the fact that there is the operator’s tendency to make decisions within the framework of the space $X_{(p=2)}$ but the most challenging aspect which is to be faced is that this space is sure to be considered unsuitable for this task carrying out. Despite this, in the course of empirical analysis it was noticed that 32% of operators happened to have made a decision in the framework of $X_{(p=2)}$ even in situations with modeling being about the space $Z_{(p=4)}$. It all boils down to embracing the fact that operators are mostly about keeping to simplification of identification forms that causes an increase in the probability of critical situations in maritime transport. This process is highly likely to be described formally using the term “subjective

$$\text{entropy}” H_{\pi}: H_{\pi} = - \sum_{i=1}^N \pi(\sigma_i) \cdot \ln \pi(\sigma_i).$$

Thus, it is vividly seen that the operator is sometimes involved into choosing an ineffective alternative $\pi^-(\sigma_i)$ intentionally because of either lacking of confidence in his abilities or of embarking to the habitual experience [24]:

$$\pi^-(\sigma_i) = \left(e^{-\beta L(\sigma_i)} / \sum_{j=1}^N e^{-\beta L(\sigma_j)} \right).$$

Therewith, the first case appears to be typical for novice operators, who, due to their having poor qualifications, are biased to avoid difficulties. Nevertheless, over time they are to go-getting to a higher level of perception. The second case is regarded as typical one for experienced seafarers who are likely to be accustomed to get their work carried out in an established regime. Therefore, this very issue is considered to be the most dangerous one owing to their having less inclination to deviate from habitual behavior pattern strategies. Based on this, the density of the situation identification ζ_i directly depends on

the p -adicity: $\zeta_{2...n} = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{n} \right)$. The more accurate

and multi-parameter solution an operator needs to be making the higher the p -adicity is to appear. However, it is worth bearing in mind that the mentioned above balance of issues is able to be adjustable from situation to situation. The sequence of decisions made by the operator at a certain discrete moment in time has to be relied on very p -adicity at each stage. It could be regarded as problematic as, on the one hand, is on the point of driving to the desired result but on the other hand, of the strength and emotional energy keeping.

Thus, it is obvious enough that the operator is inclined to initially plan p -adicity transitions to the foreseeable distance of the chain of consecutive actions. For each part, as studies are sure to have shown, characteristics corresponding to mental states and directions of anticipation are typical ones [25, 26].



a



b

Figure 3 – Navigation system of electronic cartography

4 EXPERIMENTS

Based on the foregoing, let us conduct simulation modeling of operator's decision-making during a critical navigation situation using a three-dimensional model of the graphs of the spaces $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$ and $Z_{(p=4)}$. As depicted in Figure 4 the spatial model is about to assume the combination of three space-planes in the form of graphs to display the intellectual activity of the operator in the form of trajectories of dimension in accordance with the selected p -adicity.

Let us build the trajectory of the operator of electronic navigation intellectual activity at the time of performing complex maneuvers. Identification of operators' attention [27], automated analysis of electronic logbooks as well as psychological techniques [28] provided fair ground to determine time series and trajectories of their reactions (Fig. 5).

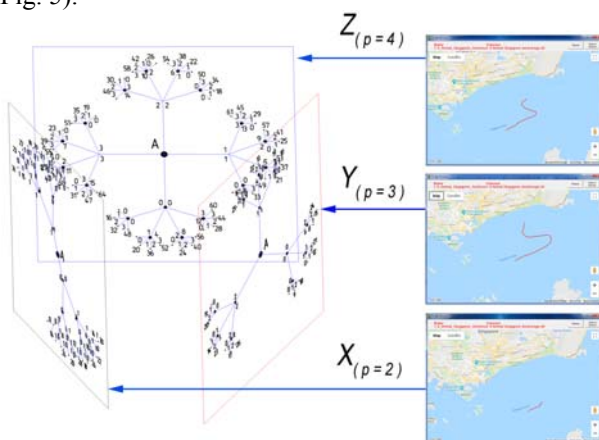
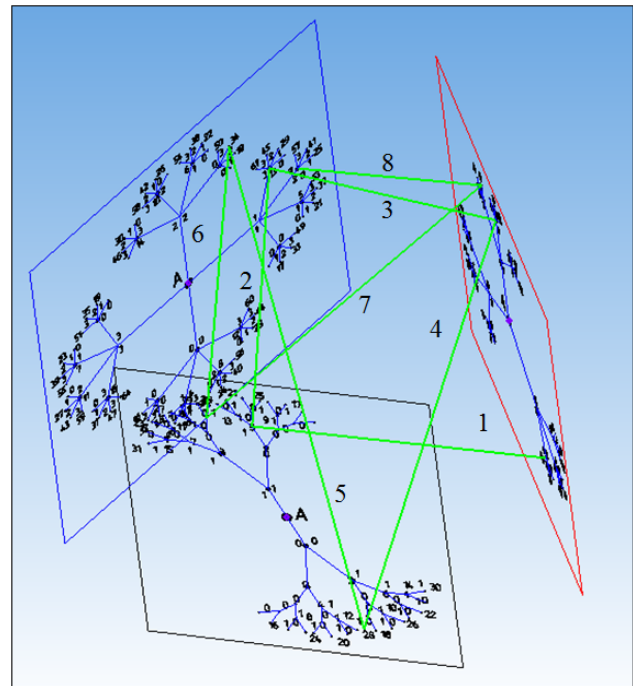


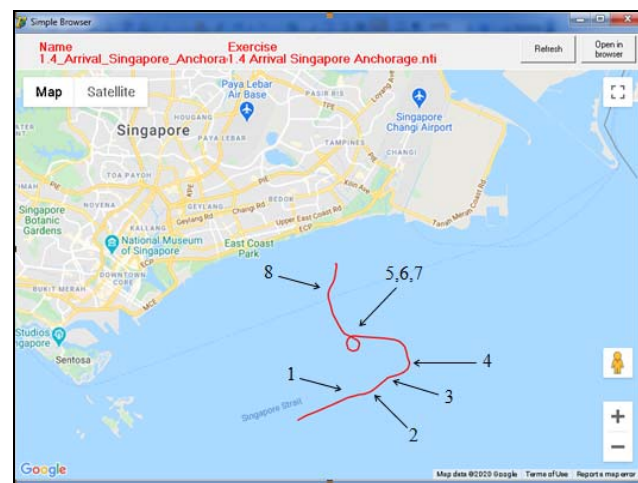
Figure 4 – Spatial model of the operator's intellectual activity

