



СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

2(48) ' 2018

Заснований
у 2007 році

Наукове періодичне видання,
в якому відображені результати
наукових досліджень з розробки та
удосконалення систем управління,
навігації та зв'язку у різних
проблемних галузях.

Засновник:
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка

Адреса редакційної колегії:
Україна, 36011, м. Полтава,
Першотравневий проспект, 24

Телефон: +38 (066) 706-18-30
(консультації, прийом статей).

E-mail:
kozelnkova@ukr.net

Інформаційний сайт:
<http://www.pntu.edu.ua>

Реферативна інформація
зберігається: у загальнодержавній
реферативній базі даних
„Україніка наукова” та публікується
у відповідних тематичних серіях
УРЖ „Джерело”.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Голова:

КОЗЕЛКОВ Сергій Вікторович (д-р техн. наук, проф., Україна)

Заступники голови:

ШЕФЕР Олександр Віталійович (канд. техн. наук, доц., Україна)

ШУЛЬГА Олександр Васильович (д-р техн. наук, доц., Україна)

Члени:

БЛАУНШТЕЙН Натан Олександрович (д-р техн. наук, проф., Ізраїль)

ВЕСОЛОВСЬКИЙ Кшиштоф (д-р техн. наук, проф., Польща)

ІЛЬІН Олег Юрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КОРОБКО Богдан Олегович (д-р техн. наук, доц., Україна)

КОШОВИЙ Микола Дмитрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КУЧУК Георгій Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЛАДАНЮК Анатолій Петрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович (д-р техн. наук, проф., Німеччина)

МАШКОВ Віктор Альбертович (д-р техн. наук, проф. Чехія)

МАШКОВ Олег Альбертович (д-р техн. наук, проф., Україна)

МОРГУН Олександр Андрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ПОПОВ Валентин Іванович (д-р фіз.мат. наук, проф., Латвія)

СТАНКУНАС Йонас (д-р техн. наук, проф., Литва)

СТАСЄВ Юрій Володимирович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ФРОЛОВ Євгеній Андрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ХОРОШКО Володимир Олексійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЧОРНИЙ Олексій Петрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

Відповідальний секретар:

КОЗЕЛКОВА Катерина Сергіївна (д-р техн. наук, проф., Україна)

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

Журнал індексується міжнародними бібліометричними та наукометричними базами даних: *Index Copernicus (Польща), General Impact Factor (ЄС), Google Scholar (США), Academic Resource Index (ЄС), Scientific Indexed Service (США).*

Затверджений до друку вченою радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (протокол № 13 від 11 квітня 2018 року)

Занесений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" (технічні науки) строком на п'ять років (від дати включення наказом Міністерства освіти і науки України) від 24.10.2017 № 1413 (додаток 7, п. 31)

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ГР від 16.11.2012 р.

З М І С Т

УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Ahmed Ibrahim Jaber Alzubaydy, Dorohobid V.P., Mohammed Saady Hasan, Borozdin M.K.</i> Research of the direct torque control system by induction motor	3
<i>Кислиця С.Г., Єрмілова Н.В., Кожушко Г.М.</i> Металогалогенні лампи: досягнутий рівень та шляхи подальшого підвищення світлової ефективності енергоекономічних джерел світла	9
<i>Мельник Ю.В., Козелков С.В.</i> Особливості управління ергатичною телекомунікаційною системою спеціального призначення	14
<i>Носков В.И., Мезенцев Н.В., Гейко Г.В., Панченко В.И.</i> Обработка сигналов в бортовой системе управления дизель-поезда ДЭЛ-02	20
<i>Скакаліна О.В.</i> Інноваційна концепція системи управління складними розподіленими системами	24
<i>Федоров А.В., Головняк Д.В., Андрієвський В.А., Куцмус С.І., Галаговець Ю.Ю.</i> Аналіз ефективності використання системи MLAT в аеропортах для контролю повітряного простору	30

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ

<i>Galai V.M.</i> The research into the problem of statistically indeterminate time series prediction	34
<i>Дубницький В.Ю., Петренко О.Е., Ходырев А.И.</i> Вычисление энтропии функции квантилей (энтропии Васичека)	39
<i>Оберемок С.О.</i> Математична модель процесу комутації в засобах з повнозв'язною топологією в мережах АСУ повітряним рухом	44
<i>Стоян Ю.Е., Панкратов А.В., Романова Т.Е.</i> Упаковка многогранников в выпуклый контейнер минимального объема ...	48
<i>Чугай А.М.</i> Моделювання щільного пакування подібних 3D об'єктів	55

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Глухова Н.В., Пісоцька Л.А.</i> Розробка методу аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання	59
<i>Гороховатський В.О., Солодченко К.Г.</i> Застосування апарату аналізу та оброблення бітових даних у методах класифікації зображень за множиною ключових точок	63
<i>Гороховатський В.А., Пупченко Д.В.</i> Классификация изображений визуальных объектов по множеству дескрипторов особенных точек на основе нейронной сети Кохонена	68
<i>Коваленко А.А., Кучук Г.А., Нечаусов С.М.</i> Інформаційні технології синтезу і реконфігурації структур комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування	73
<i>Лукова-Чуйко Н.В., Мусієнко А.П., Коваль М.О.</i> Використання мереж Петрі для побудови моделі виявлення зовнішніх впливів на інформаційну систему	77
<i>Лысенко И.В., Нос Р.С.</i> Модель криптопреобразования данных по схеме задачи о рюкзаке на основе принципа диверсности	83
<i>Свиридов А.С.</i> Метод визначення ознак програмних реалізацій алгоритмів на основі синтаксичного аналізу	87
<i>Хижняк І.А., Моквейчук О.М., Худов Р.Г., Подліпаєв В.О., Горбань Г.В., Худов Г.В.</i> Метод ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії (АВС)) тематичного сегментування оптико-електронного зображення	91
<i>Шматков С.І., Кучук Н.Г., Донець В.В.</i> Модель інформаційної структури гіперконвергентної системи підтримки електронних обчислювальних ресурсів університетської E-learning	97
<i>Янковський О.А., Янковська Д.О., Маракушин Д.І.</i> Микроконтроллерная система для исследования сенсо-моторных реакций	101

ЗАПОБІГАННЯ ТА ЛІКВІДАЦІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

<i>Андреев С.М., Нечаусов А.С.</i> Алгоритм автоматизированного определения класса стабильности атмосферы для текущих метеоусловий	105
<i>Антошкин А.А., Качанов П.А., Галица В.И., Литвяк А.Н.</i> Исследование влияния электростатического поля на скорость осаждения мелкодисперсной пыли	111
<i>Бутенко О.С., Барабаш О.В., Горелик С.І., Нікітін А.А.</i> Система космічного моніторингу за сміттєзвалищами твердих побутових відходів	114
<i>Левченко Л.О., Сідько О.С.</i> Застосування ГІС-технології для візуалізації результатів моделювання поширення авіаційного шуму	120
<i>Чернявський І.Ю., Петрухин С.Ю., Матыкин В.Б., Гайдабука В.Е., Тютюник В.В.</i> Информационно-логическая модель учёта необходимых и достаточных параметров для оценки дозы гамма-нейтронного излучения проникающей радиации	126

ЗВ'ЯЗОК

<i>Безрук В.М., Іваненко С.А.</i> Обнаружение и распознавание сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности в задачах радиомониторинга	135
<i>Гребеля Р.Є., Слюсарь І.І., Слюсар В.І.</i> Дослідження впливу перекриття елементів діелектричних резонаторних антен на основі усіченого конусу	142
<i>Льницький А.І., Бурба О.І.</i> Статистичні оцінки незміщеності та ефективності параметрів джерел випромінювання при радіомоніторингу телекомунікаційних мереж і систем	149
<i>Kalvatynsky O.V.</i> Study of efficiency of application of different antennas for the receiving of special information from the satellites type of CUBESAT for remote sensing of the Earth	154
<i>Карлов В.Д., Кириченко Ю.В., Артеменко А.Н., Бесова О.В.</i> Особенности формирования диаграмм направленности плазменной антенны с азимутально-несимметричными бегущими волнами тока	158
<i>Сакович Л.М., Криховецький Г.Я., Небесна Я.Е.</i> Оцінка впливу метрологічної надійності засобів вимірювань на час виконання технічного обслуговування засобів спеціального зв'язку	164
<i>Семенов В.М., Слюсар В.І., Слюсарь І.І.</i> Квазіфрактальна діелектрична резонаторна антена на основі паралелепіпеда	167

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	172
----------------------------------	-----

Ahmed Ibrahim Jaber Alzubaydy¹, V.P. Dorohobid², Mohammed Saady Hasan¹, M.K. Borozdin²

¹ University of Dayala College of engineering Electrical power and machines, Iraq

² Poltava National Technical University named after Kondratyuk, Poltava

RESEARCH OF THE DIRECT TORQUE CONTROL SYSTEM BY INDUCTION MOTOR

The article presents a mathematical description of an induction motor with further modeling in the MATLAB program. In the model, the method of direct torque control (DTC) is implemented. The basic idea of control is that at each step of the calculation the optimum state of the inverter voltage is determined, which causes a change in both the moment and the stator flux coupling in the necessary direction. The obtained transient processes.

Keywords: direct torque control, Flux linkage vector, induction motor model, MATLAB, DTC.

Introduction

The induction motor in the fixed coordinate system x-y is described by a known system of equations [1]:

$$\tilde{U}_{1x-y} = R_1 \tilde{I}_{1x-y} + \frac{d}{dt} \tilde{\Psi}_{1x-y};$$

$$\tilde{U}_{2x-y} = R_2 \tilde{I}_{2x-y} + \frac{d}{dt} \tilde{\Psi}_{2x-y} - j p_n \omega_p \Psi_{2x-y};$$

$$\tilde{\Psi}_{1x-y} = L_1 \tilde{I}_{1x-y} + L_m \tilde{I}_{2x-y};$$

$$\tilde{\Psi}_{2x-y} = L_m \tilde{I}_{1x-y} + L_2 \tilde{I}_{2x-y};$$

$$M_d = 3 / 2 p_n (\Psi_{2x} I_{1y} - \Psi_{2y} I_{1x});$$

$$\omega = \int \frac{M_d - M_c}{J},$$

where R_1 – active resistance of the stator winding phase;

R_2 – active resistance of the rotor winding phase reduced to the stator;

M_c – static load moment;

Ψ_{1x-y} – vector flux linkage of stator;

Ψ_{2x-y} – vector flux linkage of rotor;

J – moment of inertia, reduced to the motor;

U_{1x-y} – stator voltage vector;

U_{2x-y} – rotor voltage vector; ω – nominal angular velocity;

ω_p – rotor angular velocity;

L_1 – total inductance of the phase of the stator winding;

L_2 – total inductance of the phase of the rotor winding;

L_m – magnetizing circuit inductance.

Main part

This mathematical description for the MATLAB package can be represented in the following matrix form. Equation of stator and rotor stresses:

$$\tilde{U}_3 = R_3 \tilde{I}_3 + \frac{d}{dt} \tilde{\Psi}_3 - p_n \cdot C \cdot \Psi_3, \quad (1)$$

where the matrix-columns of voltages, currents and flux linkages have the form:

$$U_3 = \begin{bmatrix} U_{1x} \\ U_{1y} \\ U_{2x} \\ U_{2y} \end{bmatrix}; \quad \Psi_3 = \begin{bmatrix} \Psi_{1x} \\ \Psi_{1y} \\ \Psi_{2x} \\ \Psi_{2y} \end{bmatrix}; \quad I_3 = \begin{bmatrix} I_{1x} \\ I_{1y} \\ I_{2x} \\ I_{2y} \end{bmatrix}.$$

Resistance Matrix R_3 and the matrix C , turning vector of flux linkage on 90° , have the form:

$$R_3 = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

The linkage and torque of the motor are connected with current expressions:

$$\Psi_3 = L_3 \cdot I_3, \quad (2)$$

$$M_d = (G \cdot \Psi_3)^T \cdot (F \cdot I_3). \quad (3)$$

The matrix of inductances L_3 , as well as matrices F and G have the form:

$$F = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad L_3 = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_1 & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_2 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_2 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Based on the mathematical description, a computer model is developed in the MATLAB package, shown in Fig. 1.

Block «Psi->I» solves the system of linear equations

$$\Psi_3 = L_3 \cdot I_3,$$

realizing the operation

$$I_3 = L_3^{-1} \cdot \Psi_3.$$

MATLAB Function in block has the form L_3 / u .

In block «Psi, I->M» on flux linkage Ψ_3 and current I_3 the electromagnetic moment is calculated in ac-

cordance with equation (3). Line «MATLAB Function» in block has the form:

$$(G \cdot u(5:8)) \cdot (F \cdot u(1:4)) \cdot pn \cdot 3/2 \quad (\text{Fig. 2}).$$

Further, the moment of resistance is subtracted from the electromagnetic moment M_c , and the resulting dynamic moment is integrated and divided by the moment of inertia J . The result is the rotational speed of the rotor. The transformation of the three-phase voltage into the two-phase required by the model is carried out using the block represented in Fig. 3.

As a result, based on the previously obtained subsystems, we obtain a general system which is shown in Fig. 4.

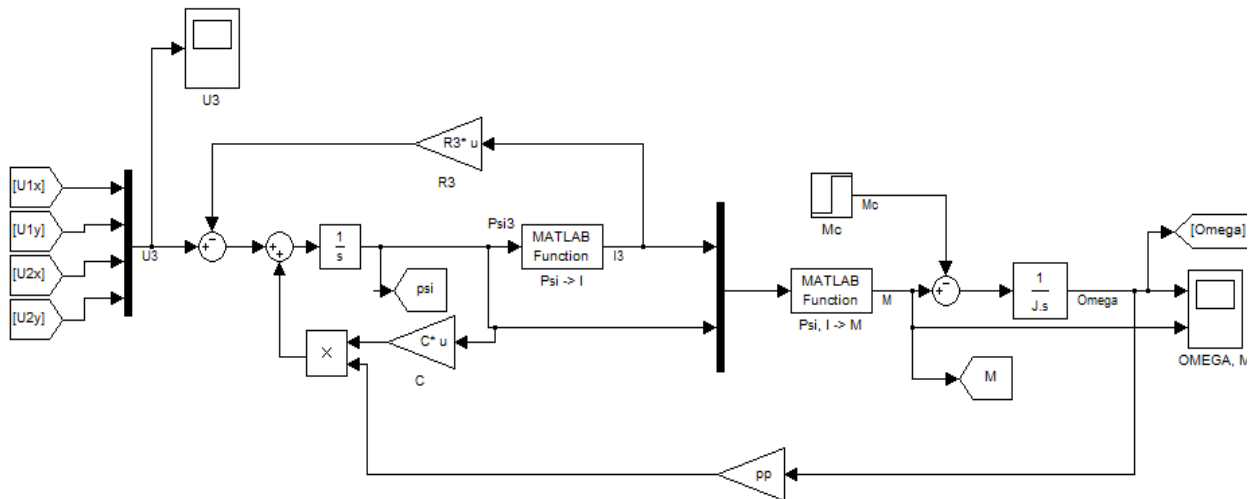


Fig. 1. Computer model of an induction motor

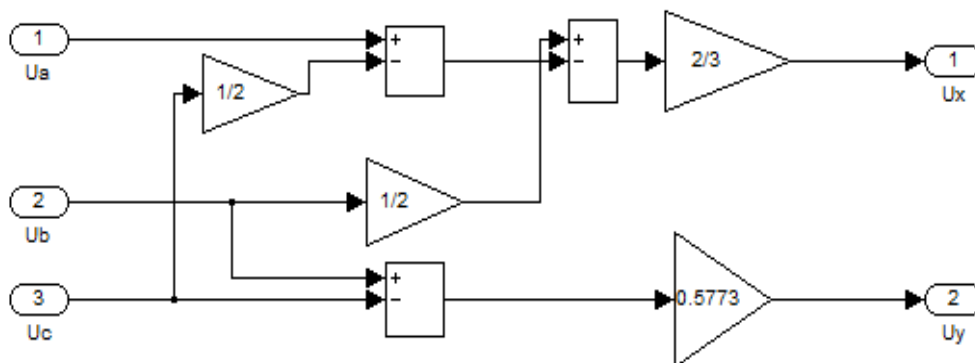


Fig. 2. Three-phase phase voltage conversion system (a-b-c) to (x-y)

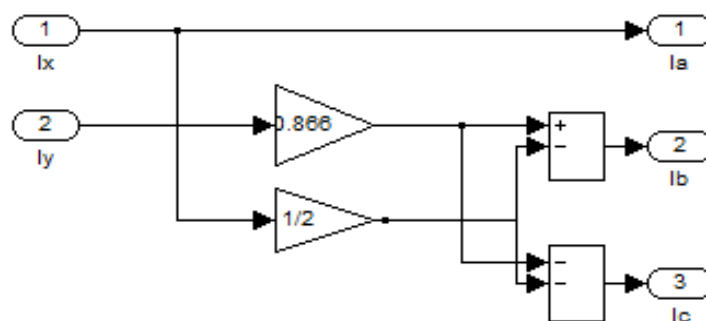


Fig. 3. Two-phase phase voltage conversion system (x-y) to three-phase (A-B-C)

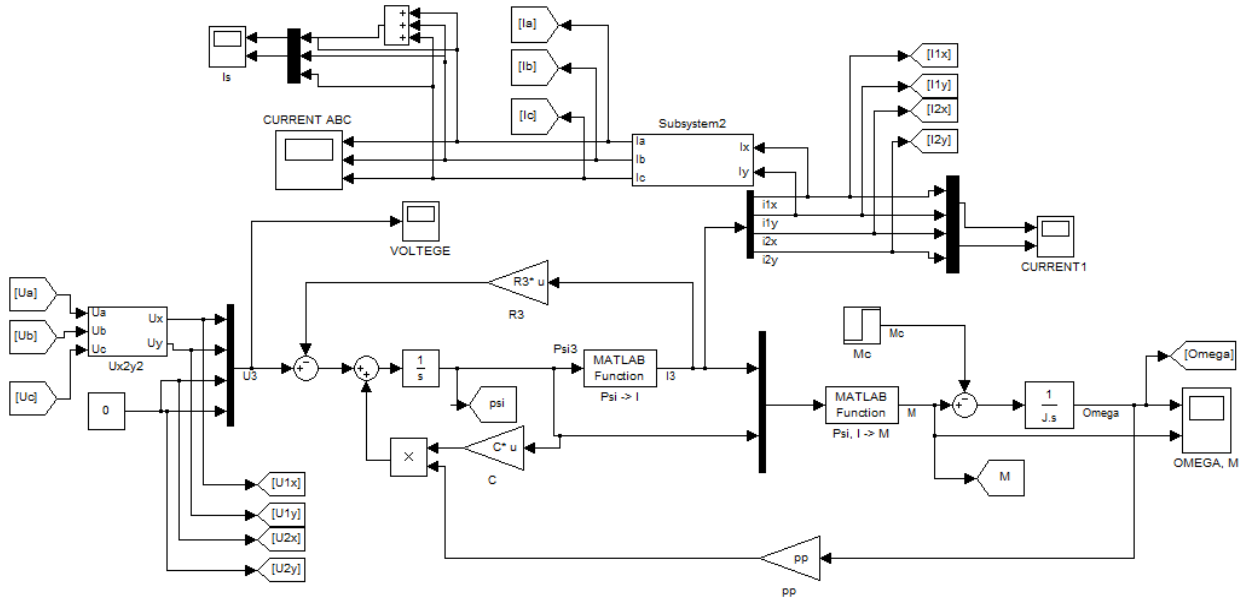


Fig. 4. Model of an induction motor

In the mid-85's, ABB proposed and later implemented the direct torque control (DTC) method [1]. The basic idea of control is that at each step of the calculation, the optimum state of the inverter voltage is determined, which causes a change in both the moment and the stator flux coupling in the required direction [10]. As a result, the separation of the torque and flow control channels of the induction motor is achieved.

The basis of the DTC system is the equation of the electromagnetic moment of an induction motor [1].

$$M_{\text{д}} = \frac{3}{2} P_{\text{II}} \frac{K_1}{\sigma L_2} (\psi_{1Y} \psi_{2x} - \psi_{1x} \psi_{2y}) \quad (5)$$

The projections of the flux link vector on the axis of the fixed coordinate system can be written in terms of the vector modules and the current angular values relative to the abscissa [1].

$$\begin{aligned} \psi_{1x} &= |\Psi_1| \cos \theta_1; \psi_{1y} = |\Psi_1| \sin \theta_1; \\ \psi_{2x} &= |\Psi_2| \cos \theta_2; \psi_{2y} = |\Psi_2| \sin \theta_2 \end{aligned}$$

Hence the expression for the moment is obtained in the form

$$M_{\text{д}} = \frac{3}{2} P_{\text{II}} \frac{K_1}{\sigma L_2} |\psi_1| |\psi_2| \sin \vartheta$$

where ϑ – the spatial angle between the vectors of the stator flux linkages ψ_1 and rotor ψ_2 .

If the modules of vectors $|\psi_1| = \psi_{1m}$ and $|\psi_2| = \psi_{2m}$ keep constant, the magnitude of the torque can be controlled by changing the angle ϑ [9].

The algorithm of the DTC system is constructed as follows. First, the vector of stator flux linkage ψ_1 and electromagnetic moment of motor are determined in some way. Then the vector and moment modules are compared with the set values, after which, using the comparators, called the relay regulators, the logical error signals $d\psi$ and dM [9].

Based on these signals and knowing the position of the flux linkage vector in the plane of the reference vectors, one can choose a combination of the states of the inverter's keys, at which the base voltage vector is formed, minimizing the deviation from the set values. Thus, as a result of the operation of the system, the stator flux-stator module and the electromagnetic moment of the asynchronous motor will always be in the zone of the permissible deviation from the set value determined by the hysteresis value of the corresponding regulator. The choice of the basic vector of an error-minimizing control variable depending on the sector in which the vector is currently located ψ_1 , are produced using a switching table (Optimal Vector Selection Table) [9]. The switching table consists of the digitized signals of the flux mismatch (1.0) and the moment (1.0, -1) and information in which sector of the coordinate system associated with the stator is the stator flux vector of the induction motor. With the help of the switching table, the optimal voltage output vector is chosen which must be fed to the stator windings of the asynchronous motor in order to ensure a minimum deviation of the regulated quantities from the set values.

The choice of the optimal voltage vector is made from eight possible voltage base vectors [9]. DTC systems eliminated the shortcomings inherent in FOC systems: large amount of computations for forward and reverse transformation of a fixed and rotating coordinate system, the presence of a delay in the formation of an electromagnetic moment [9].

Construction of a mathematical model DTC system

In Fig. 5 the system of direct torque control in the MATLAB package is shown.

In Fig. 5 function block *numberkeys* calculates the potentials at the output of all the arms of the converter

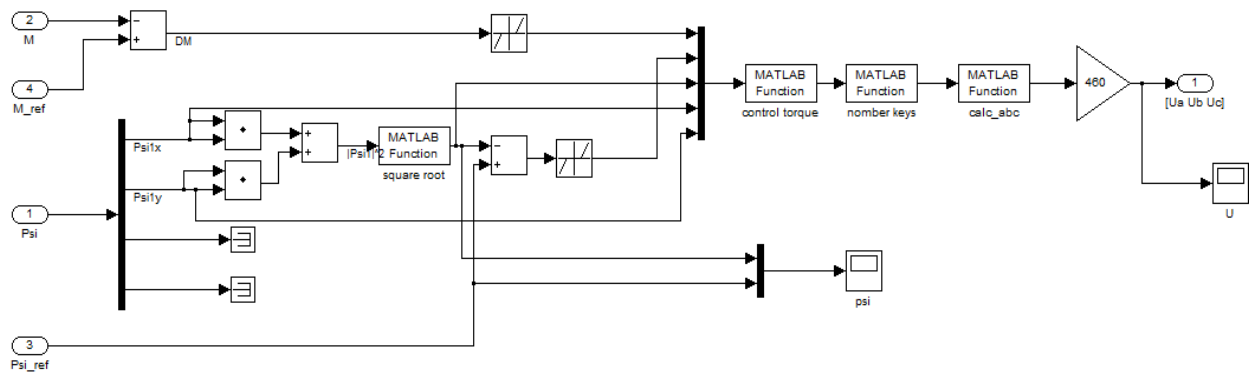


Fig. 5. The model of direct torque control

according to the switches provided by the key. In the event that both keys are closed, an error message is displayed.

The function block calc_abc calculates the phase voltages at the output of the inverter, depending on which voltage potentials are present at the output of its arms. The input for this function is the result obtained in the previous one.

A program is developed in the language MATLAB of direct torque control on the rotor.

Simulation results

For the simulation, we used the parameters of the motor of type 4A80A4, which are given in Tabl. 1, 2.

In the simulation of direct torque control, a stepped reference to the flux linkage at the time $t=0s$ after, a stepped reference to the torque at the time $t=0,2s$ and the stepped moment of resistance to the motor shaft is equal 1. The resulting transient processes with respect to the motor variables are shown in Fig. 6-11.

Table 1

Motor parameters

4A80A4	Efficiency, %	$\cos \varphi$	$P_{нв}$, kW	$S_{нв}$, rel. units	X_{m} , rel. units	R_1 , rel. units	X_1 , rel. units	R_2 , rel. units	X_2 , rel. units	J , $kg \cdot m^2$
	75	0,81	1,1	0,054	1,7	0,12	0,078	0,068	0,12	0,033

Table 2

Parameters of the substitution scheme

L_m , H	R_1 , Ohm	$L_{1\sigma}$, H	R_2 , Ohm	$L_{2\sigma}$, H
0,434	9,63	0,02	5,459	0,03

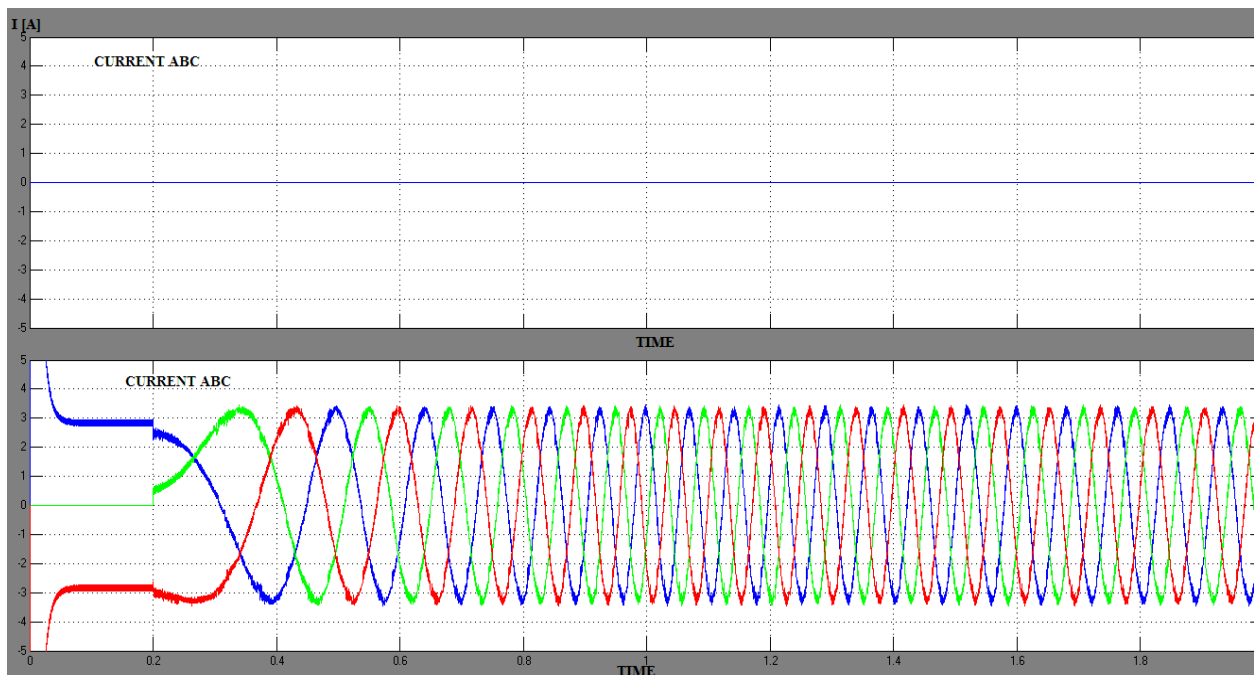


Fig. 6. Current dependence ABC from time

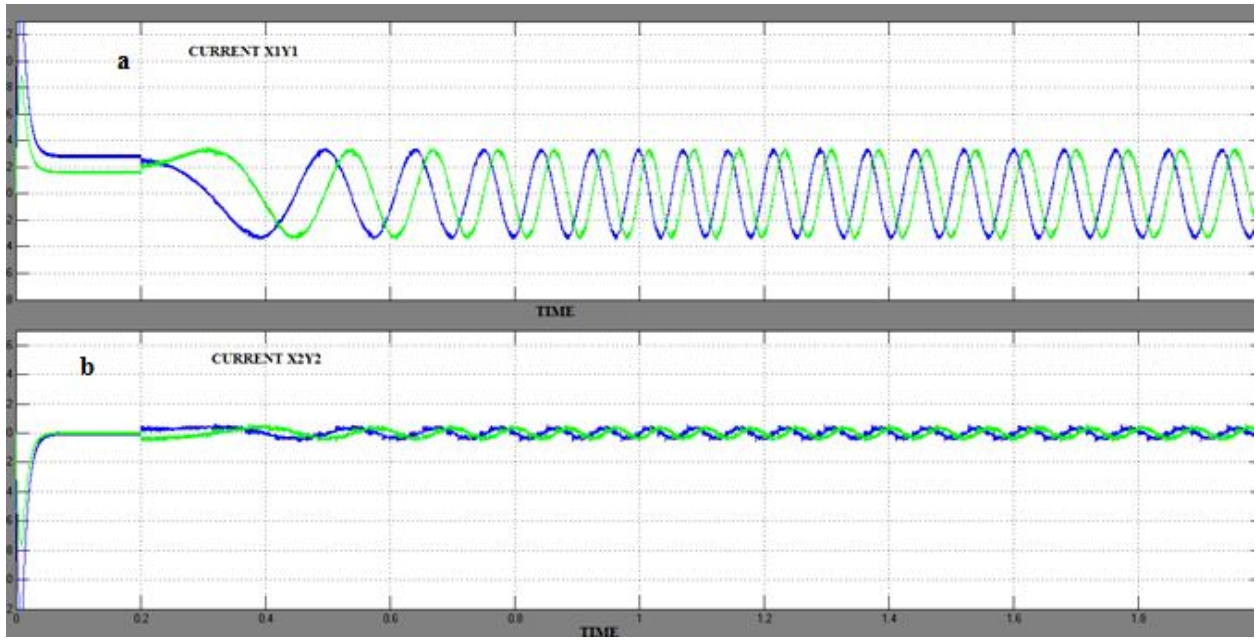


Fig. 7. Current dependence (a) stator XY; (b) rotor from time

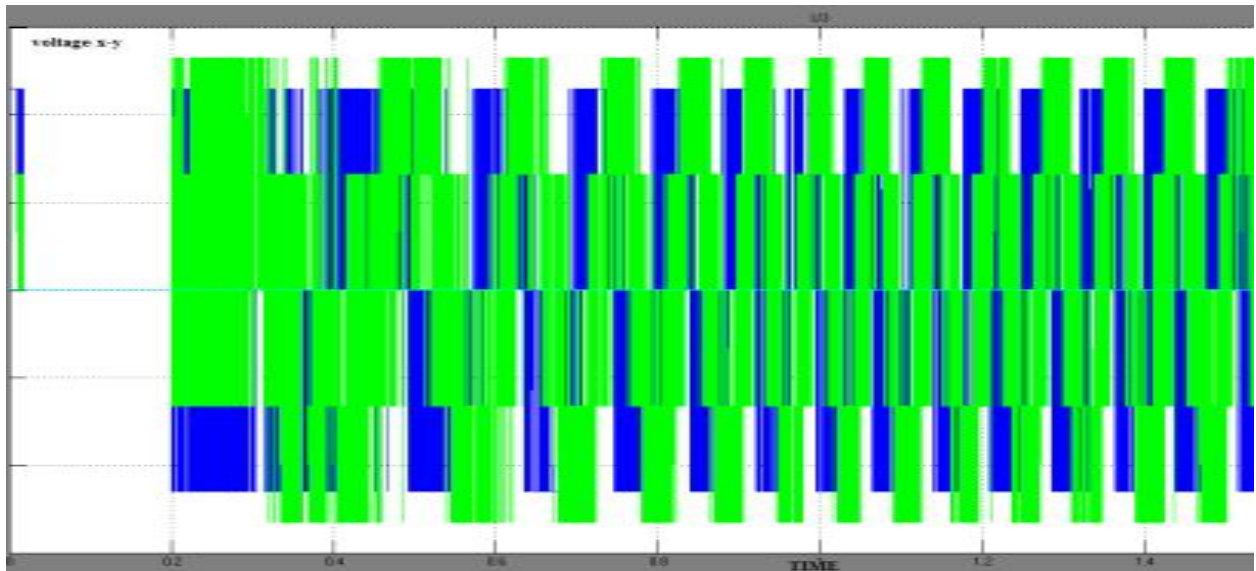


Fig. 8. Dependence of stator voltage in coordinates x-y from time

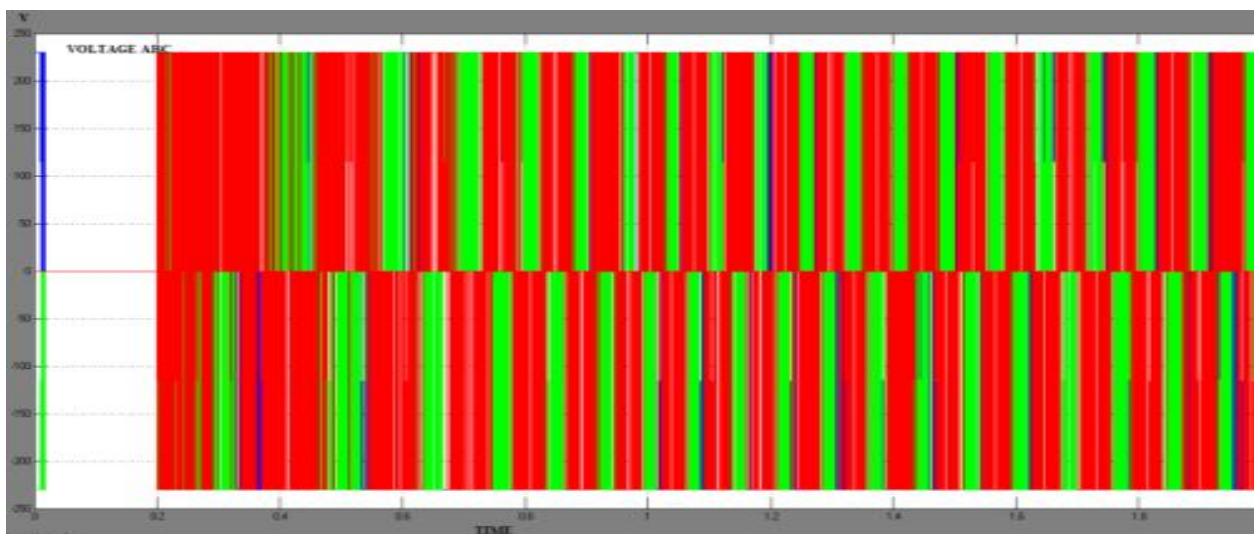


Fig. 9. Dependence of stator voltage in coordinates A-B-C from time

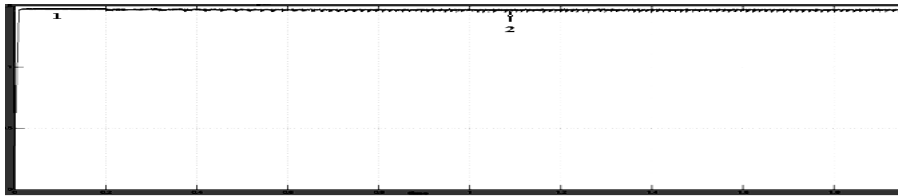


Fig. 10. Dependence of the flux linkage module (1) and power (2) from time

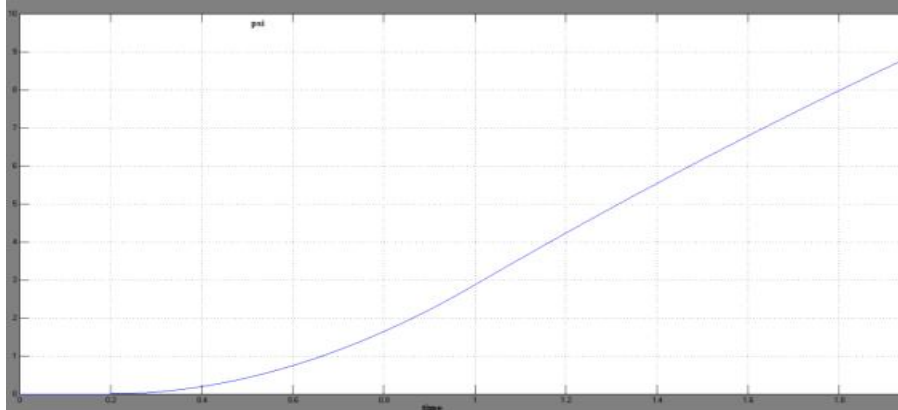


Fig. 11. Dependence of the angle of rotation from time

Conclusion

In this paper, a simpler mathematical model of an induction electric drive with direct torque control is developed. Modeling in the MATLAB package of a drive with an motor of the type 4A80A4 is made. The accuracy of torque and flux linkage obtained on the model is 0.041 and 0.02, respectively.

References

1. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г.Соколовский // учебник для студ. Высш. учеб. заведений, 2-е изд., испр. - М.: Издательский центр «Академия», 2007.-272 с.
2. Lamchich Tahar. Torque Control / Edited by Prof. Moulay Tahar Lamchich // Croatia: Publisher InTech, 2011. – 292 p.
3. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока / А.Б. Виноградов // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 298 с.
4. Muhammed H. Rashid. Power Electronics, Circuits, Derives and applications / H. Rashid Muhammed // Pearson Education Inc. 2004.
5. Trzynadlowski Andrzej M. Control of induction motor / Andrzej M. Trzynadlowski // London: Academic Press, 2001 – 228 p.
6. Chee-Mun Ong. Dynamic Simulation of Electric Machinery: Using MATLAB/SIMULINK / Chee-Mun Ong // Prentice Hall PTR, 1998 – 626 p.
7. Kopylov I.P. Mathematical Models of Electric Machines / I.P. Kopylov // translated from the Russian by P. S. Ivanov – Mir Publishers Moscow, 1984. - 280 p.
8. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Усольцев // Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006, – 94 с.
9. Merzoug M. S, Naceri F. Comparison of Field-Oriented Control and Direct Torque Control for Permanent Magnet Synchronous Motor. PWASET, vol. 35, nov. 2008.

Надійшла до редколегії 22.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ ПРЯМОГО УПРАВЛІННЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Ахмед Ібрахим Джабер Альзубайді, В.П. Дорогобід, Мохамед Сааді Хасан, М.К. Бороздін

У статті представлено математичний опис асинхронного двигуна з подальшим моделюванням в програмі MATLAB. У моделі реалізується метод прямого керування моментом (DTC). Основна ідея управління полягає в тому, що на кожному кроці розрахунку визначається оптимальний стан напруги інвертора, яке викликає зміна, як моменту, так і поточозчеплення статора в необхідному напрямку. Представлені отримані перехідні процеси.

Ключові слова: пряме керування моментом, вектор поточозчеплення, модель асинхронного двигуна, MATLAB, DTC.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОМЕНТОМ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Ахмед Ибрахим Джабер Альзубайди, В.П. Дорогобид, Мохамед Саади Хасан, Н.К. Бороздин

В статье представлено математическое описание асинхронного двигателя с дальнейшим моделированием в программе MATLAB. В модели реализуется метод прямого управления моментом (DTC). Основная идея управления заключается в том, что на каждом шаге расчета определяется оптимальное состояние напряжения инвертора, которое вызывает изменение, как момента, так и поточозчепления статора в необходимом направлении. Представлены полученные переходные процессы.