The foundation of the time series creation happened to be the results of an experiment with the help of operators' attention recorders which contributed to the identification of the time intervals between the spaces $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$ and $Z_{(p=4)}$. The time measuring for the transition from one system of perception of the situation to another one facilitated assessing to what extent the operator is confident in the logic of his actions. Besides, depending on specific sources of navigation information the operator gets used to paying attention to the approximation of these data in the form of objects of a particular p -adic space became possible to be done. So, for example, let us consider a fragment of the sequence of the operator's actions at the stage of assessing the situation when approaching the port. It is likely to include the following: analysis of ECDIC data ($Y^{t1}_{(p=3)}$); visual observation, one target ($X^{t2}_{(p=2)}$); ECDIC data analysis ($Y^{t3}_{(p=3)}$); visual observation, many targets, instrument readings ($Z^{t4}_{(p=4)}$). Analysis of the experimental data welcomed the opportunity to have the moments of time on the route of the maneuver with the transition from one space of perception to another one determined. Besides, having

analyzed the typical trajectories of maneuvers in the same navigational and weather conditions, the chains of events forming the perception of the situation in the time frame appeared to have been singled out (Fig. 5 a, b).



a transitions between spaces of perception



b transition points on the chart

Figure 5 – Chains of events on the trajectory of the ship's maneuver

Analysis of trajectories, as well as the time spent on transitions, forwarded to determine the stages of this or that space of perception of the navigation situation being used by an operator.

Above and beyond, the involvement of experienced sea captains as experts bestowed us to deal with thorough determination of the spots of the ship's trajectory where the space $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$ or $Z_{(p=4)}$ are regarded to be appropriate.

However, this fact can not be treated as enough to predict likely critical situations for each operator. Experiments have revealed the fact of each operator having his own plan of expected actions and his own sequence of transitions to the spaces of perception necessary for the situation to be identified. This is leaving a lasting imprint on the situation of both uncertainty and complexity in building predictive models. Consequently, expert judgment and accepted reference reaction models recommended by experts are unable to bring a solution to the problem requiring a fundamentally different approach to be pursued.

Taking into consideration these circumstances, an individually oriented one is highly likely to be proposed for both analyzing and predicting the reactions of a single operator purposes using time intervals or time codes of reactions. This is a very important issue definitely proving the hypothesis and research objectives.

It should be noted that the time ranges of transitions between spaces are said to have been taken as atomic elements for building a model of operator reactions. Data is regarded to have been collected within the 8 months period. It concerned the question of typical maneuvers carrying out happening in various locations from 76 operators by means of the certified navigation simulator NTPRO 5000. The collected data from the ECDIS server made the great opportunity to fragment and decompose the transition trajectories for each operator to be delivered. Thus, individual reaction models for three typical situations-maneuvers are considered as follows: turn of the ship by 90°, mooring and anchoring. Being aware of the difficulty of anchoring operation in confined waters and harsh density of traffic in Singapore the study was chosen to be focusing on this maneuver. Automated analysis of data in the form of log-files of maneuvers performed by dozens of operators contributed to getting micro-frame situations of interconnected navigation parameters identified causing a specific operator's action to be exactly determined (Fig. 6).

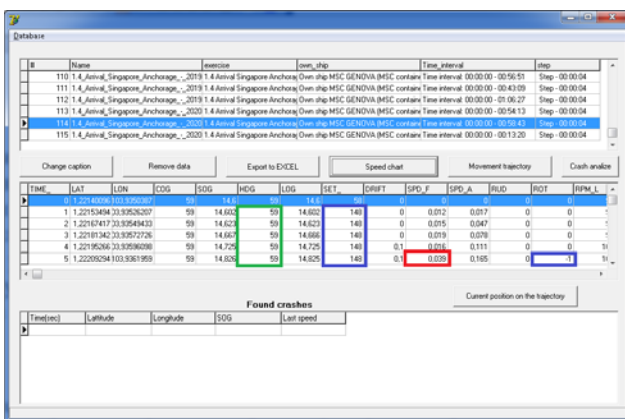


Figure 6 – Micro frame-situation identified as a maneuver – turn of the ship

The graph is being built in accordance with the preferences for the perception of the situation. These preferences are different for each operator. So, for instance, for one operator, the first place is occupied by an information

signal in the form of visual observation of target vessels and navigational obstacles meaning that his tree begins its functioning from visual perception in a certain p -adicity system. For another operator, the graph is able to start its construction with an auditory one, for example, a request to coastal services by radio, etc.

Hence, a certain even the same type of action might be preceded by an unlike perception of the situation at a particular stage. According to the carried out analysis of experimental data the operators get used to applying the most accepted elements of perception at the very beginning of the maneuver. Simultaneously, it was further noted that the speed of assessing the situation differs being conditioned by the nature of perception. Consequently, the time ranges of each action aimed at assessing perception are somewhere near with regard to each individual operator enabling it to act as a kind of time code of the action.

5 RESULTS

Thus, in this way, there is obviously a need both for the construction of a scheme of individual perception of the navigation situation corresponding to the time range and the position on the graph tree. Trying to disguise the navigation situation perception we will be on the point of taking a lot of atomic actions while having the operation performed [29] during the conducting an experiment by means of the TRANSAS Navigational simulator NTPRO 5000. On the grounds of this, the defragmentation of the ship's anchoring operation was managed to be done in the form of a life cycle taking into account the full range of information signals and human-machine interaction. While having the experiment the 18 th team of navigational operators was noticed to be showing the following time ranges during the assessment of the navigation situation (Fig. 7).

In addition, the analysis of the video series and the data of the psychological questionnaire provoked the dominant alternatives being identified for each operator. Thereby, the experimental data required for modeling the trajectory of decision-making by the operator and, accordingly, individual classifications amalgamated with the time series succeeded in being obtained. Consequently, it has driven into the possibility of applying approaches based on automated neural networks in attempt to identify transitions between spaces of perception [30].

The basic approach is considered to be as follows:

1. The classification data and time intervals at each stage of decision-making relating to a specific subtask (anchoring) is about to concede to correlating the simulation results to the entrenched algorithms of the reactions of a particular operator.
2. Comparative analysis of the operator's actions with respect to the formed deterministic model of his reactions makes the prediction of the events likely to occur in real time while a maneuver carrying out.
3. Automated analysis enabled the boundaries of transitions to other spaces of perception, an increase in time at stages, during transitions to the upper spaces of percep-

tion, and, accordingly, its decrease, during transitions to lower ones to be defined.

4. According to the carried out experiment, in typical (standard) situations, there is a distinct possibility of the time being distorted with regard to the complexity of the locations. Nevertheless, the reaction algorithm itself is practically deemed to be unchanged.

5. While having unforeseen actions of the operator the module of automated identification of critical situations (MAIKS) has let out the formation of an unpredictable branch of his reactions-actions in 4 situations. Having been shown by means of experiment, this phenomenon

was preceded by a long time pause exceeding the threshold by 3–5 times.