Ключевые слова: прямое управление моментом, вектор поточозчепления, модель асинхронного двигателя, MATLAB, DTC.

С.Г. Кислиця¹, Н.В. Єрмілова¹, Г.М. Кожушко²

¹ Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

² Полтавський університет економіки і торгівлі, Полтава

МЕТАЛОГАЛОГЕННІ ЛАМПИ: ДОСЯГНУТИЙ РІВЕНЬ ТА ШЛЯХИ ПОДАЛЬШОГО ПІДВИЩЕННЯ СВІТЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОЕКОНОМІЧНИХ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА

В роботі аналізуються сучасні конструкції та параметри комерційних зразків металогалогенних ламп провідних світових виробників, їх переваги та недоліки перед іншими енергоекономічними джерелами світла та проведено аналіз можливих шляхів подальшого підвищення світлових параметрів цих ламп.

Ключові слова: енергоекономічні джерела світла, металогалогенна лампа, керамічний пальник, кварцовий пальник, безелектродна лампа, світлова віддача, кольоропередача, строк служби.

Вступ

Металогалогенні лампи (МГЛ) є одними з найбільш ефективних джерел світла. Основними сферами використання МГЛ для загального освітлення є освітлення приміщень промислових, торговельних, громадських та інших об'єктів, де потрібні джерела світла з великими світловими потоками, хорошою якістю кольоропередачі та високою стабільністю світлових і колірних параметрів при великій тривалості горіння.

Перші МГЛ, які були створені в середині 60-х років минулого століття, конструктивно були подібні до ртутно-кварцових ламп високого тиску. Принципіальною різницею було те, що при виготовленні пальників ламп в них крім дозованої кількості ртуті та запалюючого газу, переважно аргону, вводили деякі елементи у вигляді галогенних сполук. Принцип дії ламп наступний: після розгоряння розряду і випаровування ртуті в пальнику лампи утворюється дуговий розряд високого тиску в парах ртуті. Галогенні сполуки при високій температурі кварцового пальника випаровуються і дифундують та вносяться конвективними потоками парів ртуті в зону розрядного каналу з температурою кілька тисяч градусів де вони розкладаються на атоми галогену та металів. При цьому метали частково іонізуються, збуджуються і випромінюють спектри характерні для цих металів. Для того, щоб лампа працювала тривалий час необхідно, щоб атоми, що входять в склад добавок, дифундуючи за межі розрядного каналу в зону з більш низькою температурою, знову з'єднувались в початкові хімічні сполуки не досягаючи колби і електродів і не створюючи хімічних сполук з матеріалами колби і електродів. Тобто протягом строку служби повинен підтримуватись замкнений фізико-хімічний цикл добавок.

Існує багато металів, котрі у вигляді галогенидів можуть бути використані як випромінюючі до-

бавки МГЛ. Аналіз літератури по МГЛ [1-6] показує, що найбільший вплив на збільшення світлової віддачі ламп дає введення галогенидів Na, Tl, Dy, Sc. Сполуки інших елементів не приводять до суттєвого збільшення світлової віддачі і вводяться для корекції кольоропередачі або для стабілізації дуги. Дещо спростивши картину, можна сказати, що на сьогоднішній день в світовій практиці використовуються чотири основних типи наповнень для освітлювальних МГЛ.

1. Лампи, випромінювання яких складається з невеликої кількості інтенсивних спектральних ліній і слабого континуума. Найбільш типовими для цієї групи є лампи з добавками йодидів Na, Tl, In.

2. Лампи, випромінювання яких складається з порівняно великої кількості інтенсивних спектральних ліній і слабого континуума. До цієї групи відносяться, головним чином, лампи з добавками йодидів Na, Sc.

3. Лампи, випромінювання яких складається з великої кількості тісно розміщених спектральних ліній, що заповнюють практично весь видимий спектр, і створюють враження безперервного спектру. Найбільш типовими представниками цієї групи ламп є лампи з добавками галогенидів рідкоземельних металів (Dy, Ho, Tm та ін.).

4. Лампи, що дають дійсно безперервний спектр випромінювання. До цієї групи відносяться лампи з галогенидами олова, а також галогенидами індію (за умови високого тиску їх парів) і деякі інші.

Найбільш повно фізичні основи роботи МГЛ та їх параметри викладено в [1-6].

Перші покоління МГЛ з кварцовими пальниками хоч і мали досить високу світлову віддачу (70-90 лм/Вт) та якість кольоропередачі ($R_a \sim 65-90$) при можливостях регулювання колірної температури в діапазоні 2700~6500 К через ряд недоліків не знаходили широкого застосування для внутрішнього загального освітлення. Основними недоліками МГЛ з

кварцовими пальниками перш за все були: низька стабільність світлових та колірних параметрів в процесі строку служби, великий розкид світлових та колірних параметрів між окремими лампами через розкид геометричних розмірів кварцових пальників, зміна колірності ламп в залежності від положення горіння, напруги живлення, теплового режиму ламп в світильнику. Вони також не могли конкурувати з натрієвими лампами високого тиску у зовнішньому освітленні, так як мали меншу світлову віддачу, стабільність світлового потоку і строк служби.

Метою даної роботи є аналіз сучасного технічного рівня МГЛ та дослідження шляхів подальшого підвищення світлової ефективності цих ламп.

Матеріал і результати дослідження

Одним з найбільш суттєвих вдосконалень, що дало поштовх для подальшого розвитку МГЛ відбулось на початку 90-х років минулого століття – були створені лампи з керамічними пальниками [7]. Пальники з полікерамічного оксиду алюмінію (ПКА) мають три ключові переваги над пальниками з кварцового скла (КС): більш висока робоча температура, що забезпечує високу світлову віддачу і покращені колірні характеристики; значно менша втрата натрію із пальника в процесі строку служби, що підвищує строк служби і стабільність колірних характеристик; пальники із ПКА можна виготовляти з більшою точністю їх геометричних розмірів, що зменшує розкид світлових і колірних параметрів між лампами.

Кінетика хімічної взаємодії між ПКА і деякими галогенідами така, що пальники можуть функціонувати при температурах близько 1150 °С в порівнянні з КС – 950 °С. Але перші розробки МГЛ з пальниками на основі ПКА мали проблеми з герметизацією та захистом електричних ввідів. Запобігання швидкого хімічного руйнування вакуумного впаю при високих температурах була вирішена в середині 90-х років шляхом використання для захисту спаю молібдену і натрію рідкоземельного алюмосилікатного скла. Хімічні реакції між захисним покриттям із скла практично відсутні через відносно низьку температуру ввідів.

Застосування пальників із ПКА дозволило уже в середині 90-х років досягти для комерційних зразків ламп потужністю 150 Вт світлової віддачі більше 93 лм/Вт при $R_a > 80$ та середній тривалості горіння більше 6000 год. Стабільність колірних параметрів протягом строку служби стала достатньо високою, а розкид цих параметрів між лампами настільки несуттєвим, що за цими показниками МГЛ наблизились до галогенних ламп розжарювання (ГЛР). При цьому ефективність МГЛ значно вища ніж у ГЛР.

В першому поколінні МГЛ з керамічними пальниками використовувалась та ж технологія výro-

бництва, що і для натрієвих ламп високого тиску (НЛВТ). Пальники виготовлялись із тонкостінної прозорої трубки із оксиду алюмінію, а для струмоводів використовувались керамічні шайби, через які пропускались вмонтовані в капіляри електроди. Герметизація електродних вузлів в капілярах здійснювалась скляним припоєм.

Одним із недоліків пальників із ПКА першого покоління була неоптимальна для МГЛ форма пальника. Наступне покоління МГЛ з ПКА з'явилося, перш за все тому, що пальнику вдалося надати округлену форму. Це дозволило оптимізувати тепловий режим пальника і зменшити термомеханічні напруження в місцях переходів від шайби до капілярів і запобігти утворенню мікротріщин, підвищити надійність та строк служби МГЛ. Рівномірна товщина стінок по всьому пальнику і оптимальна його форма дозволяє повніше використовувати потенціал розряду з випромінюючими добавками з врахуванням фізичних і хімічних процесів в пальнику. За останнє десятиріччя найбільш популярними об'єктами для вдосконалення серед розрядних ламп високого тиску стали МГЛ, перш за все МГЛ з пальниками на основі ПКА та малопотужні МГЛ. Створення цілого ряду серій малопотужних МГЛ дозволило їм конкурувати з люмінесцентними лампами (ЛЛ) та ГЛР у внутрішньому освітленні. Для малопотужних МГЛ, як правило, використовувались електронні пускорегулювальні апарати (ЕПРА). Світлова віддача таких ламп складає більше 90 лм/Вт, а строк служби 10-15 тис.годин. Лампи використовуються для освітлення торгових залів, вітрин, громадських та офісних приміщень. Номенклатура ламп складає десятки типорозмірів, в тому числі ламп спрямованого світла з кутами випромінювання від 8° до 60° та осью силою світла до 40 тис кд.

Провідними виробниками світлотехнічної продукції, такими як Philips, Osram уже подоланий рубіж світлової віддачі в 100 лм/Вт. Строк служби малопотужних МГЛ перевищує 15 тис. годин (при збереженні світлового потоку 80%, $T_{кол} = 3000$ К, $R_a > 90$). Інформація про конструктивні виконання і досягнуті параметри для МГЛ наведена в [8-10].

Компанія LUXIM (США) виробляє компактні безелектродні МГЛ з інтегрованими ЕПРА під торговою маркою «LiFi», які характеризуються високими значеннями параметрів табл. 1 [11].

Лампи «LiFi» володіють багатьма перевагами світлодіодних джерел світла, (СД), хоч і відрізняючись від них в деяких аспектах. Спільними для цих двох типів джерел світла є надійність напівпровідникових електронних пристроїв, спрямованість світлового потоку і можливість миттєвої зміни потужності. Відмінності полягають у тому, що лампи «LiFi» мають більші одиночні світлові потоки при малих габаритах суцільний спектр випромінювання, високий

індекс кольоропередачі ($R_a=94$) і високу світлову віддачу ($\eta > 100$ лм/Вт). І якщо світильники з СД краще всього підходять для сфер застосування, що вимагають малих і середніх світлових потоків, то лампи

«LiFi» підходять для сфер застосування, які вимагають великих світлових потоків, таких наприклад, як вуличне освітлення, освітлення приміщень з високими стелями та ін.

Таблиця 1

Порівняльні параметри енергоекономічних джерел світла

Джерело світла	Світлова віддача, лм/Вт	Індекс кольоро-передачі	Строк служби
Безелектродні лампи «LiFi»	115	80	50000
Кварцові металогалогенні лампи	85	75	10000
Керамічні металогалогенні лампи	100	90	15000
Світлодіоди	120	80	50000
Натрієві лампи високого тиску	125	20	24000

Лампи «LiFi» мають спільні особливості з іншими безелектродними джерелами світла, такими як індукційні лампи низького тиску: вони не потребують електродів для підведення енергії в колбу лампи і тим самим мають повністю герметизовані довговічні пальники. У той же час, лампи «LiFi» мають принципові відмінності від існуючих безелектродних ламп низького тиску, в яких для генерації світла зазвичай використовуються люмінофори.

Проведемо аналіз можливих шляхів підвищення світлової віддачі МГЛ. Світлові віддачу ламп можна виразити через ККД кожної спектральної лінії:

$$\eta_{\text{л}} = 683 \sum k_{\lambda} \cdot \eta(\lambda) = -683 \left(1 - \frac{U_{\text{ак}}}{U_{\text{л}}} \right) \cdot \left(1 - \frac{P_{\text{ІТ}}}{P_{\text{ІСТ}}} \right) \cdot \sum k_{\lambda} c_{\lambda}, \quad (1)$$

де $\eta_{\text{л}}$ - світлова віддача лампи; k_{λ} - відносна спектральна ефективність монохроматичного випромінювання для денного зору; $P_{\text{ІСТ}}$ - питома електрична потужність розрядного стовпа; $P_{\text{ІТ}}$ - питомі теплові втрати розрядного стовпа; $U_{\text{ак}}$ - розрахункове значення величини падіння анодно-катодного потенціалу; $U_{\text{л}}$ - напруга на лампі; c_{λ} - коефіцієнти для різних спектральних ліній або ділянок спектру, що визначаються тиском випромінюючих домішок і буферного газу, діаметром трубки.

З виразу (1) можна зробити висновок, що для підвищення світлової віддачі розрядної лампи високого тиску необхідно: намагатися досягти максимального значення $\sum k_{\lambda} c_{\lambda}$ шляхом вдалого вибору складу композиції випромінюючих добавок та тиску буферного газу; зменшувати питомі теплові втрати розрядного стовпа $P_{\text{ІТ}}$; збільшувати питому потужність стовпа $P_{\text{ІСТ}}$; збільшувати $U_{\text{л}}$.

Щодо зменшення $P_{\text{ІТ}}$ можливо досягти шляхом вибору буферного пару або газу з мінімальною теплопровідністю. Так як у більшості поширених конструкцій металогалогенних ламп як буферний газ

використовуються ртутні пари під тиском декілька атмосфер, то можливості зменшити питомі теплові втрати за рахунок теплопровідності буферного газу практично не існує. При використанні в якості буферного газу Хе світлова віддача МГЛ знижується.

Вважається, що питомі теплові втрати стовпа практично не залежать від умов розряду. Для ртутного розряду це дійсно так, оскільки теплові втрати пропорційні різниці температур каналу розряду й стінки, а інтенсивність випромінювання та електропровідність плазми експоненціально залежать від температури плазми. Однак, в металогалогенних лампах в значних межах змінюється діаметр розрядного каналу і, відповідно, товщина зони теплопровідності. Тому слід більш уважно розглянути питомі теплові втрати стовпа таких ламп з урахуванням діаметра розрядного каналу.

Якщо зробити спрощення, що в зоні теплопровідності відсутнє поглинання випромінювання, температура в каналі розряду постійна й дорівнює T_0 , а коефіцієнт, теплопровідності χ не залежить від температури, то тепловий потік через циліндричну поверхню з радіусом r одиничної висоти дорівнює:

$$P_{\text{ІТ}} = -\bar{\chi} \frac{dT}{dr} 2\pi r \quad (2)$$

Інтеграл від цього виразу має вигляд:

$$P_{\text{ІТ}} = \frac{2\pi\bar{\chi}(t_0 - t_{\text{СТ}})}{\ln(r_{\text{р}}/r_{\text{еф}})}, \quad (3)$$

де $t_{\text{СТ}}$ - температура внутрішньої стінки пальника; $r_{\text{еф}}$ - ефективний радіус розрядного каналу; $r_{\text{р}}$ - внутрішній радіус трубки; $\bar{\chi}$ - середній коефіцієнт теплопровідності ртуті в температурному діапазоні $t_0-t_{\text{СТ}}$.

При зміні ефективного радіуса каналу в межах $r_{\text{еф}}/r_{\text{р}} < 0,4-0,5$ значення величини $P_{\text{ІТ}}$, змінюються помірно і лише при $r_{\text{еф}}/r_{\text{р}} > 0,5-0,6$ починається його різке зростання. Таким чином, з метою підвищення

$\eta_{\text{ЛС}}$ в металогалогенних лампах потрібно забезпечувати умови розряду з радіусом розрядного каналу, що задовольняють вимозі $\Gamma_{\text{сф}}/\Gamma_{\text{ТР}} < 0,5$.

Відносно збільшення питомої потужності стовпа можна констатувати, що, з незначним зростанням питомих теплових втрат, воно підвищує ККД лампи. Є два шляхи збільшення $P_{\text{ЛСТ}}$: за рахунок збільшення градієнту потенціалу та за рахунок сили струму. Порівнюючи ці шляхи, можна дійти висновку, що збільшення градієнта потенціалу має ряд переваг, перед збільшенням сили струму:

- збільшення градієнта потенціалу можливо досягти шляхом підвищення тиску парів буферного газу (ртуті), яке в свою чергу підвищує вихід випромінювання за рахунок збільшення ширини резонансних ліній випромінюючих домішок;

- збільшення градієнта потенціалу за умови, що підвищення напруги в мережі не обмежується, дозволяє при тих же або й менших геометричних розмірах збільшити напругу на лампі $U_{\text{Л}}$ що зменшує частку електродних втрат $U_{\text{ак}}/U_{\text{Л}}$;

- збільшення сили струму розряду, крім збільшення частки електродних втрат, призводить також до збільшення кількості вільних зарядів у дузі, а отже підвищує ступінь іонізації випромінюючих домішок, що може знизити вихід випромінювання з розряду металогалогенних ламп.

В залежності від характеру задачі можливо змінювати питому потужність, геометрію пальника, кількість ртуті й випромінюючих домішок, силу струму в лампі. Інші параметри (температура пальника, тиск парів випромінюючої домішки і ртуті, радіус розрядного каналу та ін.) є залежними, тому, зі зміною $P_{\text{ЛСТ}}$ одночасно змінюється декілька факторів від яких в різній мірі залежить $\eta_{\text{Л}}$.

Нами проведено аналіз факторів, які мають впливати на світлотехнічні параметри МГЛ. У трубчастих металогалогенних лампах, що працюють у вертикальному положенні, уздовж стовпа часто спостерігається нерівномірний розподіл випромінювання по кольору і яскравості. Відомо, наприклад, що розподіл сили випромінювання ліній видимого спектру розряду високого тиску з добавками йодидів Na, Tl, In уздовж дуги вертикально працюючої лампи для окремих елементів значно відрізняється [12-14]. Жовте випромінювання резонансної лінії натрію концентрується в нижній частині пальника і різко убуває догори, у той час як сили випромінювання ліній Tl ($\lambda=535$ нм) і In ($\lambda=451$ нм) майже не змінюються по довжині.

Експериментально встановлено, що для ламп із йодидами Na і Sc (потужність 1000 Вт, довжина дуги 90 мм) світлова віддача дуги у верхній частині складає менш 60% від світлової віддачі в нижній її частині. В результаті цього світлова віддача лампи знижується на 17%. При цьому нерівномірний роз-

поділ випромінювання має місце і для Na і Sc. Якби вдалося досягти інтенсивності випромінювання ліній рівномірної по всій довжині розряду, причому рівної інтенсивності випромінювання в максимумі, то можна було б не тільки вирівняти колір світла вздовж дуги, але й істотно підняти світлову віддачу [13]. Дослідження показали, що розшаруванню піддаються добавки з невеликою атомною вагою і високим ступенем іонізації в дузі. З досліджуваних нами елементів Na найбільше змінює свою осьову концентрацію. Збільшення в дузі концентрації добавки, що піддана розшаруванню, чи введення більш легке іонізованої, що служить донором електронів, послабляє цей процес. Для випромінюючих добавок, осьова концентрація яких залишається практично постійної (Tl, In), осьовий розподіл випромінювання залежить тільки від зміни температури розряду і його температурного профілю. Для добавок, концентрація яких істотно змінюється уздовж осі, розподіл променистості залежить також від концентраційного розширення і реабсорбції резонансних ліній. Для таких випадків осьовий розподіл променистості може не співпадати з осьовим розподілом концентрації.

Характер розшарування випромінюючих добавок (наприклад, Na) у вертикально працюючої МГЛ не залежить від стану пару добавки (насиченого чи ненасиченого), а також від місця розташування конденсату – у нижній частині дуги концентрація нормальних атомів Na завжди значно вище, ніж в верхній (в 3-5 разів для розміру дуги 50 мм).

При зменшенні струму розряду зменшується радіальний градієнт концентрації нормальних атомів Na і Sc і зменшується ступінь розшарування їхньої осьової концентрації. Це підтверджує теоретичні передумови про те, що одним з головних механізмів виведення добавок з розряду МГЛ є амбіполярна дифузія.

Зі збільшенням тиску пару ртуті градієнт осьової концентрації добавки Na і Sc зменшується, однак характер розподілу залишається незмінним. Так як збільшення тиску пар ртуті приводить до інтенсифікації конвекційних потоків у пальнику, за рахунок яких у значній мірі здійснюється перенос йодидів металів у розряд, то для добавок працюючих у насичених парах (і з конденсатом в холодній зоні) воно додатково збільшує їхню концентрацію в дузі і може додатково змінювати осьовий розподіл променистості за рахунок розширення і реабсорбції резонансних ліній.

Зміна геометричних розмірів дуги істотно не змінює градієнт концентрації у вертикальному напрямку, однак за рахунок довжини дуги концентрації добавок на кінцях пальника можуть відрізнятися: для довгих дуг різниця значно вище, ніж для коротких, отже, і різниця в променистості теж більше.

Концентрація випромінюючих атомів Na у нижній частині горизонтально розташованої дуги більше, ніж у верхній. Вимірами променистості і спектрів ліній Tl і In по вертикальному перерізі дуги встановлено, що, як і у вертикально працюючих дугах, ці добавки практично не піддаються розшаруванню. За інших рівних умов – (температури холодної зони пальника, тиску буферної пари, градієнта потенціалу, довжини дуги) – у горизонтально працюючій дузі потенційні втрати світлового потоку за рахунок розшарування добавок менше, ніж у вертикальній.

Висновки

На підставі проведених досліджень та аналізу можна рекомендувати для підвищення світлової ефективності МГЛ наступне:

обрати склад випромінюючих добавок з максимальним значенням $\sum K_{\lambda} C_{\lambda}$;

зменшувати питомі теплові втрати розрядного стовпа;

збільшувати питому потужність розрядного стовпа $P_{1ст}$;

збільшувати напругу на лампі $U_{л}$;

забезпечувати умови розрядного каналу, що задовольняють $\Gamma_{ЕФ}/\Gamma_{ТР} < 0,5$;

підвищувати тиск випромінюючих добавок та буферного газу;

знижувати ступінь іонізації добавки шляхом підвищення її концентрації чи введення інших легкоіонізуючих елементів;

знижувати струм лампи (при збереженні питомої потужності стовпа) за рахунок збільшення градієнта напруги;

зменшувати вертикальні розміри дуги, зберігаючи при цьому такі параметри, як питома потужність стовпа, та температура холодної зони пальника;

забезпечувати оптимальні концентрації випромінюючих добавок, при яких максимум променистості (з урахуванням реабсорбції ліній) приходить на геометричний центр пальника.

Список літератури

1. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, – 1991. 720 с.
2. Уэймаус Д. Газоразрядные лампы. – М.: Энергия. 1977. – 344 с.
3. Кулаков И.А. Металлогалогенные газоразрядные лампы за рубежом (Обзор) // Светотехника. 1975. №11. – С. 21-27.
4. Маришак И.С. Современные высокоинтенсивные источники света // Серия: "Итоги науки и техники". Светотехника и инфракрасная техника. – М. 1976. Т. 4. – С. 87.
5. Jark A.C., Koedam M. Energy balances for some high pressure gas discharge lamps//J. Illum. Eng. Soc. 1974. V.3. N4. -P. 323-328.
6. Keffe William M. Energy balance of the scandium-sodium iodide arc lamp//Light Des.and Appl. 1974. V.4. N6. - P. 32-35.
7. Маклджон С.А. Металлогалогенные лампы с керамической горелкой. Светотехника №5. 1997. – С.27-29.
8. Прикупец Л.Б. Источники света на выставке "Light+Bulding-2010" Светотехника 2010. - №6. С.69-72.
9. Новые безэлектродные компактные МГЛ с электронными ПРА. Светотехника 2011. - №5.- С.77-80.
10. Прикупец Л.Б. Источники света на выставке "Light+Bulding-2012" Светотехника 2012. - №4. С.47-51.
11. Прикупец Л.Б. Исключительное становится привычным! Источники света на международной выставке "Light+Bulding-2016" Светотехника 2016. - №6. – С.75-79.
12. Zollweg R.J. Reducing additive saegregation in metal halide high-intensity discharge lamps//J. Illum. Eng. Soc. 1975. 5. №1. – P. 12-18.
13. Zollwed R.G. Convection in vertical mercury and metal-halide arc lamps, - J.Illum. Eng.Soc. 1979, m14, p.126-131.
14. Намитокос К. К., Кожушко Г. М. Осевое расщепление излучения разряда высокого давления в многокомпонентной среде // Вісник національного технічного університету ХПІ. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2001. - №16.- С. 121-124.

Надійшла до редколегії 9.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, доц. О.В. Шульга, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

МЕТАЛЛОГАЛОГЕННЫЕ ЛАМПЫ: ДОСТИГНУТЫЙ УРОВЕНЬ И ПУТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПОВЫШЕНИЯ СВЕТОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОЭКОНОМИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА

С.Г. Кислица, Н.В. Ермилова, Г.М. Кожушко

В работе анализируются современные конструкции и параметры коммерческих образцов металлогалогенных ламп ведущих мировых производителей, их преимущества и недостатки перед другими энергоэкономичными источниками света и проведен анализ возможных путей дальнейшего повышения световых параметров этих ламп.

Ключевые слова: энергоэкономичные источники света, металлогалогенные лампы, керамическая горелка, кварцевая горелка, безэлектродная лампа, световая отдача, цветопередача, срок службы.

METAL HALIDE LAMPS: THE ACHIEVED LEVEL AND WAYS TO FURTHER INCREASE THE LIGHT EFFICIENCY OF ENERGY-EFFICIENT LIGHT SOURCES

S.H. Kyslytsia, N.V. Yermilova, G.M. Kozhushko

The article analyzes modern designs and parameters of commercial samples of metal halide lamps from leading world manufacturers, their advantages and disadvantages over other energy-efficient light sources, and analyzes possible ways of further improving the light parameters of these lamps.

Key words: energy-efficient light sources, metal halide lamps, ceramic burner, quartz burner, electrodeless lamp, luminous efficiency, color rendition, service life.

Ю.В. Мельник, С.В. Козелков

Державний університет телекомунікацій, Київ

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ЕРГАТИЧНОЮ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЮ СИСТЕМОЮ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Обґрунтовано доцільність застосування методу перетворення інформативних психофізіологічних параметрів людини і алгоритму визначення узагальненого показника функціонального стану людини-оператора для досліджень ергатичних систем загального і спеціального призначення у порівнянні з традиційними статистичними методами.

Ключові слова: людина-оператор, функціональний стан, узагальнений показник, ергатична система.

Вступ

Надійне функціонування складних технічних систем залежить від функціонального стану людини, яка так чи інакше здійснює на них свій вплив. Якщо технічна складова надійності людина-машинних систем на даний час розроблена достатньо добре, то стан вивчення «людського фактору» все ще не задовольняє сучасним вимогам розвитку ергатичних систем (ЕрС). Дослідження людини, особливо людини-оператора (ЛО) в області інженерної психології, ергономіки, психології праці, медицини і фізіології виявили велику кількість об'єктивних і суб'єктивних різномірних показників діяльності і функціонального стану (ФС) людини. Для інженерної практики важливим є розуміння інтегрального характеру змін функціонального стану, а також безпосередній його зв'язок з динамікою ефективності робочої діяльності [1, 2].

Дослідження ФС людини-оператора (ФСЛО) стикаються зі значною різницею у формуванні та інтерпретації комплексу інформативних параметрів і методів дослідження [1, 3].

Основна частина

В загальному випадку структуру управління в ергатичній системі можна представити у вигляді, зображеному на рис. 1. Людина-оператор (ЛО) на підставі інформації про помилку $\bar{e}(t)$ між потрібним параметром задачі $\bar{r}(t)$ і її фактичним (поточним) значенням $\bar{y}(t)$ здійснює управляючий вплив $\bar{u}(t)$ на технічну систему (ТС) в умовах впливу оточуючого середовища як на ЛО $\bar{S}_L(t)$, так і на ТС $\bar{N}_T(t)$.

В залежності від виду системи управління можуть змінюватись умови формування і значення параметрів $\bar{r}(t)$, $\bar{y}(t)$, $\bar{e}(t)$, але в будь-якому випадку людина в ергатичній системі управління здійснює деякі керуючі впливи $\bar{u}(t)$ на підставі інформації про якість виконання задачі ТС $\bar{e}(t)$ в умовах впливу оточуючого середовища на ЛО

$\bar{S}_L(t)$ (на рис. 1 виділено пунктиром). Узагальнену модель управління ТКМ, у відповідності з ідеологією TMN, можна представити у вигляді зображеному на рис. 2.

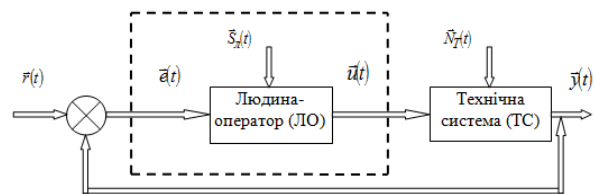


Рис. 1. Структура управління в ергатичній системі

Математична модель управління представляється в вигляді такої впорядкованої множини:

$$M_{УП} = \langle T, X, Y, U, Q, Z, L, F, \phi, P, C, A, B \rangle$$

де $T = \{t\}$ - множина моментів управління (керування), $X = \{x\}$ - множина вхідних впливів на КТС; $Y = \{y\}$ - множина вихідних відгуків КТС; $U = \{u\}$ - множина керуючих впливів на КТС; $Q = \{q\}$ - множина внутрішніх станів; $Z = \{z\}$ - множина цілей; L, F - оператори переходу станів і виходів відповідно $L: T \times X \times Q \rightarrow Q$, $F: T \times X \times Q \rightarrow Y$; ϕ - оператор алгоритму керування; $P = \{p(q)\}$ - множина ймовірнісних мір; $C = \{c(u)\}$ - множина вартості управління; $A = \{a(u)\}$, $B = \{\beta(u)\}$ - множина помилок управління першого і другого роду відповідно.

В основі будь-якого управління лежить інформація, яка може бути представлена впорядкованою парою множин $In = \langle X_K, Y_K \rangle$, тоді само управління має залежність через алгоритм $U = \phi(In, Z)$, де Z це підмножина вибраних цілей управління, а ϕ це оператор який формує керування U , $\phi: In \times Z \rightarrow U$.



Рис. 2. Узагальнена модель управління телекомунікаційною мережею

Багатьма дослідниками відмічається необхідність використання нових математичних методів в процесі прийняття рішень і діагностиці процесів управління в умовах неповної, нечіткої або неточної інформації, яка може бути оцінена вербально, але не піддається точному кількісному вимірюванню.

За цих обставин отримання зручного інструментального засобу визначення узагальненої кількісної оцінки ФСЛО, для використання в експертних системах прийняття рішення по надійності і ефективності роботи людини в ЕрС, є актуальною задачею наукового дослідження. Метою даної статті є запропонування методу перетворення інформативних психофізіологічних параметрів людини і алгоритму визначення узагальненого показника ФСЛО для досліджень ергатичних систем спеціального призначення.

Не викликає сумніву, що таке складне поняття, як функціональний стан, повинно розглядатись з точки зору системного підходу. Використовуючи категорію «система» і пов'язані з нею поняття, можна застосовувати ті підходи і результати, зокрема математичні, які довели свою ефективність при вивченні об'єктів і процесів різної природи.

Шляхи реалізації системного підходу до оцінки ФС відкривають статистичний і кібернетичний підходи, які широко використовуються при вивченні великих систем. Статистичний і кібернетичний підходи, дозволяючи досліджувати ФС з різних, незалежних один від одного позицій, разом дають можливість реалізувати так званий критерій наукової реальності Максвелла, який стверджує, що гіпотеза відбиває реальність, якщо вона підтверджується при використанні двох незалежних підходів, які приводять до одного і того ж результату [4].

Основними методами досліджень ФСЛО є статистичні методи [5-8]. В [9,10] запропонований кібернетичний підхід до визначення узагальненого показника ФСЛО ергатичних систем, центральним елементом якого є метод перетворення інформативних параметрів різного походження на основі нейро-нечіткої мережі (ННМ) при використанні в експертних системах прийняття рішення про ФСЛО.

Цей метод покладено в основу алгоритму визначення узагальненого показника ФСЛО ергатичної системи (рис. 3). Розроблений метод розрахований для застосування як в реальному часі (тобто під час виконання робочої діяльності), так і при лабораторних дослідженнях.

На даний час є багато напрацьованих і апробованих психофізіологічних методик для лабораторних досліджень, зокрема таких, що «імітують» робоче навантаження, але методик досліджень під час робочої діяльності ЛО практично немає. В даній ситуації способом підтвердження адекватності розробленого методу є його адаптація під конкретну апробовану методіку. Адаптована ННМ розробленого методу, в разі доведення її ефективності, може слугувати додатковим доказом застосовності для аналізу ергатичних систем різного призначення.

В якості апробованої «тестової» методіки обрана «Методика визначення узагальненого показника рівня функціонального стану людини (ПРФС)» [6]. Прототипом тестової методіки є патент на корисну модель «Спосіб оцінки рівня функціонального стану організму людини» [8].

Розрахунок ПРФС здійснюється шляхом співвідношення отриманих даних ФС досліджуваного з табличними показниками вікових норм параметрів за формулою [6, 8].



Рис. 3. Алгоритм визначення узагальненого показника ФСЛО ергатичної системи

$$\begin{aligned}
 \text{ПРФС} = & \left(\frac{\text{АТС}_\phi}{\text{АТС}_T} + \frac{\text{АТД}_\phi}{\text{АТД}_T} + \frac{\text{ЧСС}_{\text{сп}\phi}}{\text{ЧСС}_{\text{сп}T}} + \right. \\
 & \left. \frac{\text{ЧСС}_{\text{нав}\phi}}{\text{ЧСС}_{\text{нав}T}} + \frac{\text{ЖЄЛ}_T}{\text{ЖЄЛ}_\phi} + \frac{\text{СБ}_T}{\text{СБ}_\phi} + \frac{\text{М} / \text{ЗР}_\phi}{\text{М} / \text{ЗР}_T} \right) / N, \quad (1)
 \end{aligned}$$

де АТС, АТД - артеріальний тиск систолічний та діастолічний відповідно (мм. рт. ст.); ЧСС_{сп}, ЧСС_{нав} - частота серцевих скорочень у стані спокою і після навантаження відповідно (уд. хв.); ЖЄЛ - життєва ємність легенів (л); СБ - статичне балансування (с); М - маса тіла (г); ЗР - зріст (см); N - кількість показників, використаних у формулі, індекси φ і Т - фактичне і табличне значення показника. В залежності від ПРФС, особи, що досліджуються належать до різних груп. На основі проведених психофізіологічних досліджень встановлено, що середньостатистична норма ПРФС відповідає 0,97±0,02.

Згідно з алгоритмом (рис. 3), на підставі розробленої в [10] ННМ, адаптована нейро-нечітка мере-

жа розрахунку узагальненого показника ФСЛО $K_{\phi c}$ має вигляд, зображений на рис. 4.

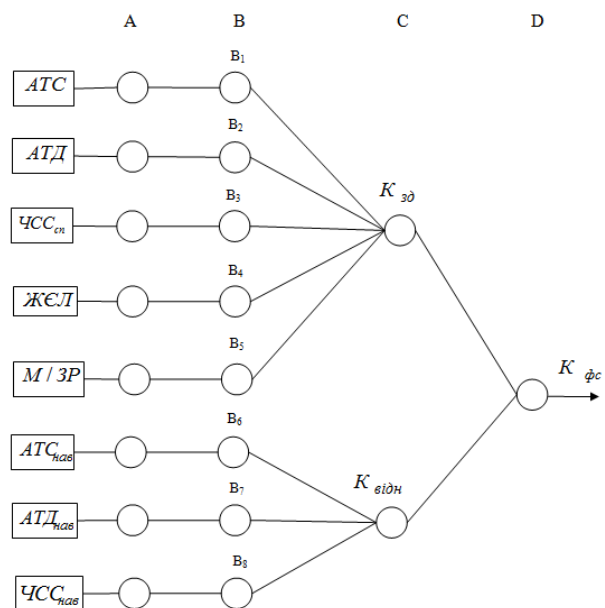


Рис. 4. Нейро-нечітка мережа розрахунку узагальненого показника ФСЛО

В даній ННМ $K_{зд}$ має сенс узагальненого показника здоров'я, $K_{відн}$ - узагальненого показника відновлювальних можливостей організму.

Для перевірки функціонування адаптованої ННМ згідно з методами нечіткого оцінювання, визначені вимоги до оцінок параметрів і вигляду кінцевого результату функціонування ННМ на основі узагальнюючої шкали бажаності Харінгтона [11, 12].

Стандартні відмітки на шкалі бажаності представлені в табл. 1.

Таблиця 1
Стандартні відмітки шкали бажаності

Бажаність	Відмітка на шкалі бажаності
Дуже добре	1,00 - 0,80
Добре	0,80 - 0,63
Задовільно	0,63 - 0,37
Погано	0,37 - 0,20
Дуже погано	0,20 - 0,00

Значення шкали бажаності добре збігаються з психофізіологічними уявленнями про процеси підтримання нормального стану функціонування живого організму. Під нормою розуміється інтервал, в межах якого кількісні коливання психофізіологічних процесів здатні утримувати живу систему на рівні

функціонального оптимуму [13].

На підставі даних [13, 16] інтервали норм для складових, які входять до формули (1), наведені в табл. 2. Для табл. 2 розрахункове значення АТС обчислюється за формулою $АТС_p = 109 + 0,4В$, де В - вік обстежуваного в роках [16]. Значення $ЧСС_{нав}$, $АТС_{нав}$, $АТД_{нав}$ обчислюються відносно поточного, в стані спокою, вимірюного значення відповідного параметру $\pm 20\%$ на кожний діапазон шкали бажаності.

Моделювання функціонування адаптованої ННМ виконувалося за допомогою програмного пакету Neuro Office. Швидкість розрахунку вхідних показників по 192 обстежуваним склала 0,043 мс на комп'ютері з застарілим процесором Celeron 1700 МГц. Дана обставина є перевагою методу у сенсі невибагливості до обчислювальних ресурсів.

Фрагмент результатів моделювання представлений в табл. 3. В цій же таблиці представлені оцінки стану обстежуваних по шкалі бажаності (прийняті позначення: ДДОБ – дуже добре, ДОБ – добре, З – задовільно, П – погано, ДП – дуже погано) та значення і оцінки ПРФС (для наочності виділені курсивом) згідно з [6] (ВС – вище середнього, С – середній рівень, НС – нижче середнього, Н – низький рівень).

Таблиця 2

Інтервали норм

Показники	Табличний норматив	Інтервали норм на шкалі бажаності			
		1 - 0,8	0,8 - 0,63	0,63 - 0,37	0,37 - 0,2
АТС	120	АТС _p - 105 АТС _p - 130	105 - 100 130 - 135	100 - 90 135 - 150	90 - 75 150 - 220
АТД	70	71 - 62 71 - 80	62 - 55 80 - 90	55 - 45 90 - 95	45 - 20 95 -
ЧСС _{сп}	65	72 - 64 72 - 80	64 - 60 80 - 84	60 - 49 84 - 95	49 - 32 95 - 170
ЖЄЛ	4,0	5,248 - 5,1 5,248 - 5,39	5,1 - 4,72 5,39 - 5,77	4,72 - 4,46 5,77 - 6,04	4,46 - 2,3 -
М/ЗР	400	397 - 380 398 - 415	380 - 350 415 - 430	350 - 340 430 - 450	340 - 320 450 - 521
ЧСС _{нав}	120	-	-	$\pm 20\%$ ЧСС _{сп}	$\pm 20\%$ ЧСС _{сп}

Таблиця 3

Результати моделювання ННМ

ППП	$K_{зд}$	$K_{відн}$	$K_{фс}$	Оцінка $K_{зд}$	Оцінка $K_{фс}$	ПРФС	Оцінка рівня ФС
М. А.В.	0,79	0,54	0,43	ДОБ	3	1,19	НС
М. О.В.	0,55	0,44	0,42	3	3	0,9	ВС
М. А.В.	0,62	0,56	0,35	3	П	1,5	?
С. К.Р.	0,66	0,48	0,32	ДОБ	П	1,27	Н
Ч. А.В.	0,73	0,67	0,49	ДОБ	3	1,03	С
Я. А.А.	0,44	0,56	0,25	3	П	1,98	?

На підставі порівняння даних, отриманих при моделюванні і розрахунку ПРФС за методикою [6], можна зробити наступні висновки:

1. По значенню ПРФС, розрахованому по методиці [6], на відміну від запропонованого $K_{\text{фс}}$, не завжди можна дати оцінку стану людини, що досліджується.