6. While facing such a phenomenon MAIKS is about to begin comparing the trajectories from the base containing the operator's reactions data with the newly formed branch of reactions-actions ones. If MAIKS encounters every chance of trajectories being compatible with this task the alarm tends not to be functioning. On the contrary, in the opposite situation, a signal is bound to be sent to the captain to have the navigational watch harden. Hence, this approach is totally described by p -adicity models.

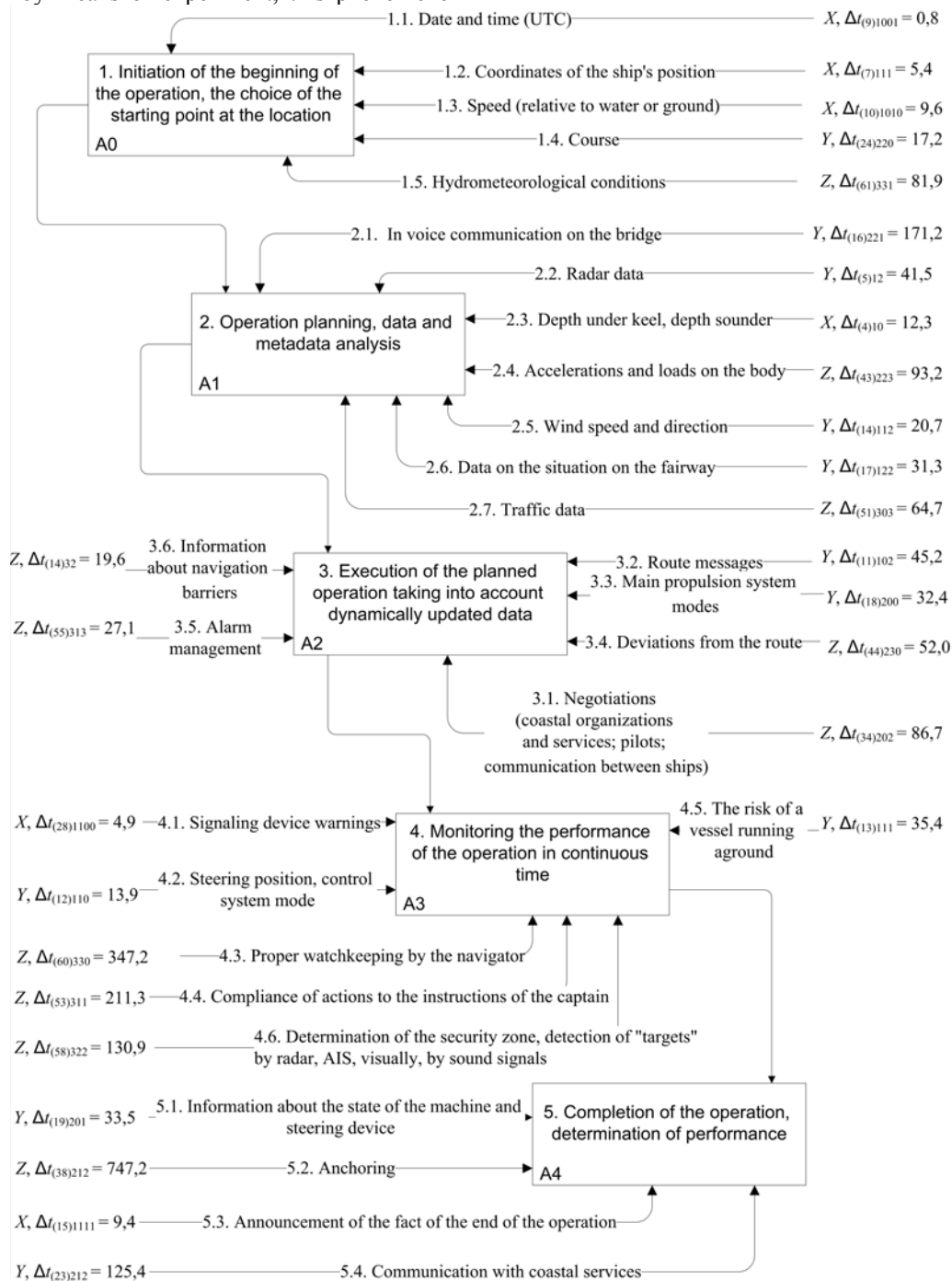


Figure 7 – Analysis of the operation in relation to $X_{(p=2)}$, $Y_{(p=3)}$ and $Z_{(p=4)}$ time.

The obtained experimental data came out with the possibility of detecting points on the graph in the form of the beginning of critical situations. For that reason in all probability an essential and final stage of the study is to be presented in the form of the construction of sensitive predictive models to identify the onset of critical situations going on in real time. It must be highlighted that setting up on the specifics and nature of the research data the most promising summing up to be made is that the most obvious and possible to be measured parameter is certainly the indicator of time in intervals related to specific stages and relative to a single operator.

It is worth speaking about being important to distinguish the time interval associated with the transition to a new space of perception from the time interval. This marker doubtlessly gave the high sign of indicating a change in the strategy of reactions, the so-called “break in the decision-making trajectory” where the immediate change in the action plan occurs. Trying to cope with it data was proposed to be collected for implementing analysis by means of automated neural networks in the form of time series (Table 1).

Notwithstanding, it was not aptitude found to either increase or decrease in the extrema of the graph being an indicator of an already formed model of reactions regarding the carrying out of anchoring the vessel operation. Insignificant fluctuations presumably witnessed the fact of possible navigation situation in different seaports being able to differ. Simultaneously, it is not inclined to entirely affect the operator’s reactions. The cycle of periodicity in the graph seems to consist of 28 measurements for each

action. Each action contains its own time progress indicator. The obtained information about the experimental data gives us consent to go on to be dealing with the construction of a neural network regression model for performing an automated forecast of a time series for a further period. Having had training, seven most effective models are regarded to have been automatically obtained (Fig. 9). Further, we proceed to the analysis of the results choosing the best network No. 5 which embraces the lowest error rate. In addition, we are intending to construct a diagram of the residuals for both training and control samples (Fig. 10).

To analyze the dynamics of this series, let’s build a line graph of ten tests from A to J (Fig. 8).