2. Розрахунок $K_{\text{фс}}$ здійснюється на підставі інтервалів норм вимірювання інформативних показників, а ПРФС - на підставі спеціально розрахованих табличних значень, що робить інтерпретацію таких значень суб'єктивними.

3. Запропонований метод дозволив розраховувати, як окрему характеристику, значення узагальненої оцінки відновлювальних можливостей обстежуваного $K_{\text{відн}}$. Ця характеристика дає представлення про рівень адаптаційних можливостей організму до навантаження і може бути використана як показник натренованості обстежуваного до виконання функціональних задач.

4. Запропонований метод дозволив автоматично врахувати значення $АТС_{\text{нав}}$ і $АТД_{\text{нав}}$, які за методикою [6] аналізувалися окремо.

Перевірка адекватності прогнозування ФС людини проводилася на основі даних обстежень, що були отримані після тривалих робочих навантажень. Фрагмент даних співставлення прогнозованих оцінок і отриманих при вимірюваннях після робочих

навантажень в табл. 4. З причини різного підходу до визначення кількісних показників безпосереднє їх порівняння неможливе. Тому в таблиці 4 подані лише кінцеві оцінки, за якими таке порівняння можна зробити.

При порівнянні повних даних табл. 3 і 4 можна зробити такі висновки:

1. У 65 % випадків прогноз оцінки рівня ФС обстежуваних збігся з оцінкою $K_{\text{фс}}$ після навантажень. Але прогноз для статистичних методів, яким є розрахований ПРФС, не може вважатись достовірним з причини однократності вимірювань, на відміну від прогнозу $K_{\text{фс}}$ і $K_{\text{зд}}$, який здійснюється на підставі інтервалів норм вимірюваних показників і не залежить від кількості вимірювань.

2. У 65 % випадків значення рівня здоров'я $K_{\text{зд}}$ збіглося з фактичними даними.

3. Розрахунок $K_{\text{фс}}$ на основі кібернетичного підходу до оцінки ФС показав результативність на рівні проведених статистичних досліджень, чим підтверджується його адекватність [4].

При відсутності надійних експертних висновків щодо інформативних параметрів, запропонований алгоритм дозволяє використовувати грубу, приблизну і недостовірну інформацію, з подальшим її уточненням по мірі накопичення фактичних даних. З цих позицій розроблений алгоритм є адаптивним і може застосовуватись як самостійний спосіб досліджень.

Таблиця 4

Співставлення прогнозованих і отриманих при вимірюваннях оцінок

Код досліджу	Оцінка (прогноз) $K_{\text{зд}}$	Оцінка $K_{\text{зд}}$	Оцінка (прогноз) $K_{\text{фс}}$	Оцінка $K_{\text{фс}}$	Оцінка рівня ФС (прогноз)	Оцінка рівня ФС
А1	ДОБ	З	З	П	С	С
Б1	ДОБ	ДОБ	З	З	С	С
Г1	З	ДОБ	П	З	С	С
К1	ДДОБ	ДДОБ	З	З	ВС	С
К2	ДОБ	ДОБ	П	П	В	С
М1	ДОБ	ДОБ	З	З	С	С
П1	ДОБ	ДОБ	З	П	С	С
Р1	ДОБ	ДОБ	П	З	С	С
С1	З	З	П	П	ВС	С

Адаптивність алгоритму знижує вимоги щодо кількості та репрезентативності вимірювань і переводить отримання узагальненого показника ФСЛО на суто кібернетичні позиції. Це положення дозволяє не фіксувати наявності або відсутності змін у порівнянні із заздалегідь вибраним еталоном, що характерно при статистичних вимірюваннях, а визначати і прогнозувати оптимум взаємозалежності між функціональними системами організму людини.

При послідовному зменшенні числа параметрів, що аналізуються, розроблений метод зберігає працездатність на рівні не менше ніж 50 % при зме-

ншенні кількості показників до двох, тоді як статистичний метод вже непрацездатний. Запропонований метод враховує можливість модифікації, пов'язаної з додаванням або вилученням інформативних параметрів, без зміни вихідної моделі і логіки функціонування ННМ (зміняться тільки кількість нейронів і внутрішніх зв'язків мережі, об'єм навчальної вибірки). Цей факт дає змогу дослідникам не повторювати зазвичай оригінальні методики досліджень, а експериментувати з різним набором вхідних даних для отримання прийнятного результату в залежності від кінцевої мети.

Різний розподіл вхідних параметрів за шкалами вимірювання, при застосуванні методів багатовимірного статистичного аналізу для визначення ФСЛО, вимагає перегляду кожний раз їх статистичних характеристик і встановлення, по суті, нових залежностей при формуванні кінцевого результату. Крім того, для збереження фізичного сенсу вимірних параметрів і їх розмірності при сумісній обробці необхідне зведення до єдиної безрозмірної однотипної шкали, що не є простою задачею [14, 15].

ВИСНОВОК

В розробленому методі перетворення інформативних параметрів застосовано спосіб отримання нечітких мір відповідності вимірних значень заданим вимогам без попереднього зведення шкал до однієї з вибраних. Це дозволяє оперувати з прийнятими рішеннями по кожному окремому показнику без узгодження його з іншими. Таким чином, запропонований алгоритм визначення ФСЛО нечутливий до розподілу за шкалами вимірювання вхідних параметрів і вільний від необхідності врахування їх статистичних характеристик.

Розроблений на основі методу перетворення інформативних параметрів різного походження алгоритм визначення узагальненого показника ФСЛО ергатичної системи має ряд переваг над традиційними математичними методами. Це дозволяє говорити про удосконалення методів математичної обробки інформації про ФС людини.

Список літератури

1. Леонова А.Б. Психодиагностика функциональных состояний человека. – М.: МГУ, 1984. – 200 с.
2. Медведев В.И. Проблемы общей теории трудовой деятельности // Физиология человека. – Т. 25, №3. – С. 5-7.
3. Сравнительная информативность показателей функционального состояния организма спортсменов / А.В. Муравьев, Л.Г. Зайцев, М.И. Симаков, Е.П. Сулов // Теория и практика физ. культуры. – 1996. - № 9. – С. 25-29.
4. Коган А.Б., Владимирский Б.М. Функциональное состояние человека-оператора: Оценка и прогноз. – Л.: Наука, 1988. – 212 с.

5. Интегральная оценка работоспособности при умственном и физическом труде. Методические рекомендации. – М.: Экономика, 1990. – 109 с.

6. Комплексна методика визначення психофізіологічного стану військовослужбовців на етапі професійного відбору для участі у міжнародних миротворчих операціях: Методичні рекомендації./ Під ред. М.Г. Маслової. – К.: ННДЦ ОТ і ВБ України, 2005. – 123 с.

7. Макаренко Н.В. Психофизиологические функции человека и операторский труд. – К.: Наук. думка, 1991. – 216 с.

8. Маслова М.Г., Поляков О.А., Мельник Ю.В. Декларационный патент на корисну модель „Спосіб оцінки рівня функціонального стану організму людини” Опубл. 15.03.2005. Бюл. № 3.

9. Мельник Ю.В. Людина-оператор в структурі управління ТМН мережі / Мельник Ю.В., Гаврилко Є.В. // Зв'язок. – 2017. – № 6(130). – с. 36-42.

10. Мельник Ю.В. Метод перетворення інформативних параметрів стану людини-оператора в ергатичних телекомунікаційних системах. Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2017. – № 3(56). – с. 104-110.

11. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грабовский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 279 с.

12. Алтунин А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. – Тюмень.: Изд-во ТГУ, 2000. – 352 с.

13. Основные показатели физиологической нормы у человека. / Под ред. И.М. Трахтенберга. – К.: Авиценна, 2001. – 372 с.

14. Кучук Г.А. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 117-120.

15. Коваленко А.А. Сучасний стан та тенденції розвитку комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування / А.А. Коваленко, Г.А. Кучук // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава. ПНТУ, 2018. – Вип. 1(47). – С. 110-113.

14. Войнов В.Б., Воронов Н.В., Золотухи В.В. Методы оценки состояния систем кислородобеспечения организма человека. Учебно-методическое пособие. – Ростов-на Дону: Ростовский гос. ун-т, 2002. – 99 с.

Надійшла до редколегії 30.01.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ЭРГАТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ю.В. Мельник, С.В. Козелков

Обоснована целесообразность применения метода преобразования информативных психофизиологических параметров человека и алгоритма определения обобщенного показателя функционального состояния человека-оператора для исследований эргатических систем общего и специального назначения по сравнению с традиционными статистическими методами.

Ключевые слова: человек-оператор, функциональное состояние, обобщенный показатель, эргатическая система.

FEATURES OF THE MANAGEMENT BY THE ERGOTAL TELECOMMUNICATION SYSTEM OF SPECIAL PURPOSE

Yu.V. Melnik, S.V. Kozelkov

The expediency of using the method of transformation of informative psychophysiological parameters of a person and the algorithm of determination of the generalized index of the functional state of a human operator for the research of ergatic systems of general and special purpose in comparison with traditional statistical methods is substantiated.

Keywords: human-operator, functional state, generalized index, ergatic system.

В.И. Носков, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко, В.И. Панченко

Национальный технический университет «ХПИ», Харьков

ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В БОРТОВОЙ СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЕЗДА ДЭЛ-02

Показано, что наличие упругих связей в системе передачи момента, а также постоянно изменяющихся условий сцепления колеса с рельсом приводят к колебаниям на выходе датчика частоты вращения ротора. Проведён анализ различных способов сглаживания этих сигналов. Приемлемым оказалось сглаживание сигналов путём вычисления простого скользящего среднего. Предлагается обработка сигналов, получаемых с датчиков частоты вращения двигателей в тяговом асинхронном приводе.

Ключевые слова: датчик частоты вращения, тяговый асинхронный привод, система передачи момента, обработка сигналов.

Введение

Постановка проблемы и анализ литературы. Одним из важнейших направлений технического развития железнодорожного транспорта является внедрение в тяговых приводах (ТП) трёхфазных асинхронных двигателей. ТП с тяговыми

асинхронными двигателями (ТАД) обладает лучшими технико-экономическими показателями по сравнению с ТП с двигателями постоянного тока [1, 2]. В отечественном дизель-поезде ДЭЛ-02 применяется ТП с ТАД.

Структурная схема ТП моторного вагона дизель-поезда приведена на рис. 1.

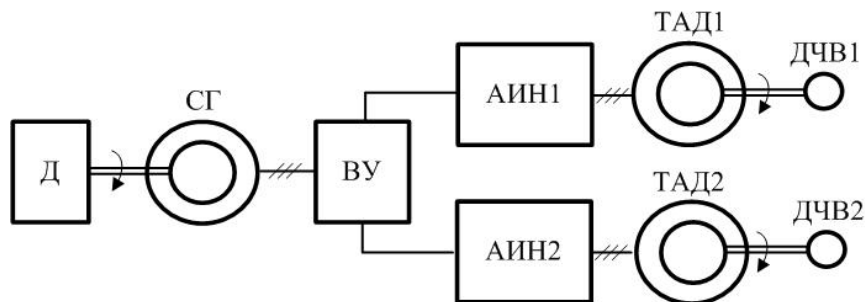


Рис. 1. Структурная схема ТП моторного вагона дизель-поезда ДЭЛ-02: Д – дизель, СГ – синхронный генератор, ВУ – выпрямительная установка, АИН1, АИН2 – автономные инверторы напряжения, ТАД1, ТАД2 – тяговые асинхронные двигатели, ДЧВ1, ДЧВ2 – датчики частоты вращения

Создание современного и экономически эффективного электропривода для тягового подвижного состава потребовало разработки микропроцессорной системы управления, что, в свою очередь, привело к необходимости применения новых средств измерений и обработки сигналов. К числу таких сигналов относится частота вращения ротора ТАД.

Информация по частоте вращения ротора даёт возможность определять неисправности ТАД, реализовать систему автоматического регулирования (САР) тягового электропривода, обеспечить защиту от боксования и юза и др. На дизель-поезде ДЭЛ-02 с ТАП измерение частоты вращения ротора ТАД выполнено с помощью ДЧВ, состоящего из шестерни с большим числом зубьев, которая установлена на валу ТАД, и чувствительного элемента – датчика, использующего эффект Холла. Вращающий момент

от ТАД к колёсной паре передаётся через ряд упругих элементов (рис. 2).

Наличие упругих связей в системе передачи момента, а также постоянно изменяющихся условий сцепления колеса с рельсом, могут вызывать колебания тягового момента, которые передаются на ротор ТАД и приводят к колебаниям сигнала частоты на выходе ДЧВ. Поскольку к сигналу предъявляются достаточно высокие требования по качеству, быстродействию и разрешающей способности, возникает необходимость применения обработки данного сигнала.

Целью статьи является исследование на математической модели системы привода отечественного дизель-поезда ДЭЛ-02 для оценки колебаний частоты вращения ротора ТАД, а также разработка эффективного средства для сглаживания выходной частоты ДЧВ.

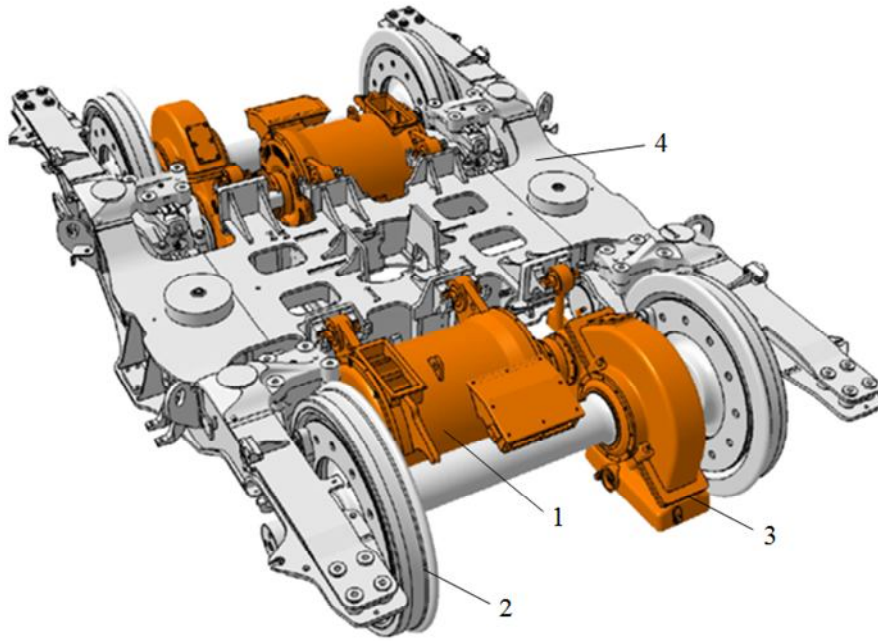


Рис. 2. Моторная тележка дизель-поезда ДЭЛ-02:
1 – тяговый асинхронный двигатель, 2 – колёсная пара, 3 – редуктор, 4 – рама

Основная часть

Задаче синтеза математических моделей электромеханической системы электропривода посвящено множество работ [3 – 6]. Однако, практический интерес представляет исследование электромеханической системы ТАП на математической модели, которая учитывает реализацию момента вращения ТАД при взаимодействии КП с рельсами и описывается системой дифференциальных уравнений высокого порядка. При этом, удовлетворительные результаты можно получить и на более простой модели [7, 8], которая описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{J_{1Д}} (iM_{эл} - k(U_{\delta}, V_t)\Psi_0\Pi_k R_k) + \delta_1(t),$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{J_{2д}} \left(c(\omega_1 - \omega_2) + b(\phi_1 - \phi_2) - k(U_{\delta}, V_t)\Psi_0\Pi_k R_k \right) + \delta_2(t), \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_1}{dt} = \omega_1, \quad \frac{d\phi_2}{dt} = \omega_2,$$

где ω_1, ω_2 – угловые скорости шестерни и колесной пары соответственно; δ_1, δ_2 – случайные возмущения; $J_{1Д}$ – моменты инерции ротора ТАД, шестерни, редуктора, полого вала, которые приведены к оси КП; $J_{2д}$ – момент инерции КП; i – передаточное число редуктора; $M_{эл}$ – электромагнитный момент ТАД; $k(U_{\delta}, V_t)$ – нелинейный коэффициент, зависящий от скорости дизель-поезда V_t и скорости боксования U_{δ} ; Ψ_0 – потенциальное значение коэффициента сцепления КП с рельсом; Π_k – текущее

значение сцепного веса КП; R_k – радиус колес КП; ϕ_1, ϕ_2 – углы поворота шестерни и КП; c – жесткость упругих связей в системе привода; b – коэффициент рассеивания энергии колебаний упругих связей; $M_{сц} = k(U_{\delta}, V_t)\Psi_0\Pi_k R_k$ – момент сцепления КП с рельсом.

Анализ результатов, полученных на математической модели (1), подтвердил наличие фрикционных колебаний в электромеханической системе ТАП дизель-поезда. Поскольку конструктивное исполнение механической части привода не подлежит изменению, возникла необходимость в разработке программных средств для сглаживания колебаний частоты ДЧВ. Был проведён анализ различных способов сглаживания. Так, сглаживание колебаний частоты с помощью её усреднения по нескольким импульсам или на определённом временном интервале (2) неприемлемо из-за снижения точности и быстродействия, что равноценно уменьшению числа зубьев шестерни ДЧВ.

$$x_i = \frac{1}{m} \sum_{j=-\frac{m}{2}}^{\frac{m}{2}-1} x_{i+j}, \quad (2)$$

где x_i – показание датчика частоты в момент времени i ; m – величина временного интервала.

Приемлемым оказалось сглаживание частоты ДЧВ путём вычисления простого скользящего среднего, которое численно равно среднему арифметическому значений за установленный период:

$$X_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} p_{t-i} = \frac{p_t + p_{t-1} + \dots + p_{t-n+1}}{n}, \quad (3)$$

где X_t – значение простого скользящего среднего в точке t ; n – количество значений исходной функции для расчёта скользящего среднего (сглаживающий интервал); p_{t-i} – значение исходной функции в точке $t-i$.

Для случая измерения частоты с ДЧВ в качестве исходной функции используется период времени между соседними импульсами t_i , тогда скользящее среднее значение периода может быть получено следующим образом:

$$X_t = X_{t-1} - \frac{p_{t-n}}{n} + \frac{p_t}{n}, \quad (4)$$

где X_t – значение простого скользящего среднего в точке t ; X_{t-1} – предыдущее значение простого скользящего среднего; p_{t-n} – значение периода в точке $t-n$; p_t – значение периода в точке t .

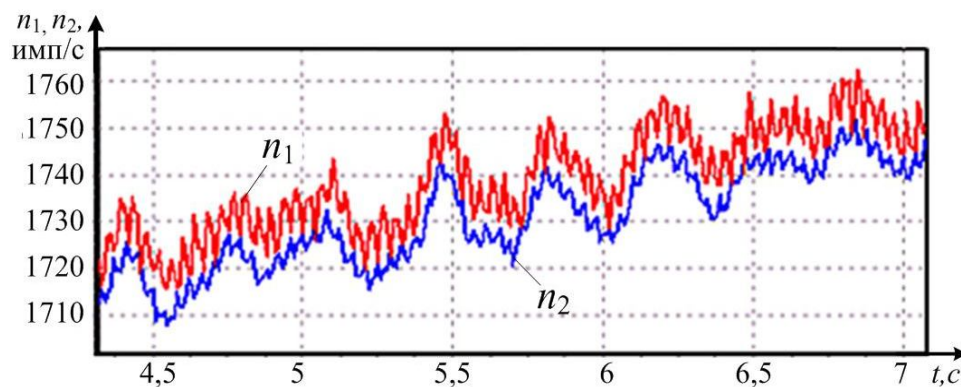


Рис. 3. Частота на выходе датчиков без предварительной обработки

При использовании в САР тяговых приводах сглаживания частоты методом простого скользящего среднего информация о частоте вращения ротора ТАД получается с приемлемой точностью и качеством.

Достаточно просто может быть получен параметр ускорения локомотива путём дифференцирования частоты:

$$a = \frac{df_t}{dt}. \quad (6)$$

Ускорение относится к числу основных параметров дизель-поезда, которые проверяются при его сдаче в эксплуатацию.

Использование метода простого скользящего среднего на дизель-поезде ДЭЛ-02 позволило реализовать все требования предъявляемые к ТП с компьютеризованной системой автоматического регулирования в части статических и динамических характеристик.

В частности, на рис. 4 представлено изменение сигналов ускорения дизель-поезда, а также частоты

Тогда частота f_i сглаживаемых импульсов, которая соответствует частоте вращения ротора ТАД, будет равна:

$$f_t = \frac{K}{X_t}. \quad (5)$$

На рис. 3 приведено изменение сигналов с датчиков частоты вращения двух тяговых асинхронных двигателями, полученных в процессе проведения наладки тяговых приводов (n_1, n_2 – количество импульсов в секунду с ДЧВ1 и ДЧВ2 соответственно).

Характер изменения данных сигналов свидетельствует о наличии колебаний тяговых приводов и соответствует колебаниям частоты на выходах датчиков частоты вращения, что подтверждает результаты исследования процессов в системе дизель-поезда на математической модели.

вращения ротора ТАД1, вычисленные бортовой САР ТП с использованием метода простого скользящего среднего.

Как видно из рис. 4, сигналы имеют гладкую форму и могут быть использованы для реализации в других подсистемах САР.

Выводы

Исследования на математической модели системы привода отечественного дизель-поезда ДЭЛ-02 подтвердили наличие фрикционных колебаний, которые приводят к колебаниям частоты на выходе датчика.

Проведя анализ различных способов сглаживания сигналов, получаемых с датчиков частоты вращения двигателей в тяговом асинхронном приводе, оказалось, что наиболее приемлемым является сглаживание сигналов путём вычисления простого скользящего среднего.

Описанный метод обработки сигналов был использован в САР электропередачи украинского дизель-поезда ДЭЛ-02.

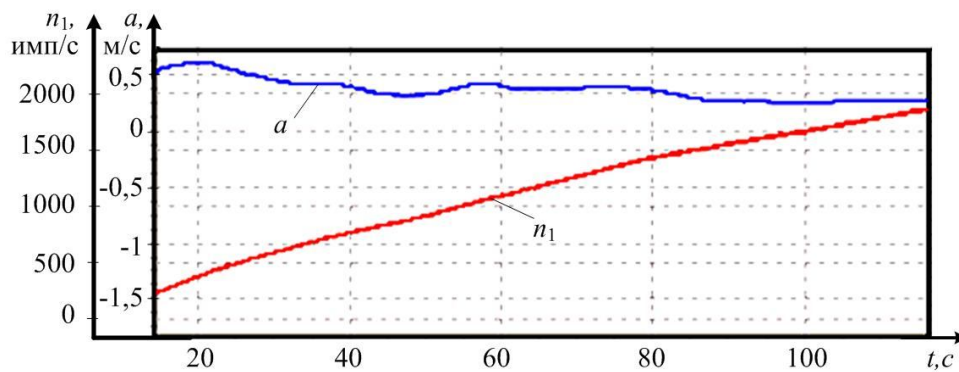


Рис. 4. Изменение сигналов ускорения дизель-поезда (а) и частоты вращения ротора ТАД1 (n_1) с предварительной обработкой

Список литературы

1. Зубенко Д.Ю. Исследование с помощью математических моделей тяговых асинхронных электроприводов скоростных электропоездов / Д.Ю. Зубенко // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. – Х.: 2007. – №7 – С. 337 – 344.
2. Хворост М.В. Тяговый асинхронный электропривод для мського електротранспорту / М.В. Хворост, М.І. Шпіка, А.І. Бесараб // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – №3. – С. 7 – 10.
3. Орловский И.А. Учёт упругих связей и распределённой нагрузки при векторном управлении асинхронным тяговым приводом дизель-поезда / И.А. Орловский, А.Н. Кулешов // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2007. – Вып. 19. – С. 209 – 213.
4. Глазырин А.С. Математическое моделирование электромеханических систем, аналитические методы: учебное пособие / А.С. Глазырин. – Томск: изд. Томского политехнического университета. – 2009. – 216 с.
5. Федяева Г.А. Моделирование перспективного маневрового тепловоза с векторным управлением асинхронным тяговым приводом / Г.А. Федяева // Вест. Брянского техн. ун-та. – 2007. – №3 (15). – С. 39 – 45.

6. Федяева Г.А. Математическое моделирование электромеханических процессов в асинхронном тяговом приводе тепловоза ТЭМ21 / Г.А. Федяева, В.Н. Федяев // Вестник ВНИИЖТ. – 2005. – №6 – С. 39 – 45.

7. Заполовский Н.И. Моделирование тягового электропривода дизель-поезда с учетом сцепления колесных пар с рельсами / Н.И. Заполовский, С.И. Червонный, Р.М. Грыб // Вестник НТУ «ХПИ». Сборник научных трудов. Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2006. – №23. – С. 61 – 66.

8. Носков В.В. Моделирование электромеханической системы моторного вагона с учетом диссипативных сил / В.И. Носков, А.Ю. Заковоротный, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко // Автоматизированные технологии и производства. – Изд. МГТУ им. Г.И.Носова. – 2016. – №3 (13) – С. 31 – 36.

Надійшла до редколегії 30.01.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ОБРОБКА СИГНАЛІВ У БОРТОВІЙ СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДУ ДЕЛ-02

В.І. Носков, Н.В. Мезенцев, Г.В. Гейко, В.І. Панченко

Показано, що наявність пружних зв'язків в системі передачі моменту, а також постійно змінюючихся умов зчеплення колеса з рейкою призводять до коливань на виході датчика частоти обертання ротора. Проведено аналіз різних способів згладжування цих сигналів. Прийнятним виявилось згладжування сигналів шляхом обчислення простого ковзного середнього. Пропонується обробка сигналів, які надходять з датчиків частоти обертання двигунів в тяговому асинхронному приводі.

Ключові слова: датчик частоти обертання, тяговий асинхронний привід, система передачі моменту, обробка сигналів.

PROCESSING OF SIGNALS IN THE AIRBOARD CONTROL SYSTEM OF DIESEL-TRAIN DEL-02

V.I. Noskov, N.V. Mezentsev, G.V. Geiko, V.I. Panchenko

It is shown that the presence of elastic bonds in the torque transmission system, as well as the constantly changing conditions for the adhesion of the wheel to the rail, lead to oscillations at the output of the rotor speed sensor. The analysis of various ways of smoothing of these signals is carried out. The smoothing of signals by computation of the simple moving average was acceptable. It is proposed to process signals received from the engine speed sensors in the traction asynchronous drive.

Keywords: speed sensor, traction asynchronous drive, torque transmission system, signal processing.

О.В. Скакаліна

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

ІННОВАЦІЙНА КОНЦЕПЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ РОЗПОДІЛЕНИМИ СИСТЕМАМИ

На сучасному етапі розвитку світового виробництва проблема створення і управління великими складними територіально-розподіленими системами зайняла центральне місце як в науці, так і в розвитку суспільства. Зазвичай великі складні розподілені системи вимагають для своєї діяльності великих пулів ресурсів-матеріальних, людських, фінансових, енергетичних, адекватне управління котрим неможливо без застосування інтелектуальних інформаційних технологій. Одною із основних тенденцій розвитку інформаційних технологій та інформаційних систем є проблема інтеграції зазначених технологій та систем з існуючими та майбутніми виробничими та соціально-економічними структурами і відповідними системами управління. В роботі представлені результати розробки і впровадження комплексу інформаційних технологій для оптимізації управління складними розподіленими системами в контексті обраного критерію мінімізації вартості витратної частини бюджету. Методологія досліджень базується на основі теорії систем та системного аналізу, гібридних генетичних алгоритмів, теорії нечітких множин, методу групового урахування аргументів. Наведені результати верифікації запропонованих інформаційних технологій на об'єктах різних предметних областей – агровиробництва, енергетичної галузі, логістики. Процент оптимізації витратної частини виробничого або процесного циклу знаходиться в інтервалі від 4,6% до 28%.

Ключові слова: складні територіально-розподілені системи, інформаційні технології, гібридні генетичні алгоритми, нечіткі множини, метод групового урахування аргументів.

Вступ

Стрімкий розвиток цифрової економіки вимагає відповідного розвитку інформаційних систем (ІС) та інформаційних технологій (ІТ), змінює напрямки державної стратегії на подолання сучасних викликів з боку необхідності побудови відносин з світовими гігантами ІТ-індустрії (Google, Apple, Facebook та Amazon), сумарна капіталізація котрих перевищила ВВП багатьох розвинених країн Євросоюзу. Для України постає питання вибору пріоритетів, яке вимагає надзвичайно швидкого трансформування традиційної економіки в її традиційної парадигмі до сучасної інформаційної інтелектуальної цифрової економіки, що передбачає синергетичний ефект від побудови фундаменту з концепцій «цифрова економіка», «економіка знань», «інформаційне суспільство». В цьому контексті набуває велику значущість процес «споживання» ІТ-продукції. Тобто – не тільки виробляти потужні ІТ-рішення для інших країн, а і впроваджувати сучасні ІС та ІТ в національних секторах виробництва.

Крім того, аналіз глибинних тенденцій в енергетичній та сировинній геополітиці свідчить про різке зростання потреб в енергії, природних ресурсах, продуктах харчування, що призведе до загострення напруженості в зв'язку з доступом до цих ресурсів. Виробниками і водночас споживачами цих ресурсів є складні територіально-розподілені системи (СТРС) або – господарюючі суб'єкти, для котрих задачі управління великими пулами ресурсів (трудових, фінансових, матеріальних та ін.) є найбільш актуальними та значущими.

В умовах непередбачуваних напрямків розвитку світової виробничої системи застосування інтелектуальних інформаційних технологій є необхідним засобом для прийняття стратегічних рішень по наступним напрямкам : розробка стратегій державного регулювання сегментів ринку, інтеграційні процеси економіки України та ЕС, підвищення інвестиційної привабливості національних господарюючих суб'єктів, в тому рахунку агрохолдингів (АХ), вертикально-інтегрованих національних компаній (ВІНК), кластерний розвиток територіальних утворень.

Тому однією з актуальних наукових задач є задача оптимізації управління складними територіально – розподіленими системами, до котрих відносяться виробничо-економічні системи. Основним видом виробничо-економічної системи є сучасне підприємство, тобто господарюючий суб'єкт. В якості такого суб'єкту може виступати агрохолдинг, нафтогазова компанія, енергетичний комплекс, інформаційні системи, галузеві системи управління, крупні банківські структури та їм подібні складні територіально розподілені системи.

Проблемам створення, функціонування та управління складними системами присвячено багато робіт національних та закордонних вчених : В.М. Глушкова, В.С. Михалевича, О.Г. Івахненка, М.З. Згуровського, Н.Д. Панкратової, С.Ф. Матвієвського, Е.А. Федосова, В.А. Віттиха, М.А. Кузнєцова, С. Лупі, І.В. Прангішвілі, У.Р. Ешбі, Л. Берталанфі, Л.В. Канторовича, І.Р. Прігожина, Т. Сааті, У. Індена та ін.

Наукові здобутки цих вчених закладені до фундаменту методології системного аналізу складних

взаємопов'язаних об'єктів різної природи, які функціонують в умовах множини суперечливих критеріїв, цілей, за наявності ризиків різної природи, значного впливу зовнішніх факторів.

Подальший розвиток інформаційних технологій в управлінні складними системами, системами підтримки прийняття рішень та інших видах автоматизованих інформаційних систем відображений в роботах вітчизняних та зарубіжних авторів А.О. Морозова, В.В. Литвинова, О.Ф. Волошина, В.Є. Снитюка, Д.Захмана, К. Мелоні, Р.Ченга, Д. Дешривейра та ін.

Наукова і практична цінність досліджень та розробок перелічених вище авторів в рішенні як загально-системних, так і окремих задач управління складними територіально-розподіленими системами є значною і всесвітньо визнаною. Однак в сучасних умовах пошук оптимальних рішень для застосування інформаційних технологій в оптимізації управління складними територіально-розподіленими системами повинен застосовувати стратегії мульти-алгоритмічності, гібридності, модульності, впровадження концепції інтегрованого застосування гібридних алгоритмів.

Проведений аналіз існуючих моделей управління складними територіально – розподіленими системами (СТРС) як інтегрованими структурами та ступень відповідності впроваджених в СТРС ERP, BPM та інших систем корпоративного управління сучасним потребам СТРС в оптимізації всіх існуючих видів виробничої та супроводжувальної діяльності господарюючих суб'єктів дозволяє дійти обґрунтованого висновку щодо суттєвої невідповідності застосованих в цих системах методів оптимізації виробничих та логістичних процесів. Об'єктивні виклики сучасної діяльності в умовах СТРС вимагають застосування інтелектуальних інформаційних технологій на всіх рівнях управління складними об'єктами за умов мінімізації таких ключових параметрів як повна вартість впровадження ERP, BPM та інших систем корпоративного управління, терміни їх впровадження, наявність персоналу з відповідним рівнем професійної підготовки. Аналіз класичних методів оптимізації, що реалізовані в складі відомих ERP – систем, показує, що доволі часто вони не забезпечують отримання адекватних управлінських рішень через значні часові витрати на пошук оптимального рішення. Застосування інноваційної логістики як самостійної конкурентної потужності дозволить національним СТРС в умовах швидко мінливого світового ринку зберегти лідерство в процесах досягнення мети та реалізації стратегій.

На сучасному етапі в Україні є значне відставання від інших країн Євросоюзу та США від кількості та якості впроваджених ERP, BPM та інших систем корпоративного управління. Відсутня дуже поширена в інших країнах сучасна автоматизація

управління проектами з застосуванням повного функціоналу щодо управління ресурсами. Оптимізація бізнес-процесів реалізується головним чином на рівні інтуїтивних знань. Тобто в наявності існує протиріччя між вимогами до ефективності та своєчасності прийняття управлінських рішень та і обмеженнями існуючих науково-методологічних та прикладних складових (методів, алгоритмів, програмних рішень). Найбільш поширені на світовому ринку системи управління (СУ) ресурсами та логістикою підприємств класу Enterprise Resource Planning (ERP), як закордонних (SAP, Oracle, Microsoft, інші) , так і вітчизняних (1С, Альфа, інші) складають значну кількість. Але слід зауважити, що в основному ці системи є обліковими, причому побудовані як централізовані, монолітні, ієрархічні і послідовні системи, що в умовах постійного зростання складності та високої динаміки змін в будь-якої предметної галузі приводить до виникнення різних проблем і часто не дозволяє застосовувати вказані системи на практиці зі значним ефектом. Крім того, головний контур розподілення, планування, оптимізації, моніторингу і контролю ресурсів залишається без автоматизованої підтримки процесів прийняття рішень, що позбавляє ці системи необхідної відкритості до змінень, гнучкості та ефективності при управлінні ресурсами, в особливості – при необхідності функціонування в режимі реального часу.

Виклад основного матеріалу

СТРС як правило мають велику географію, в зв'язку з чим особливу важливість набуває чітка система правил, стандартів, планів та обґрунтована система звітів їх виконання. Найбільш важливою умовою стійкого функціонування та розвитку СТРС є вдосконалення системи управління на теоретичній та практичній основі. На сьогоднішній день такої досконалої єдиної концепції, яка поєднує законодавчі, нормативні, рекомендаційні, практичні бази, не існує. Відсутня концепція управлінського обліку в інтегрованих структурах СТРС, тобто включаючи теорію, методологію, організацію управлінського обліку з застосуванням сучасних інноваційних технологій, методів та моделей. Відсутні також пріоритетні теоретико-методологічні концепції подальшого розвитку систем управління в умовах посилення стандартизації, глобалізації. На даний час не досягнуто єдиної точки зору на склад, зміст компонентів управлінського обліку, недосконала структура єдиного інформаційного забезпечення управління СТРС в умовах функціонування інтелектуальних інформаційних технологій. Для національних СТРС характерні низька ступінь і неадекватне застосування можливостей та інструментів управлінського обліку в напрямку впровадження інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Не є остаточно визначеною збала-

нсована система показників діяльності СТРС в розрізі аспектів аналізу виробничої діяльності, прогнозування показників, планування ресурсів, керування ризи-

ками, залучення інвестицій. Всі існуючі на даному етапі рішення щодо СУ СТРС можна систематизувати в три кластери (табл. 1).

Таблиця 1

Кластеризація комплексних рішень СУ СТРС

Кластери рішень	Бази рішень	Проблеми рішень
Кластер А	«1-С - Підприємство»	Спрямовані в-основному на задачі бухгалтерського обліку, не в повному обсязі застосовуються можливості сучасних ІТ
Кластер В	виконані на власній платформі	Властиві всі недоліки застосованої конкретної власної платформи, не в повному обсязі застосовуються можливості сучасних ІТ
Кластер С	SAP, Oracle, IBM, Microsoft, побудовані на інформаційних ERP-системах	Відсутні інтелектуально-аналітичні задачі підтримки прийняття рішень, функції оптимізації управління бізнес-процесами, вкрай дорогі, потребують висококваліфікованого персоналу на всіх рівнях впровадження

Теоретико-множинне визначення складної системи має наступний вигляд :

$$S = \langle ES, RS, MS \rangle$$

де $ES = \cup ES^i$ – множина елементів системи, I – індексна множина, $RS = \cup RS^i$ - множина зв'язків між елементами системи, $MS = \cup MS^i$ - множина ресурсів всіх видів системи.

В контексті методології системного підходу будь-яка СТРС є перетворювачем ресурсів в результаті виконаний аналіз пріоритетів діяльності таких систем. Виділені як головні – на стратегічному рівні управління - задачі оптимізації управління великими пулами ресурсів, що необхідні для виконання основної діяльності СТРС, на оперативному рівні - задачі оптимізації логістичної діяльності. Ці дві задачі є основними об'єктами для керуючих впливів на СТРС у вигляді ІТ.

Сформульовано та доведено *твердження* - для досягнення оптимального результату (з точки зору обраного критерію мінімізації загальної вартості визначеного виду діяльності СТРС) в процесі управління СТРС достатньо на вхід цієї системи подати хоча б один керуючий вплив з множини $\Omega = \{\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4\}$. Множина Ω представляє собою інтеграцію відповідних ІТ та складається з таких елементів: Ω_1 – інформаційна технологія оптимізації виробничої діяльності складної територіально-розподіленої системи (СТРС) засобами управління проектами (ІТОВД); Ω_2 – інформаційна технологія оптимізації логістичної діяльності СТРС на базі застосування гібридних генетичних алгоритмів та нечітких множин (ІТОЛД); Ω_3 – інформаційна технологія оптимізації фінансових ризиків СТРС на базі застосування нечітких множин (ІТОФР); Ω_4 – інформаційна технологія короткотермінового прогнозування будь-якого фінансового показника СТРС на базі нейро-мережевої модифікації методу групового урахування аргументів (ІТКТП).

В якості критерію ефективності управління СТРС застосована загальна вартість витратної частини бюджету при виконанні обраного для оптимізації процесу за цикл обробки:

$$Z = R_b + H_b,$$

який є інваріантним до виду предметної області, де Z - загальна вартість витратної частини бюджету

СТРС; $R_b \leq \sum_{i=1}^e r_i$ - загальна сума вартісного еквіваленту всіх матеріальних ресурсів для реалізації виробничої діяльності СТРС в циклі обробки; r_i – вартісний еквівалент матеріального ресурсу для виконання i -го етапу ВД СТРС; $H_b \leq \sum_{i=1}^e h_i$ - загальна сума вартісного еквіваленту всіх людських ресурсів для реалізації виробничої діяльності СТРС в циклі обробки; h_i - вартісний еквівалент людського ресурсу для виконання i -го етапу ВД СТРС; $T_b \leq \sum_{i=1}^e \tau_i$ - загальний час виконання циклу ВД СТРС; τ_i - час виконання i -го етапу ВД СТРС. Тоді загальна схема управління СТРС має вигляд рис. 1.