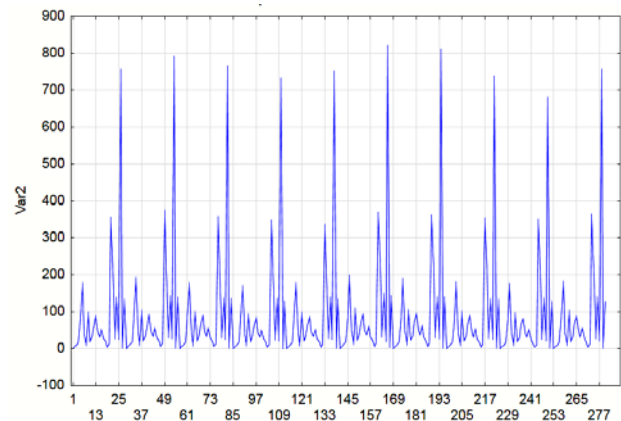


Figure 8 – Graph of the periodicity of the time series based on experimental data

Table 1 – Experimental data of the operation

Identifier	Sample of experimental data of marine watch teams									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1.1. X, $\Delta t_{(9)1001}$	0.8	1.0	0.9	0.7	0.8	1.2	1.1	0.8	0.7	0.9
1.2. X, $\Delta t_{(7)111}$	5.4	5.8	5.7	5.4	5.5	6.7	6.2	5.6	5.5	6.1
1.3. X, $\Delta t_{(10)1010}$	9.6	11.4	10.5	9.6	9.3	12.3	10.3	9.9	9.4	9.8
1.4. Y, $\Delta t_{(24)220}$	17.2	18.3	17.5	17.0	17.3	18.4	18.5	17.5	16.9	17.0
1.5. Z, $\Delta t_{(61)331}$	81.9	83.2	84.0	80.6	81.1	85.6	87.5	82.9	81.3	89.3
2.1. Y, $\Delta t_{(16)221}$	171.2	184.3	170.2	163.4	170.4	191.2	182.3	173.2	169.2	174.4
2.2. Y, $\Delta t_{(5)12}$	41.5	45.2	42.8	39.7	41.1	48.4	47.3	42.3	40.6	44.3
2.3. X, $\Delta t_{(4)10}$	12.3	13.1	12.4	12.0	12.4	15.2	13.9	12.2	11.9	12.0
2.4. Z, $\Delta t_{(43)223}$	93.2	96.3	94.9	89.2	91.4	101.5	98.2	94.3	91.3	96.8
2.5. Y, $\Delta t_{(14)112}$	20.7	22.6	21.5	19.3	21.0	24.2	23.6	21.1	19.2	20.9
2.6. Y, $\Delta t_{(17)122}$	31.3	33.0	32.4	29.3	30.2	33.2	32.7	31.3	29.8	32.1
2.7. Z, $\Delta t_{(51)303}$	64.7	67.2	66.9	63.3	64.7	69.7	70.4	65.3	65.4	67.3
3.1. Z, $\Delta t_{(34)202}$	86.7	90.3	89.0	83.3	85.4	93.1	94.7	88.2	81.3	86.9
3.2. Y, $\Delta t_{(11)102}$	45.2	44.7	48.2	43.6	44.8	50.1	49.2	46.2	42.1	47.2
3.3. Y, $\Delta t_{(18)200}$	32.4	34.2	33.9	31.2	32.7	38.2	38.5	32.1	30.8	32.6
3.4. Z, $\Delta t_{(44)230}$	52.0	55.3	54.7	50.0	51.5	59.3	61.3	52.3	52.1	54.7
3.5. Z, $\Delta t_{(55)313}$	27.1	30.1	29.3	26.8	27.4	32.1	31.4	28.3	26.1	28.9
3.6. Z, $\Delta t_{(14)32}$	19.6	21.2	20.5	18.3	19.5	23.1	21.4	18.3	16.3	19.9
4.1. X, $\Delta t_{(28)1100}$	4.9	5.3	5.2	4.6	4.5	6.1	5.9	5.1	3.9	4.3
4.2. Y, $\Delta t_{(12)110}$	13.9	15.6	14.5	12.4	13.6	15.2	16.0	13.7	11.0	13.8
4.3. Z, $\Delta t_{(60)330}$	347.2	367.4	349.2	338.7	327.5	361.9	352.2	344.8	341.2	354.2
4.4. Z, $\Delta t_{(53)311}$	211.3	219.4	216.3	209.1	207.6	227.9	218.2	210.7	207.1	213.0
4.5. Y, $\Delta t_{(13)111}$	35.4	37.1	38.4	31.3	34.5	39.1	37.2	35.7	33.2	36.1
4.6. Z, $\Delta t_{(58)322}$	130.9	135.2	130.4	127.2	130.8	141.3	133.9	128.5	129.3	134.2
5.1. Y, $\Delta t_{(19)201}$	33.5	36.2	34.1	30.2	33.3	27.3	35.7	32.8	29.9	30.6
5.2. Z, $\Delta t_{(38)212}$	747.2	782.1	756.2	724.1	743.1	812.4	801.3	729.4	673.3	748.0
5.3. X, $\Delta t_{(15)1111}$	9.4	10.3	9.7	8.9	9.2	11.7	10.5	9.7	9.1	10.1
5.4. Y, $\Delta t_{(23)212}$	125.4	131.8	127.8	120.2	126.3	134.9	132.5	125.0	118.9	127.3

Summary of active networks (Книга1 26)											
Include cases: 1:252											
Index	Net. name	Training perf.	Test perf.	Validation perf.	Training error	Test error	Validation error	Training algorithm	Error function	Hidden activation	Output activation
1	MLP 28-3-1	0,998016	0,997458		30,18913	72,67854		BFGS 26	SOS	Identity	Identity
2	MLP 28-7-1	0,998481	0,997466		23,07175	74,01402		BFGS 28	SOS	Tanh	Identity
3	MLP 28-8-1	0,998289	0,997463		26,00794	73,60702		BFGS 24	SOS	Tanh	Identity
4	MLP 28-8-1	0,998239	0,997488		26,78629	72,81711		BFGS 35	SOS	Tanh	Identity
5	MLP 28-7-1	0,998928	0,997598		16,30374	68,20398		BFGS 49	SOS	Tanh	Identity
6	MLP 28-6-1	0,998339	0,997480		25,24820	72,97567		BFGS 33	SOS	Tanh	Identity
7	MLP 28-8-1	0,998701	0,997548		19,82749	71,12372		BFGS 42	SOS	Tanh	Identity

Figure 9 – Indicators of network performance

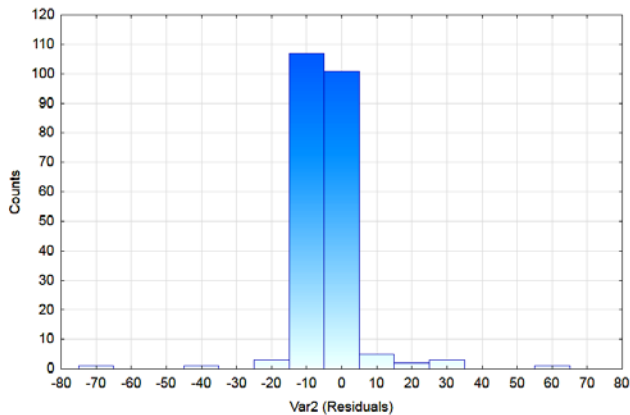


Figure 10 – Chart of residuals of the best network

As it clearly seen, the distribution might be considered almost close enough to standard delivering the evidence of the adequacy of the selected neural network model. Let us evaluate the quality of the model by building a scatter diagram of the target and output variables (Fig. 11).

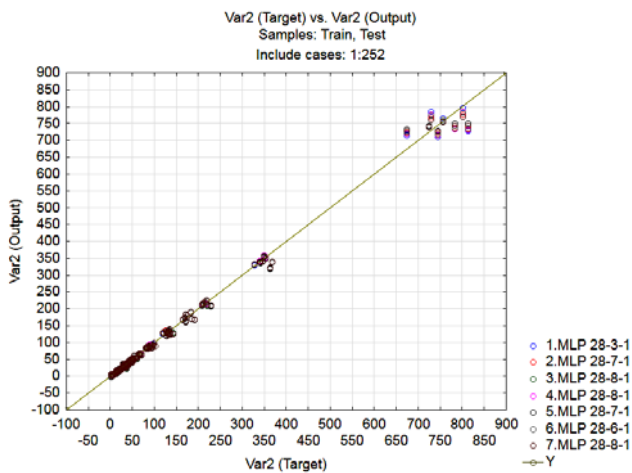


Figure 11 – Scatter diagram of target and output variables

The diagram depicts that the points of model No. 5 are bound to be the most structured ones with respect to the diagonal which is regarded to entirely confirm the advisability of its choice due to the high specifications of the constructed neural network.

Let's check the way the selected model will be on the point of performing prognoses of the initial series. It might be noticed that the constructed forecast graph tends to be copying a huge amount of similarity of values of the original data. (Fig. 12). This issue has become a true indicator letting precise prediction of the operator's ac-

tions to be revealed in various locations while performing typical habitual situations.

Besides, a projection of the graph targeting to analyze the accuracy of the neural network appears to have been built. Its correctness is deemed to be high enough due to the data presented in the resulting graph.

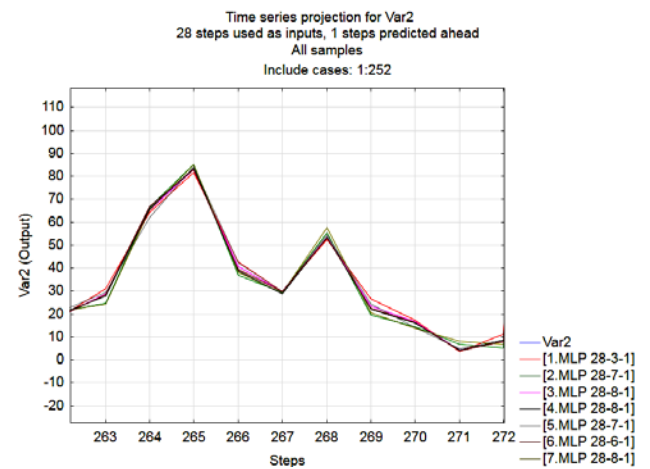


Figure 12 – Fragment of the obtained forecast graph

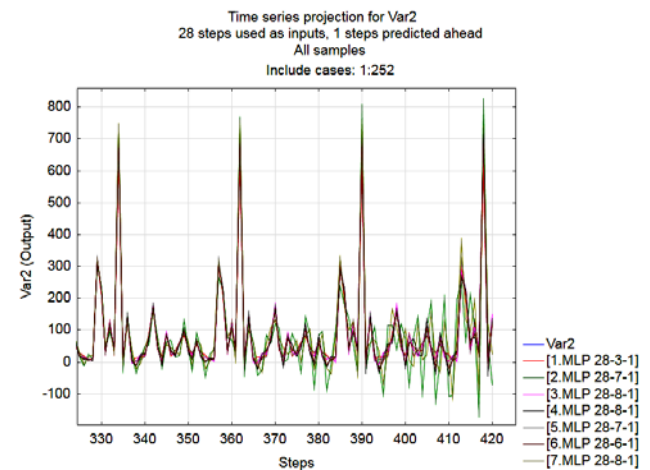


Figure 13 – Forecast for four cycles

As it can perceptibly be seen from Figure 1 having long-term forecasting, starting from 12 to 15 cycles, the graph might be distorted. This fact suggests that the safe use of the model is seen as workable just for two forecast cycles with having the neural network data periodically updated.

CONCLUSIONS

Formal theories and logical-cognitive models are considered to have been analyzed based on game, decision, creativity theory, theory of subjective analysis and the theory of p -adic systems. It resulted in welcoming of the approaches being the closest ones to the research problem.

On the ground of the foretold approach, a mechanism for transforming the data of the ECDIS server, empirically obtained video series and time indicators were settled upon causing an individual map of the perception of navigation situations of operators on the graph of p -adic spaces to be identified.

In addition, it had delivered the opportunity to clearly define the transition points between the spaces of perception by means of using the module for the automated identification of critical situations and a change in the reaction time of operators in the course of human-machine interaction.

With an intention to achieve the main objective of the study an experiment is said to have been carried out as a consequence of which metadata concerning the reactions of operators during a vessel anchoring operation in the port of Singapore was thoroughly collected. The data was obtained during having had the automated analysis of the log files of the NTPRO 5000 navigation simulator.

It is to be underlined, in its turn, that automated analysis of the obtained data by means of using regression analysis of time series with applied automated neural networks acquiescence in the model training and further predict operator reaction cycles. As a result of modeling with a high degree of reliability it is possible to come to a conclusion that for 2–3 subsequent cycles the prediction of reactions is noticed to be satisfactory. Further settlement is about having the calibration of the models required not forgetting to take into account the dynamically changing data of individual time indicators relative to everyday reactions.

Thus, this study is regarded to have contributed to finding the solution of the problems of identifying the negative impact of the human factor of marine operators to enhance safety policy in maritime transport.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was carried out within the framework of the research laboratory “Development of decision support systems, ergatic and automated ship traffic control systems” of the Kherson State Maritime Academy as well as being considered as the research topic “Development of software for important the quality of functioning systems for dynamic position sea vessels” (state registration number 0119U100948) of Kherson State Maritime Academy (scientific adviser: PhD Associate Professor, Deputy Rector for scientific and pedagogical work, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, Ben A.P.).