Рис. 1. Схема моделі управління СТРС

Елемент Ω_1 (ІТОВД) базується на застосуванні проектного управління на всіх рівнях СТРС : інституціональному (стратегічному), управлінському (оперативному), технічному (найнижчому- оперативного виконання) . Згідно даних Міжнародної асоціації управління проектами (IPMA, International Project Management Association) застосування методології та інструментарію проектного управління дозволяє зекономити 20-30% часу і 15-20% грошових коштів . Починаючи з 2011 року при Офісі прем'єр-міністра Великої Британії був створений Департамент пріоритетних проектів (Major Projects Authority). В його основні функціональні обов'язки входить забезпечення підтримки управлінських процесів, формування та розвиток компетенції управління проектами і програмами. Аналогічні структури діють в Японії, США, багатьох інших країнах. Існують національні стандарти для управ-

ління проектами в державному секторі (у Великій Британії – PRINCE2, Projects In Controlled Environments, у США – PMI PMBOK Government Extension)[1]. В цілому слід зазначити, що затребуваність проектних методів управління в світовій практиці зростає дуже стрімко. Спостерігається тенденція зростання інвестицій до мегапроектів. Можна дати таке визначення проектного управління – це особливий вид діяльності, котрий може застосовуватися до управління будь-якого об'єкту, а не тільки такого, що має явні ознаки проекту. До основних ознак проекту можна віднести такі :

- наявність конкретної мети, що направлена на вирішення певної проблеми;
- чітко визначені часові рамки реалізації;
- обмеженість ресурсів (фінансових, матеріальних, людських) на його реалізацію;
- наявність команди проекту;
- певна унікальність, неповторність.

Реалізація проектів потребує створення відповідної системи управління та проходження етапів [2]:

- 1) аналізу ситуації з врахуванням особливостей предметної області – аналітичного;
- 2) побудови ієрархії цілей та задач - концептуального;
- 3) відбору ефективного інструментарію;
- 4) декомпозиції основної мети до рівня задач та порядку їх вирішення;
- 5) бюджетування проекту;
- 6) визначення критеріїв ефективності реалізації проекту, очікуваних показників і методів їх оцінки.

Елемент Ω_2 (ГОЛД) базується на застосуванні гібридного генетичного алгоритму, в якому застосований апарат нечітких множин [3] для регулювання розмірності вхідної популяції можливих рішень задачі оптимізації вартості загального плану перевезень. Визначається множина лінгвістичних змінних «Значення фітнес-функції» як «ДужеПогано», «Погано», «Задовільно», «Добре», «ДужеДобре». Кожному кластеру з цієї множини відповідає значення функції належності (табл.2).

Таблиця 2

Відношення лінгвістичної змінної та значення функції належності

ЛЗ	Дуже Погано	Погано	Задовільно	Добре	Дуже Добре
ЗФН	(0,1,1.1,0.3)	(0.1,0.3,0.3,0.5)	(0.3,0.5,0.5,0.7)	(0.5,0.7,0.7,0.9)	(0.7,0.9,1,1)

На початковому етапі ($n = 0$) класичного генетичного алгоритму (КГА) випадково генерується початкова популяція хромосом, кожна з яких являє собою послідовність генів, що кодують альтернативне рішення (наприклад, хромосома може кодувати варіант перевезення вантажу певним ТЗ по певному маршруту). При цьому кожний ген може нести в собі значення відповідного типу ТЗ та протяжності маршруту. Потім стартує цикл, на кожній ітерації якого до поточної популяції послідовно застосовуються: оператор репродукції, випадково відбирає хромосоми для схрещування з імовірністю, пропорційній їх функції пристосованості (визначається значеннями цільової функції відповідних пар – ТЗ&маршрут); оператор кроссоверу, що імітує створення хромосом-нащадків, запозичивши окремі ділянки генетичного коду у батьків (утворення нових відповідних пар ТЗ&маршрут, які успадкували різні типи ТЗ і маршрутів у різних відібраних раніше старих пар); оператор випадкової мутації, із заданою (малою) ймовірністю змінює хромосому у випадковому місці випадковим чином; і, нарешті, оператор рекомбінації, що визначає хромосоми, які увійдуть в наступну популяцію (відбирає найбільш доцільні для подальшої еволюції пари ТЗ&маршрут відповідно до значення їх цільової функції). В якості цільової (fitness) функції застосована грошова вартість всього плану перевезень. Цикл продовжується до тих пір, поки не буде досягнуто максимальне число ітерацій n або отримано задовільне рішення.

У гібридному генетичному алгоритмі (ГГА) після створення початкової популяції і обчислення значення fitness-функції для кожної пари ТЗ & маршрут запускається робота апарату ТНМ. Ті пари ТЗ & маршрут (хромосоми), значення fitness-функції яких потрапляють в НМ «ДужеПогано», виключаються з подальшої обробки. Таким чином, зменшується розмірність поточної популяції і зменшується час збіжності ГГА, що має актуальність для задач великої розмірності.

Схема гібридного ГА:

ПОЧАТОК /* генетичний алгоритм */

Створити початкову популяцію;

Оцінити пристосованість кожної особини;

Формування 5 терм-множин

«ДП-дуже погано», «П-погано», «З-задовільно», «Д-добре», «ДД-дуже добро» особин в залежності від значення пристосованості /* апарат ТНМ*/

Зменшення розмірності початкової популяції шляхом видалення з неї нечіткої множини «ДП»

останов := FALSE

ПОКІ НЕ останов ВИКОНУВАТИ

ПОЧАТОК /* створити популяцію нового покоління */

ПОВТОРИТИ (розмір популяції/2) РАЗІВ

ПОЧАТОК /* цикл відтворення */

Вибрати дві особини з високою пристосованістю з попереднього покоління для схрещування; Схрестити вибрані особини і отримати двох нащадків;

Оцінити пристосованості нащадків;

Формування 5 терм-множин «ДП», «П», «З», «Д», «ДД» особин в залежності від значення функції пристосованості /* апарат ТНМ*/

Зменшення розмірності початкової популяції шляхом видалення з неї терм-множини «ДП»

КІНЕЦЬ

ЯКЩО популяція зійшлася ТО останов := TRUE

КІНЕЦЬ

Програмна реалізація запропонованого ГГА виконана на платформі .NET Framework і оболонці розробки MS Visual Studio, мова програмування - C#. Були проведені експерименти для оцінювання можливостей авторського ГГА. Перший етап тестування ГГА проводився на тестових функціях Де Йонга, Розенброка, Растрігіна [4-6]. Другий етап тестування проводилося на реальних даних, отриманих на об'єктах наступних предметних областей - аграрна галузь, нафтогазовидобувна галузь, дистрибуція бензину в мережі автозаправок. Крім того, ІТОЛД може бути адекватним рішенням для розвитку концепції Smart City, т.я. одним з головних напрямків котрого є оптимізація управління транспортом. Елемент Ω_3 (ІТОФР) реалізує методологію застосування апарату нечітких множин для мінімізації ризиків в умовах СТРС та алгоритм оптимізації бізнес-портфелю СТРС. На базі цієї ІТ створена автоматизована інформаційна система АІС «Optima-Risk-Agro» [7]. Узагальнена блок – схема алгоритму показана на рис. 2.

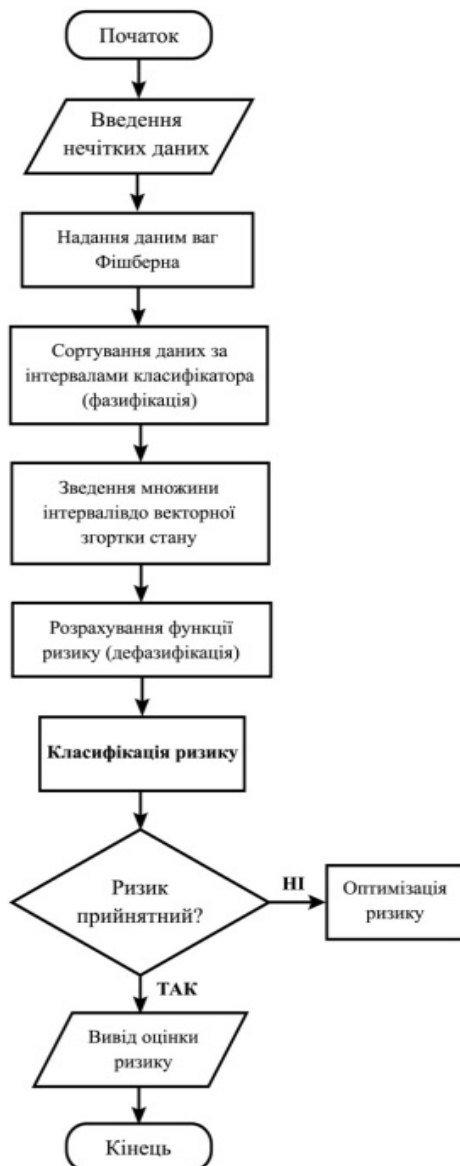


Рис. 2. Блок-схема алгоритму оптимізації ризиків

Елемент Ω_4 - (ІТКТП) інформаційна технологія короткотермінового прогнозування базується на базі нейро-мережевої модифікації методу групового урахування аргументів (МГУА)[8]. Більшість алгоритмів МГУА використовують поліноміальну базисну функцію. Загальна зв'язок між вхідними і вихідними змінними може бути виражений у вигляді функціонального ряду Вольтерра, дискретним аналогом якого є поліном Колмогорова-Габора:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{ijk} x_i x_j x_k,$$

де $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ вхідний вектор змінних; $A(a_1, a_2, \dots, a_{NM})$ – вектор коефіцієнтів або ваг.

Компонентами вхідного вектору X можуть бути незалежні змінні, функціональні форми або кінцеві різницеві члени. Інші нелінійні базисні функції, наприклад диференціальні, логічні, імовірнісні або гармонійні також можуть бути застосовані для побудови моделі. Метод дозволяє одночасно отримати оптимальну структуру моделі та залежність вихідних параметрів від обраних найбільш значущих вхідних параметрів системи. В роботі використані два алгоритми МГУА: комбінаторний та нейромережевий [9]. Прогнозування часових рядів виконувалося в програмному середовищі GMDH Shell. GMDH Shell є простим, але потужним програмним забезпеченням для інтелектуального аналізу даних і прогнозування на основі МГУА. За допомогою GMDH Shell можна досліджувати дані, побудувати регресійну модель, застосувати раніше отриману модель для прогнозування. Побудова моделі МГУА здійснюватиметься в два етапи:

- застосування МГУА на отриманих, за допомогою програм, даних для складання прогнозу вихідного параметра;
- прогнозування вхідних параметрів за допомогою методу авторегресійного інтегрування середньої змінної (ARIMA - Autoregressive integrated moving average) [10].

Верифікація ІТКТП для прогнозування довела високу надійність та якість отриманих показників. Коефіцієнт множинної кореляції, що характеризує якість моделі, вийшов рівним $R = 0.98$, а коефіцієнт детермінації дорівнює $R = 0.95$, що є задовільною оцінкою якості моделі. Середній модуль похибки в процентах (MAPE) 4,9%. Середньо-квадратичне відхилення в процентах (RMPSE) 5,1%.

Висновки

Результати досліджень, що наведені в роботі, є основою для формування моделей і алгоритмів для оптимізації управління складними територіально-розподіленими системами. Розроблені інформаційні технології дозволяють вирішити дуже складну задачу координації тривірневої системи

організаційного управління СТРС, так як ця проблема суттєво ускладнюється необхідністю узгодження критерію функціонування СТРС в цілому з критеріями для окремих її складових, які в свою чергу також є складними системами. Крім того, ці ІТ можуть бути застосовані як автономно в структурних підрозділах вертикально інтегрованих бізнес-утворень як базисні для федеральних СППР, так і в бути інтегрованими в існуючі ERP- і ВМР-системи на горизонті стратегічного управління. Як перспективний напрям використання цих ІТ може бути розглянута можливість їх реалізації в рамках концепції Blockchain, яка є підґрунтям концепції систем управління розподіленими даними.

Список літератури

1. *Guide for the Business Process Management Common Body of Knowledge ABPMP BPM CBOK v.3.0, 2013.* – ABPMP International. – 445 с.
2. Кожевников С.А., 2016. Проектное управление как инструмент повышения эффективности деятельности органов государственной исполнительной власти // *Вопросы территориального развития.* -2016.- №5(35).- С.1-17.
3. Zadeh L.A. *The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning* / L.A. Zadeh // *Inform. Sci. O 1975. O Vol. 8. O P. 199-249.*

4. De Jong K.A. *Evolutionary computation a unified approach* // *A Bradford book. Cambridge: MA, USA. 256 p.*
5. Rosenbrock H.H., *An automatic method for finding the greatest or least value of a function.* - *The Computer Journal* 3, 1960. pp. 175–184.
6. Rastrigin L. A., *Systems of Extremal Control* - *Nauka, Moscow, 1974.*
7. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №63020. Автоматизована система “Optima-Risk-Agro” оптимізації ризиків діяльності агрохолдингів на базі апарату нечіткої логіки / Скакаліна О.В. - Зареєстровано в Державній службі інтелектуальної власності України, м. Київ 18 грудня 2015 року.
8. Ivakhnenko A.G., Ivakhnenko G.A. *The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling. Published in Pattern Recognition and Image Analysis, Vol. 5, No. 4, 1995, pp.527-535.*
9. Скакаліна О.В. Прикладні аспекти використання методу групового урахування аргументів при короткостроковому прогнозуванні // *Науковий Вісник національного гірничого університету.*- Днепропетровськ, 2015.- Вип. 6(150).- С. 80-88.
10. GMDH Shell // [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.machinelearning.ru/GMDH_Shell.

Надійшла до редколегії 2.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

ИННОВАЦИОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ СИСТЕМАМИ

Е.В. Скакаліна

На современном этапе развития мирового производства проблема создания и управления большими сложными территориально распределенными системами занимает центральное место как в науке, так и в развитии общества. Обычно для больших сложных распределенных систем требуются большие пулы ресурсов - материальные, человеческие, финансовые, энергетические, адекватное управления которыми невозможно без использования интеллектуальных информационных технологий. Одной из основных тенденций развития информационных технологий и информационных систем является проблема интеграции этих технологий и систем с существующими и будущими производственными и социально-экономическими структурами и связанными с ними системами управления. В статье представлены результаты разработки и внедрения комплекса информационных технологий для оптимизации управления сложными распределенными системами в контексте выбранного критерия минимизации стоимости расходной части бюджета. Методология исследования основана на теории систем и системного анализа, гибридных генетических алгоритмах, теории нечетких множеств и методе группового учета аргументов. Приводятся результаты проверки предлагаемых информационных технологий на объектах различных предметных областей - агропроизводства, энергетической отрасли, логистики. Процент оптимизации затратной части цикла производства или процесса находится в диапазоне от 4,6 до 28%.

Ключевые слова: сложные территориально-распределенные системы, информационные технологии, гибридные генетические алгоритмы, нечеткие множества, метод группового учета аргументов.

INNOVATIVE CONCEPT OF CONTROL SYSTEMS BY COMPLEX DISTRIBUTED SYSTEMS

E.V. Skakalina

At the present stage of the development of world production, the problem of the creation and management of large complex territorial-distributed systems has occupied a central place both in science and in the development of society. Usually, large complex distributed systems require large pools of resources-material, human, financial, energy, adequate management that is impossible without the use of intelligent information technology. One of the main trends in the development of information technology and information systems is the problem of integration of these technologies and systems with existing and future production and socio-economic structures and related management systems. The paper presents the results of the development and implementation of a complex of information technologies for optimizing the management of complex distributed systems in the context of the chosen criterion of minimizing the cost of the expenditure part of the budget. The methodology of research is based on the theory of systems and system analysis, hybrid genetic algorithms, fuzzy set theory, and the group method of data handling. The results of the verification of the proposed information technologies on the objects of various subject areas - agricultural production, energy industry, logistics are presented. The percentage of optimization of the consumable part of the production or process cycle is in the range from 4.6 to 28%.

Keywords: complex territorially distributed systems, information technologies, hybrid genetic algorithms, fuzzy sets, group method of data handling.

А.В. Федоров, Д.В. Головняк, В.А. Андрієвський, С.І. Куцмус, Ю.Ю. Галаговець

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ MLAT В АЕРОПОРТАХ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Проведений аналіз досвіду використання системи MLAT в аеропортах світу та сучасних тенденцій розвитку радіолокаційних засобів, що використовуються в системі контролю повітряного простору. Ефективність використання технології MLAT проведено на прикладі системи встановленої в аеропорту Жуляни (м. Київ). Дослідження можливостей системи здійснено за допомогою моделювання роботи реальної MLAT-системи при визначенні точності координат повітряних об'єктів в зоні відповідальності аеропорту при роботі системи в пасивному режимі, без використання функції вимірювання дальності цілі, активному режимі та при відмові одного з приймачів. Визначені існуючі проблеми контролю повітряного простору в аеропортах та запропоновані варіанти їх вирішення.

Ключові слова: радіолокаційна станція, MLAT, джерела інформації, повітряна обстановка, залежне спостереження, незалежне спостереження, контроль повітряного простору, координати.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Удосконалення системи спостереження за повітряним рухом передбачає не як поліпшення характеристик традиційних засобів спостереження - первинних і вторинних радіолокаторів, так і впровадження нових систем спостереження. Прикладом таких нових систем є мультилатераційні системи, що знаходять все більше застосування, особливо для спостереження в термінальній зоні і на аеродромах.

Зростання повітряного трафіку та кількості пасажирських перевезень останнім часом становить світову тенденцію розвитку авіації [1, 2]. Як наслідок, протягом наступного десятиліття інтенсивність повітряного руху в зоні відповідальності аеропортів може збільшитись майже вдвічі [2]. Сьогодні багато авіакомпаній стикаються з затримками під час перельотів через перевантаженість аеропортів і неможливість забезпечити службами контролю повітряного простору безпеки польотів. Таким чином виникає ситуація, коли засоби радіолокації не здатні контролювати повітряний рух у зв'язку зі зростаючим темпом розвитку авіаперевезень [1-4].

З метою підвищення ефективності управління повітряним рухом за умов мінімізації витрат на інфраструктуру на сучасному етапі розвитку спостерігається перехід від традиційних радарів до систем із використанням нових технологій: MLAT та ADS-B. Системи MLAT забезпечують контроль повітряної обстановки в аеропортах в режимі реального часу, здійснюють обмін інформацією відстежують повітряні об'єкти, які знаходяться в зоні відповідальності аеропорту та забезпечують якісне спільне прийняття рішень для поліпшення управління повітряним рухом [5-6]. Суттєва перевага системи MLAT – це можливість використання сигналів пе-

редавачів з борту повітряних суден, тому вони можуть розгортатися без будь-яких змін бортової інфраструктури [7]. Система MLAT не тільки гарантує високу точність визначення місця розташування і траєкторії, але і представляє такі нові характеристики, як більш висока точність, швидкість оновлення і 3D спостереження за повітряними суднами. Для обробки сигналів на землі потрібні приймальні станції і центральний пункт обробки інформації. Системи мультилатерації успішно використовуються для спостереження в аеропортах.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Відомими напрямком рішення проблеми контролю повітряного руху в умовах завад, що викликані складною місцевістю, є встановлення одного або кількох вторинних радіолокаторів в аеропорту або поблизу нього [8]. Але використання вторинних радіолокаторів може призвести до значних економічних витрат [8]. При цьому встановлення, технічне обслуговування та використання системи MLAT не тільки буде дешевше, але і забезпечить оптимальне покриття терміналу, більшу точність отримання необхідних даних та підвищить швидкість проведення операцій під час контролю повітряного руху.

Авіакомпанія Airservices Австралія для контролю повітряного руху над островом Тасманією, рельєф якого коливається від рівня моря до гірської місцевості, впроваджує встановлення обладнання з використанням технології MLAT. Економічні підрахунки показали, що для забезпечення надійного та ефективного контролю повітряного простору з урахуванням ландшафту потреба в коштах становить близько 3 мільйонів доларів, у тому числі обладнання, придбання землі, монтаж та обслуговування. При цьому таке ж покриття може бути отримано за допомогою 19 раціонально розміщених блоків системи MLAT. Загальна вартість обладнання з викори-

станням MLAT виявилася значно меншою ніж при використанні традиційних радіолокаційних станцій (РЛС) [7, 8].