REFERENCES

1. Perera L. P. Deep learning toward autonomous ship navigation and possible COLREGS failures, *Offshore Mech*, 2020, Vol. 142, 031102. DOI: 10.1115/1.4045372.
2. Bakdi A., Glad I. K., Vanem E., et al. AIS-Based multiple vessel collision and grounding risk identification based on adaptive safety domain, *J. Mar. Sci. Eng*, 2020, Vol. 8, P. 5. DOI: 10.3390/jmse8010005.
3. Shen H., Guo C., Li T. et al. An intelligent collision avoidance and navigation approach of unmanned surface vessel considering navigation experience and rules, *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, Vol. 39, pp. 998–1005. DOI: 10.11990/jheu.201711024.
4. Hwang Soojin. Development of safety index for evaluation of ship navigation, *Journal of Korean navigation and port research*, 2014, Vol. 38, pp. 203–209. DOI: 10.5394/KINPR.2014.38.3.203.
5. Shevchenko R., Popovych I., Spytka L. et al. Comparative analysis of emotional personality traits of the students of maritime science majors caused by long-term staying at sea, *Revista Inclusiones*, 2020, Vol. 7, pp. 538–554.
6. Ferguson T. A course in game theory, USA, 2020. – 408 p.
7. Terence R., Friedberg A. A conjecture on the nature and evolution of consciousness, *Neuropsychanalysis*, 2016, Vol. 18, pp. 1–43. DOI: 10.1080/15294145.2016.1240045.
8. Kasianov V. O., Prokopenko O. Ye., Shipityak T. V. Dvorivneva model' generacziyi perevag, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, Vol. 50, pp. 35–40.
9. Hu G., Li J., Tang R. The revealed preference theory of stable matchings with one-sided preferences, *Games and Economic Behavior*, 2020, Vol. 124, pp. 305–318. DOI: 10.1016/j.geb.2020.08.015.
10. Subbotin S. A. Methods of synthesis of models of quantitative dependencies in the basis of trees of regression, realizing cluster – regression approximation by precedents, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, Vol. 3, pp. 76–85. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-3-9.
11. Kasana H. S. Introductory operations research. Theory and applications, Springer, 2004, 580 p.
12. Balaguer M. Mathematical Pluralism and Platonism, *Journal of Indian Council of Philosophical Research*, 2017, Vol. 34, pp. 379–398. DOI: 10.1007/s40961-016-0084-4.
13. Xie S., Li Y., Wang W. et al. Assessment of UAV's operator cognitive state based on behavior signals, *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2018, Vol. 36, pp. 715–721. DOI: 10.1051/jnwpu/20183640715.
14. Nosov P., Ben A., Safonova A. et al. Approaches going to determination periods of the human factor of navigators during supernumerary situations, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, Vol. 2, pp. 140–150. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-15.
15. Mao R., Li G., Hildre H. P. et al. Analysis and evaluation of eye behavior for marine operation training, *Journal of Eye Movement Research*, 2019, Vol. 12. DOI: 10.16910/jemr.12.3.6.
16. Yasseri S., Bahai H. Safety in Marine Operations, *International Journal of coastal and offshore engineering*, 2018, Vol. 2, pp. 29–40. DOI: 10.29252/ijcoe.2.3.29.
17. Bruijn W., Rip J., Hendriks A.J.H. et al. Probabilistic downtime estimation for sequential marine operations, *Applied Ocean Research*, 2019, Vol. 1, pp. 257–267. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.014.
18. Paterson J., Thies P., Sueur R. et al. Assessing marine operations with a Markov-switching autoregressive metocean

- model, *Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2020, Vol. 234, pp. 785–802. DOI: 10.1177/1475090220916084.
19. Khrennikov A., Nilson M. Theory of P-Adic Valued Probability. In: P-adic Deterministic and Random Dynamics, *Mathematics and Its Applications*, 2004, Vol. 574. DOI: 10.1007/978-1-4020-2660-7_13.
20. Zinchenko S., Nosov P., Mateichuk V. et al. Automatic collision avoidance system with many targets, including maneuvering ones, *Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics*, 2019, Vol. 96. pp. 69–79. DOI: 10.31489/2019Ph4/69-79.
21. Zinchenko S. M., Ben A. P., Nosov P. S. et al. Improving the Accuracy and Reliability of Automatic Vessel Motion Control System, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, Vol. 2. pp. 183–195. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-19.
22. Prokopchuk Y.A. Sketch of the Formal Theory of Creativity. Dnepr, PSACEA Press, 2017, 452 p.
23. Harris M. Speculations on the mod p representation theory of p -adic groups, *Annales de la faculté des sciences de Toulouse Mathématiques*, 2016, Vol. 25. pp. 403–418. DOI: 10.5802/afst.1499.
24. Kasianov V. Subjective entropy of preferences. Subjective analysis. Warsaw, Poland: Institute of aviation, 2013, 644 p.
25. Nosov P.S., Zinchenko S.M., Popovych I.S. et al. Diagnostic system of perception of navigation danger when implementation complicated maneuvers, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, Vol. 1. pp. 146–161. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-15.
26. Nosov P.S., Popovych I.S., Cherniavskiy V.V. et al. Automated identification of an operator anticipation on marine transport, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, Vol. 3. pp. 158–172. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-3-15.
27. Nosov P., Palamarchuk I., Zinchenko S. et al. Development of means for experimental identification of navigator attention in ergatic systems of maritime transport, *Bulletin of University of Karaganda*, 2020, Vol. 97. pp. 58–69. DOI: 10.31489/2020Ph1/58-69.
28. Kononenko O., Kononenko A., Stynska V. et al. Research of the factor structure of the model of world view setting at a young age, *Revista Inclusiones*, 2020, Vol. 7. pp. 98–116.
29. Vagushchenko L.L., Vagushchenko A.A. Enhancement of support for collision avoidance decisions, *Shipping & Navigation*, 2018, Vol. 27. pp. 24–34. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.24-34.
30. Yang T., Brinton C. G., Joe-Wong C. et al. Behavior-Based Grade Prediction for MOOCs Via Time Series Neural Networks, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2017, Vol. 11. pp. 716–728. DOI: 10.1109/JSTSP.2017.2700227.

Received 21.12.2020.
Accepted 08.02.2021.

УДК 004.942: 316.454.54

ІДЕНТИФІКАЦІЯ РЕАКЦІЙ ОПЕРАТОРА МОРСЬКОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ НАВІГАЦІЇ

Носов П. С. – канд. техн. наук, доцент кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, Україна.

Чернявський В. В. – д-р пед. наук, професор, ректор, Херсонська державна морська академія, Україна.

Зінченко С. М. – канд. техн. наук, старший викладач кафедри управління судном, завідувач лабораторією електронних симуляторів, Херсонська державна морська академія, Україна.

Попович І. С. – д-р психол. наук, професор кафедри загальної та соціальної психології, Херсонський державний університет, Україна.

Нагрибельний Я. А. – д-р пед. наук, доцент, декан факультету «Судноводіння», Херсонська державна морська академія, Україна.

Носова Г. В. – старший викладач кафедри комп'ютерної та програмної інженерії Херсонського політехнічного фахового коледжу Одеського національного політехнічного університету, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. У статті запропоновано підхід аналізу реакцій оператора морської електронної навігації та автоматизованої ідентифікації негативного впливу його людського фактору в ергатичних системах управління морським транспортом. Запропоновано алгоритми зчитування інформації про результати людино-машинної взаємодії оператора у критичних ситуаціях при виконанні навігаційних операцій підвищеної складності.

Мета. Метою дослідження є розробка підходу що дозволяє перетворити простір ознак щодо дій оператора у вигляді логіко-геометричного простору p -адичних систем, в результаті якого з'являється можливість ідентифікації рівня інтелектуальної діяльності оператора за допомогою автоматизованих засобів і спрогнозувати його динаміку для нівелювання критичних ситуацій.

Метод. В рамках підходу і з метою автоматизованої ідентифікації сегментованих результатів людино-машинної взаємодії описано метод перетворення детермінованих фрагментів інтелектуальної діяльності оператора в термінах p -адичних структур. Формально описані принципи деталізації, узагальнення, а також переходів у різні простори сприйняття навігаційної ситуації оператором. Проведено імітаційне моделювання що підтверджує доцільність запропонованого підходу і дозволяє на основі часових ідентифікаторів визначити індивідуальну структуру реакцій оператора. Отримані дані дозволяють виконувати прогнозування для типових ситуацій із застосуванням автоматизованих багатокритеріальних методів і засобів, що у свою чергу дає можливість ідентифікувати індивідуальні показники динаміки реакцій оператора у складній людино-машинній взаємодії.

Результати. З метою підтвердження запропонованого формально-алгоритмічного підходу був проведений експеримент з використанням навігаційного симулятора Navi Trainer 5000 (NTPRO 5000). Автоматизований аналіз експериментальних серверних даних, даних відеореяду, дозволив ідентифікувати детерміновані дії оператора у вигляді метаданих траєкторії його реакцій в рамках просторів p -адичних структур. Результати моделювання із застосуванням автоматизованих нейронних мереж дозволили отримати часові ряди інтелектуальної діяльності оператора електронної морської навігації та з достатнім ступенем надійності виконувати прогноз подальших реакцій.

Висновки. Запропоновані формальні підходи дослідження, в поєднанні із розробленими автоматизованими засобами, а також алгоритмічними і методологічними пропозиціями дозволили на новому рівні підійти до вирішення проблеми автоматизованої ідентифікації негативного прояву людського фактора оператора електронної навігації. Результативність запропонованого підходу була обґрунтована за результатами автоматизованої обробки експериментальних даних і побудованих прогнозів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: системи ідентифікації реакцій, системи автоматизованої обробки даних, моделювання реакцій оператора, комп'ютерні навігаційні симулятори, аналіз людського фактора, автоматизовані системи управління.

УДК 004.942: 316.454.54

ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕАКЦИЙ ОПЕРАТОРА МОРСКОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ НАВИГАЦИИ

Носов П. С. – канд. техн. наук, доцент кафедры судовождения, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Чернявский В. В. – д-р пед. наук, профессор, ректор, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Зинченко С. Н. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры управления судном, заведующий лабораторией электронных симуляторов, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Попович И. С. – д-р психол. наук, профессор кафедры общей и социальной психологии, Херсонский государственный университет, Украина.

Нагрибельный Я. А. – д-р пед. наук, доцент, декан факультета «Судовождения», Херсонская государственная морская академия, Украина.

Носова Г. В. – старший преподаватель кафедры компьютерной и программной инженерии Херсонского политехнического профессионального колледжа Одесского национального политехнического университета, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В статье предложен подход анализа реакций оператора морской электронной навигации и автоматизированной идентификации негативного влияния его человеческого фактора в эргатических системах управления морским транспортом. Предложены алгоритмы считывания информации о результатах человеко-машинного взаимодействия оператора в критических ситуациях при выполнении навигационных операций повышенной сложности.

Цель. Целью исследования является разработка подхода позволяющего преобразовать признаковое пространство действий оператора в виде логико-геометрического пространства p -адических систем, в результате которого появляется возможность идентифицировать уровень интеллектуальной деятельности оператора с помощью автоматизированных средств и спрогнозировать его динамику для нивелирования критических ситуаций.

Метод. В рамках подхода и с целью автоматизированной идентификации сегментированных результатов человеко-машинные взаимодействия описан метод преобразования детерминированных фрагментов интеллектуальной деятельности оператора в терминах p -адических структур. Формально описаны принципы детализации, обобщения, а также переходов в различные пространства восприятия навигационной ситуации оператором. Проведено имитационное моделирование подтверждающее целесообразность предложенного подхода и позволяющее на основе временных идентификаторов определить индивидуальную структуру реакций оператора. Полученные данные позволяют выполнять прогнозирование для типовых ситуаций с применением автоматизированных многокритериальных методов и средств, что в свою очередь дает возможность идентифицировать индивидуальные показатели динамики реакций оператора в сложном человеко-машинном взаимодействии.

Результаты. С целью подтверждения предложенного формально-алгоритмического подхода был проведен эксперимент с использованием навигационного симулятора Navi Trainer 5000 (NTPRO 5000). Автоматизированный анализ экспериментальных серверных данных, данных видеоряда, позволил идентифицировать детерминированные действия оператора в виде метаданных траектории его реакций в рамках пространств p -адических структур. Результаты моделирования с применением автоматизированных нейронных сетей позволили получить временные ряды интеллектуальной деятельности оператора электронной морской навигации и с достаточной степенью надежности выполнять прогноз дальнейших реакций.

Выводы. Предложенные формальные подходы исследования, в сочетании с разработанными автоматизированными средствами, а также алгоритмическими и методологическими предложениями позволили на новом уровне подойти к решению проблемы автоматизированной идентификации негативного проявления человеческого фактора оператора электронной навигации. Результативность предложенного подхода была обоснована по результатам автоматизированной обработки экспериментальных данных и построенных прогнозов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: системы идентификации реакций, системы автоматизированной обработки данных, моделирование реакций оператора, компьютерные навигационные симуляторы, анализ человеческого фактора, автоматизированные системы управления.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Perera L. P. Deep learning toward autonomous ship navigation and possible COLREGs failures // L. P. Perera // *Off-shore Mech.* – 2020. – Vol. 142(3): 031102. DOI:10.1115/1.4045372.
2. AIS-Based multiple vessel collision and grounding risk identification based on adaptive safety domain / A. Bakdi, I. K. Glad, E. Vanem, et al. // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2020. – Vol. 8(1), P. 5. DOI:10.3390/jmse8010005.
3. An intelligent collision avoidance and navigation approach of unmanned surface vessel considering navigation experience and rules / H. Shen, C. Guo, T. Li et al. // *Harbin Gongcheng Daxue Xuebao // Journal of Harbin Engineering University.* – 2018. – Vol. 39. – P. 998–1005. DOI: 10.11990/jheu.201711024.
4. Hwang Soojin. Development of safety index for evaluation of ship navigation / Hwang Soojin, E. Kobayashi, N. Wakabayashi // *Journal of Korean navigation and port re-*

- search. – 2014. – Vol. 38. – P. 203–209. DOI:10.5394/KINPR.2014.38.3.203.
5. Comparative analysis of emotional personality traits of the students of maritime science majors caused by long-term staying at sea / R. Shevchenko, I. Popovych, L. Spytka et al. // *Revista Inclusiones.* – 2020. – Vol. 7. Num Especial – P. 538–554.
 6. Ferguson T. A course in game theory / T. Ferguson, 2020. – 408 p.
 7. Terence R. A conjecture on the nature and evolution of consciousness / R. Terence, A. Friedberg // *Neuropsychanalysis.* – 2016. – Vol. 18. – P. 1–43. DOI:10.1080/15294145.2016.1240045.
 8. Касьянов В.О. Дворівнева модель генерації переваг / В. О. Касьянов, О. Є. Прокопенко, Т. В. Шипитяк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* – 2011. – Вып. 50. – С. 35–40.
 9. Hu G. The revealed preference theory of stable matchings with one-sided preferences / G. Hu, J. Li, R. Tang // *Games and Economic Behavior.* – 2020. – Vol. 124. – P. 305–318. DOI: 10.1016/j.geb.2020.08.015.
 10. Subbotin S. A. Methods of synthesis of models of quantitative dependencies in the basis of trees of regression, realizing cluster – regression approximation by precedents / S. A. Subbotin // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2019. – Vol. 3. – P. 76–85. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-3-9.
 11. Kasana H. S. Introductory operations research. Theory and applications / H. S. Kasana, K. D. Kumar. – Springer, 2004. – 580 p.
 12. Balaguer M. Mathematical Pluralism and Platonism / M. Balaguer // *Jornal of Indian Council of Philosophical Research.* – 2017. – Vol. 34(2). – P. 379–398. DOI: 10.1007/s40961-016-0084-4.
 13. Assessment of UAV's operator cognitive state based on behavior signals / S. Xie, Y. Li, W. Wang et al. // *Journal of Northwestern Polytechnical University.* – 2018. – Vol. 36. – P. 715–721. DOI: 10.1051/jnwpu/20183640715.
 14. Approaches going to determination periods of the human factor of navigators during supernumerary situations / P. Nosov, A. Ben, A. Safonova et al. // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2019. – Vol. 2. – P. 140–150. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-15.
 15. Analysis and evaluation of eye behavior for marine operation training - A pilot study / R. Mao, G. Li, H. P. Hildre et al. // *Journal of Eye Movement Research.* – 2019. – Vol. 12(3). DOI: 10.16910/jemr.12.3.6.
 16. Yasserli S. Safety in Marine Operations / S. Yasserli, H. Bahai // *International Journal of coastal and offshore engineering.* – 2018. – Vol. 2. – P. 29–40. DOI: 10.29252/ijcoe.2.3.29.
 17. Probabilistic downtime estimation for sequential marine operations / W. Bruijn, J. Rip, A. J. H. Hendriks et al. // *Applied Ocean Research.* – 2019. – Vol. 86. – P. 257–267. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.014.
 18. Assessing marine operations with a Markov-switching autoregressive metocean model / J. Paterson, P. Thies, R. Sœur et al. // *Journal of Engineering for the Maritime Environment.* – 2020. – Vol. 234. – P. 785–802. DOI: 10.1177/1475090220916084.
 19. Khrennikov A. Theory of P-Adic Valued Probability. In: *P-adic Deterministic and Random Dynamics / A. Khrennikov, M. Nilson // Mathematics and Its Applications.* Springer, Dordrecht. – 2004. – Vol. 574. DOI: 10.1007/978-1-4020-2660-7_13.
 20. Automatic collision avoidance system with many targets, including maneuvering ones / S. Zinchenko, P. Nosov, V. Mateichuk et al. // *Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics.* – 2019. – Vol. 96(4). – P. 69–79. DOI: 10.31489/2019Ph4/69-79.
 21. Improving the Accuracy and Reliability of Automatic Vessel Motion Control System / S. M. Zinchenko, A. P. Ben, P. S. Nosov et al. // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2020. – Vol. 2. – P. 183–195. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-19.
 22. Prokopchuk Y. A. Sketch of the Formal Theory of Creativity / Y.A. Prokopchuk. – Dnepr : PSACEA Press, 2017. – 452 p.
 23. Harris M. Speculations on the mod p representation theory of p-adic groups / M. Harris // *Annales de la faculté des sciences de Toulouse Mathématiques.* – 2016. – Vol. 25. – P. 403–418. DOI: 10.5802/afst.1499.
 24. Kasianov V. Subjective entropy of preferences. Subjective analysis / V. Kasianov. – Warsaw, Poland: Institute of aviation, 2013. – 644 p.
 25. Diagnostic system of perception of navigation danger when implementation complicated maneuvers / P. S. Nosov, S. M. Zinchenko, I. S. Popovych et al. // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2020. – Vol. 1. – P. 146–161. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-15.
 26. Automated identification of an operator anticipation on marine transport / P. S. Nosov, I. S. Popovych, V. V. Cherniavskiy et al. // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2020. – Vol. 3. – P. 158–172. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-3-15.
 27. Nosov P. Development of means for experimental identification of navigator attention in ergatic systems of maritime transport / P. Nosov, I. Palamarchuk, S. Zinchenko et al. // *Bulletin of University of Karaganda.* – 2020. – Vol. 1(97). – P. 58–69. DOI: 10.31489/2020Ph1/58-69.
 28. Research of the factor structure of the model of world view setting at a young age / O. Kononenko, A. Kononenko, V. Stynska et al. // *Revista Inclusiones.* – 2020. – Vol. 7. – P. 98–116.
 29. Vagushchenko L.L. Enhancement of support for collision avoidance decisions / L. L. Vagushchenko, A. A. Vagushchenko // *Shipping & Navigation.* – 2018. – Vol. 27. – P. 24–34. DOI: 10.31653/2306-5761.27.2018.24-34.
 30. Behavior-Based Grade Prediction for MOOCs Via Time Series Neural Networks / T. Yang, C. G. Brinton, C. Joe-Wong et al. // *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing.* – 2017. – Vol. 11(5). – P. 716–728. DOI: 10.1109/JSTSP.2017.2700227.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 1/2021

Науковий журнал

Головний редактор – д-р техн. наук С. О. Субботін

Заст. головного редактора – д-р техн. наук Д. М. Піза

Комп'ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі НУ «Запорізька політехніка»

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 24220-14060 ПР від 19.11.2019.

*Підписано до друку 09.03.2021. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 26,04.
Тираж 300 прим. Зам. № 148.*

69063, м. Запоріжжя, НУ «Запорізька політехніка», друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 6952 від 22.10.2019.