Мета статті – провести аналіз можливості використання системи MLAT для збільшення ефективності управління повітряним рухом.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Системи мультилатерації вже протягом тривалого часу успішно використовуються для спостереження в аеропортах. В даний час деякі системи застосовуються в більш великих районах, наприклад районах польотів за маршрутами або зонах підходу, і вони називаються системами WAM. Ця система MLAT являє собою багатопозиційну пасивну (або пасивно-активну) РЛС, що складається з декількох приймальних станцій, станції обробки та контрольного відповідача. Мультилатерація або гіперболічне позиціонування – процес визначення положення, заснований на різниці в часі прибуття (Time Difference of Arrival (TDOA)) сигналу, випромінюваного об'єктом у напрямку трьох або більше приймачів [1, 9].

Важливою особливістю роботи даної MLAT-системи є можливість використання так званого режиму «додаткового» вимірювання дальності (Multi-Ranging / Range-Aided techniques), коли одна зі станцій з функцією приймача працює в активному режимі [10]. Ця станція фіксує час відправлення запиту і час отримання відповіді, що дає додаткову інформацію про відстань до цілі (аналогічно визначенню відстані до цілі у вторинного оглядового радіолокатора (ВОРЛ). Природно припустити, що точність такого визначення дальності відповідає рівню сучасних ВОРЛ, а саме близько 15 м. Для моделювання точних характеристик необхідно вказати спосіб формування пар MLAT-станцій. Якщо цей спосіб невідомий, то при великій кількості станцій проводити розрахунки дуже складно.

Хоча кількість станцій в загальній системі дорівнює 18 і всі вони можуть брати участь в роботі по цілі в районі Жулян, предметом досліджень в даній роботі є тільки 4 станції, розташовані в аеропорту Жуляни. Це відповідає умовній ситуації, коли бортовий сигнал впевнено реєструється тільки цими 4-ма станціями.

Відзначимо, що в загальних вимогах на систему задавалася тільки середньоквадратична похибка визначення горизонтального положення, яка в зоні аеропорту Жуляни не повинна перевищувати 25 м. Так як кількість станцій MLAT-системи дорівнює 4, можливо вимір і висоти польоту, але при відмові будь-який з цих станцій ця функція втрачається. Для визначення ж горизонтального положення є навіть одна надлишкова станція, що підвищує надійність

роботи даної системи.

Розташування станцій MLAT-системи в аеропорту Жуляни показано на рис. 1.

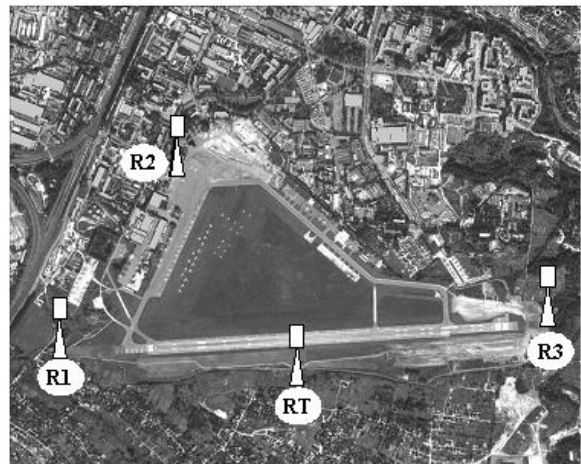


Рис. 1. Розміщення системи MLAT в аеропорту Жуляни. RT-прийомопередавач R1,R2,R3-приймачі

Приймальні станції R1 і R2 розташовані на протилежних кінцях злітно-посадкової смуги (ЗПС) аеропорту. Третій приймач розташований в районі північної вершини території аеропорту, а прийомопередавач південніше всередині злітно-посадкової смуги (ЗПС). Розрахунки ряду конфігурацій системи, наведені у табл. 1.

Таблиця 1
Розрахунки ряду конфігурацій системи

1	2	3	4	5	6	7	8

Лініями з'єднані відповідні пари станцій. Можливі комбінації пар цим, зрозуміло, не вичерпуються, але дають уявлення про різноманітність варіантів.

На рис. 2 показані контури точності, відповідні горизонтальному середньо-квадратичному відхиленню (СКВ) = 25 м. Контуром точності називається замкнута крива, в межах якої похибка не перевищує заданого значення (в даному випадку 25 м).

Всі подальші дослідження проведені для конфігурації «1» з табл. 1.

Розглянемо, яка точність виходить на кордонах аеропорту Жуляни при роботі системи в пасивному режимі, без використання функції вимірювання дальності цілі.

Результати розрахунків контурів точності показані на рис. 2, а.

Зі збільшенням відстані від системи похибка швидко збільшується, досягаючи значень 500 м і більше. Згідно з розрахунками, в зоні підходу аеро-

порту Жуляни повністю поміщається в контур точності, відповідний середньоквадратичному відхиленню (СКВ), що дорівнює 2000 м. Це означає, що при роботі в пасивному режимі з чотирма станціями домогтися, щоб геометрична складова похибки не перевищувала 25 м можна тільки при точності синхронізації більше 0,04 нс. Така точність синхронізації роботи станцій навряд чи досяжна.

Але система має інший, ефективний спосіб підвищення точності визначення місця розташування повітряного об'єкта. Це активний режим роботи, коли приймач визначає відстань до цілі аналогічно тому, як це робить ВОРЛ.

Результати розрахунку контурів точності при активному режимі роботи MLAT-системи з чотирьох станцій показані на рис. 2, б. Видно, що у всьому районі підльоту аеропорту Жуляни похибка не перевищує значення СКВ = 20 м, тобто вимоги до системи виконуються з запасом.

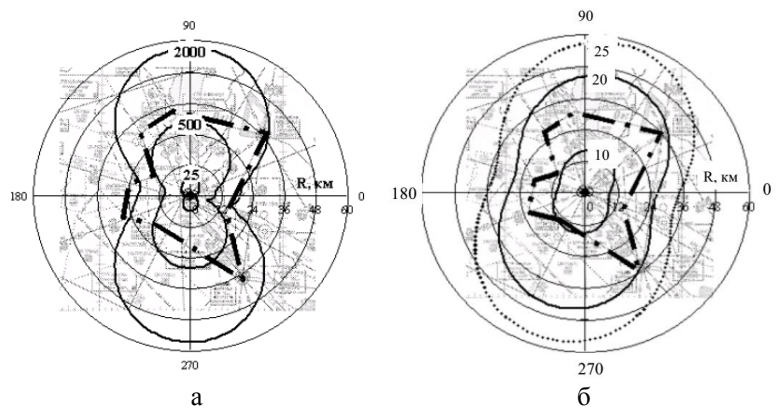


Рис. 2. Контури точності в районі підльоту аеропорту Жуляни (штрихпунктирна лінія) при роботі MLAT в пасивному (а) та активному (б) режимах

Як вже зазначалося вище, навіть система всього з чотирьох станцій має одну надлишкову станцію при визначенні положення повітряного об'єкта в горизонтальній площині. Результати моделювання відмови однієї з трьох прийомних станцій представлені на рис. 3.

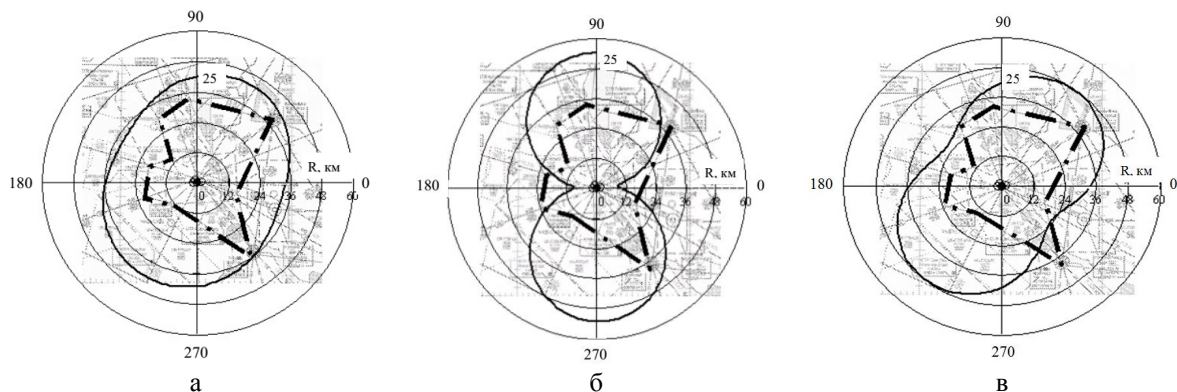


Рис. 4. Контури точності в районі аеропорту Жуляни (штрихпунктирна лінія) при роботі MLAT в активному режимі при відмові станції R1 (а), R2 (б), R3 (в)

Видно, що контури точності помітно відрізняються. найменший вплив надає відмову приймача R1 (рис. 5). При цьому вся зона підходу лежить в межах контуру точності, відповідного СКВ = 25 м.

При відмові приймача R3 поза контуром виявляється незначна площа в одному з напрямків підходу (рис. б), тобто вимоги до точно не задовольняються, але відхилення невелике. В цьому випадку можна вважати, що система практично зберігає свою працездатність. Здавалося б, що найгірша ситуація при відмові приймачальної станції R2 (рис. 5). Але, якщо подивитися уважніше, то виявляється, що в тих напрямках, де контур точності не перекриває зону підходу, не показані маршрути підходу до аеропорту. Тому ризик помилитися менше, і можна говорити про практичну працездатність.

Системи MLAT можна розділити на активні і пасивні. Пасивна система включає тільки приймачі, а активна система має одну або кілька передаваль-

них антен для запиту бортового прийомо-відповідача ВОРЛ. Основна перевага активної системи полягає у тому, що вона не залежить від інших джерел ініціювання передачі даних з борту повітряного судна. Головний її недолік пов'язаний з тим, що вона створює додаткові перешкоди на каналах 1030 МГц і 1090 МГц [11, 12].

Висновки і напрямки подальших досліджень

В роботі основна увага приділена системі незалежного кооперативного спостереження MLAT. Проведено детальний аналіз ефективності використання даної системи встановленої в аеропорту Жуляни (м. Київ). Таким чином можна зробити такі висновки:

1. Для забезпечення заданої точності необхідне використання активного режиму роботи системи, тобто додаткового визначення дальності.

2. Система є стійкою до відмов. При відмові приймача R1 забезпечується повна працездатність, а при відмовах R2 і R3 порушення працездатності незначне.

Автоматичне залежне спостереження в режимі радіомовлення (ADS-B) буде одним з ключових елементів майбутньої системи організації повітряного руху, так як в Європі програми SESAR і NextGen у США. Однак, широке впровадження слід очікувати не раніше чим у 2020–2025 роках.

Однією з головних причин того, що використання даних систем не буде повністю реалізовано протягом багатьох років є дорога вартість обладнання повітряних суден усім необхідним авіаційним обладнанням для передачі і прийому ADS-B інформації. Крім того, повільний перехідний період ускладнюється тим, що ADS-B і РЛС використовують дуже різні технології.

Список літератури

1. Мультилатераційні системи спостереження повітряного руху. Навчальний посібник. Під загальною редакцією Яковлева О.І. – К.: ДПОПР України, 2010-192 с.
2. Зайцев, Д.В. Многопозиционные радиолокационные системы / Д.В. Зайцев. - М.: Радиотехника, 2007. - 114 с.
3. Fewell M. P. Area of common overlap of three circles / M. P. Fewell// Maritime operations divisions defences science and technology organization. – 2006. – P. 1–30.
4. Li J. MIMO Radar Signal Processing / Edited by Jian Li and Petre Stoica – New Jersey : John Wiley & Sons Inc., 2009. – 448 p.
5. Леценко С.П., Колесник О.М., Бейліс Л.В., Грицак С.А. Шляхи створення єдиної картини повітряної

обстановки для виявлення загрозливих і кризових ситуацій в повітрі. Новітні технології — для захисту повітряного простору: Тези допов. 13 наук. конф. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (Харків 12–13 квіт. 2017). Х.: ХНУПС, 2017. С. 204.

6. Surveillance Transition Scenario for German Airspace. Results of the DFS ADS-B Study Group. DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. Heribert Lafferton, Dr. Roland Mallwitz. January 31, 2007.

7. WAM Safety Study & Surveillance Generic Safety. Eurocontrol. Bob Darby. November 9, 2007.

8. Гонца Д.І. Використання складних широкосмугових сигналів у системі мультилатерації MLAT [Електронний ресурс] / ДонНТУ. – Режим доступу: URL: <http://masters.donntu.org/2014/frt/gontsa/diss/indexu.htm> – 10.10.2017.

9. Свид І.В. Синтез структури інформаційного забезпечення споживачів інформаційними системами спостереження повітряного простору / І.В. Свид, А.І. Обод // Збірник наукових праць ХУПС. – Х.: ХУПС, 2015. – Вип. 2 (43). – С. 67–70.

10. Обод І.І. Інформаційна модель систем спостереження повітряного простору / І.І. Обод, О.О. Стрельницький, В.А. Андрусевиц. – Х.: ХНУРЕ, 2015. – 270 с.

11. Multilateration: Radar's Replacement? Avionics. Callan James. April, 2007. Pages 30-34.

12. "RTCA DO-260B. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services – Broadcast (TIS-B)" // [Standards] / RTCA, Inc – [Washington, 2009].

Надійшла до редколегії 12.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Васюта, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ MLAT В АЭРОПОРТАХ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА

А.В. Федоров, Д.В. Головняк, В.А. Андриевский, С.И. Куцмус, Ю.Ю. Галаговец

Проведен анализ опыта использования системы MLAT в аэропортах мира и современных тенденций развития радиолокационных средств, используемых в системе контроля воздушного пространства. Эффективность использования технологии MLAT проведения на примере системы установленной в аэропорту Жуляны (г. Киев). Исследование возможностей системы осуществлено с помощью моделирования работы реальной MLAT-системы при определении точности координат воздушных объектов в зоне ответственности аэропорта при работе системы в пассивном режиме, без использования функции измерения дальности цели, активном режиме и при отказе одного из приемников. Определены существующие проблемы контроля воздушного пространства в аэропортах и предложены варианты их решения.

Ключевые слова: радиолокационная станция, MLAT, источник информации, воздушная обстановка, зависимое наблюдение, независимое наблюдение, воздушное пространство, контроль воздушного пространства, координаты.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE USE OF MLAT SYSTEM IN AIRPORTS FOR AIR SPACE CONTROL

A.V. Fedorov, D.V. Golovnyak, V.A. Andrievskii, S.I. Kutsmus, Yu. Yu. Galagovets

The article analyzes the use of the MLAT system at the airports of the world, its essence and direct role in airspace control. The analysis of existing trends in the development of radar equipment in the airspace control system is carried out. As an example, a detailed analysis of the efficiency of the use of this system installed at the airport Zhulyany (Kiev) was conducted. One of the examples of simulation of the real MLAT system in determining the accuracy of airspace coordinates in the zone of responsibility of the Zhulyany airport is when the system operates in a passive mode, without using the target range measurement function, active mode and refusal of one of the receivers. The analysis is limited to using only 4 stations. An analysis of existing airspace control problems at airports around the world was carried out and variants of their solutions were considered using the MLAT system. The modeling of MLAT system, implemented in CTR Zhuliany-Boryspil, was completed. Although system also includes many stations at Boryspil airport, only 4 stations, allocated directly in Zhuliany, were investigated. High reliability of this system with using so-called Multi-Ranging/Range-Aided techniques was demonstrated.

Keywords: radars, control point, information source, air situation, dependent observation, independent observation, airspace, airspace control, coordinates.

Математичні моделі та методи

УДК 62.5

doi: 10.26906/SUNZ.2018.2.034

V.M. Galai

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava

THE RESEARCH INTO THE PROBLEM OF STATISTICALLY INDETERMINATE TIME SERIES PREDICTION

In the article under consideration the appropriateness of prediction task optimizing according to related external prediction quality requirements based on the multitude of elements expanded by identification methods is proved by 15 mathematical models of time series and 4 methods of their identification.

Keywords: prediction, identification, measurement, signals, obstacles, models, optimization.

Introduction

The response rate is one of the most fundamental qualities of all the processes that occur in any real-time objects. Any physical, economic, biological, social or other value cannot change momentary. As possessing the quality of the response rate, it keeps its current value at the finite, though possibly infinitely small, interval of time after the impact of finite disturbance power. Accordingly, this value is smooth time function, i.e. it has one or more finite time derivatives. Then, according to the 1st and 2nd Weierstrass theorem, it can be approximated at the finite amount of time by Taylor or Fourier series, differential or difference equations as their discrete analog. The latter may be equally spaced or unequally distant. Naturally, the measurement of value of any origin contains, apart from its precise value, the measure of inaccuracy which, as a rule, is of random nature or a consequence of many indeterminable factors.

Different time series models, their identification methods and the criteria for optimality related to the prediction task are applied depending on the length of data selection, insights of the process (trend) which is being predicted, level and aprior information concerning the measure of inaccuracy. For example, there can be autoregressive model (AR), autoregressive moving-average model (ARMA), autoregressive integrated moving average model (ARIMA), Kalman filters, neural network (NN), etc [1, 4, 6].

Different criteria are used for the choice of mathematical models of time series:

– visual estimation of the inaccuracy graph; – autocorrelation functions of approximation inaccuracy series by the model with its importance factor based on the following criteria: Durbin-Watson model (DW), Q-statistic, Student statistic (t-statistic), Fisher statistic (f-statistic), Akaike informative criterion (AIC), Bayes-Schwarz information criterion (BSC) and other statistical values of model adequacy to time series [2, 3, 5].

Valid usage of the criteria given above is possible on the condition that time series measurements meet the statistical representation requirements. As a rule, these are long series (radio-technical, seismic and other systems and signals). In economics and other time (trend, obstacle) varying control systems the series are typically short (tens of measurements in time) with the reasonable prior uncertainty in characteristics. In this case the complex of DW, Q, T, F, AIC, BSC, etc. criteria is used to boost the identification process reliability. However, alongside with that, one of the parameter estimation method for model series parameter is applied.

Taking into account the high computerization and algorithm development level of time series prediction process, it is required to make a research into the problem of prediction optimizing appropriateness as exemplified in actual time series, to expand the multitude “model criteria” by subset “the methods of model parameter estimation” and to evaluate the results of such expansion in prediction system components which are being optimized.

The task setting

The criteria multitude. While selecting different structure options, one can chose the best structure which meets the I criterion as for the accuracy of prediction. Power models are more suitable for short series, while autoregressive ones are better for long series. Index I of the prediction accuracy, that is to be realized physically, is presented as the sum of quotient values I_i ($i=1,2,3$), which account for the quality of model series separate properties. Index I_1 :

$$I_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|\beta_i^\Pi - \hat{\beta}_i^n|}{\hat{\beta}_i}, \quad (1)$$

where $\hat{\beta}_i^\Pi$, $\hat{\beta}_i^n$ i $\hat{\beta}_i$ is the estimation of i model parameter, obtained at the selection of paired and unpaired dis-

create samples k of time t_k ; this is the so-called [7] unbiasedness of estimate index. β . Index:

$$I_2 = (\varepsilon^T \varepsilon) \cdot (x^T x)^{-1}, \quad (2)$$

where $\varepsilon^E = [\varepsilon(1), \dots, \varepsilon(M)]$, $\hat{x}^T = [\hat{x}(1), \dots, \hat{x}(M)]$, $\varepsilon(k)$ is inaccuracy of signal approximation $x(k)$ by the corresponding $\hat{x}(k)$ model in k point within the series; this is so-called [8] unbiasedness or modeling accuracy by model series index. Index I_3 indicates the prediction accuracy at L - last points by the model based on the selection of $M-L$ points:

$$I_3 = |1 - K|, \quad K = \frac{\sum_{i=1}^L \eta_i |x(M-i) \cdot \hat{x}(M-i)|}{\sum_{i=1}^L \eta_i |x(M-i) \cdot \sum_{i=1}^L \eta_i |\hat{x}(M-i)|}. \quad (3)$$

Here η_i is distribution coefficient of desired prediction accuracy according to L - last points of selection $X(k)$, $k = \overline{1, M}$; $\sum_{i=1}^L \eta_i = 1$; $\hat{x}(M-i)$ are predicted values $x(M-i)$, obtained from the model, based on the selection reduced at L last points $k = \overline{1, M-L}$. It is generally accepted that the predicted series $x(k)$ is made of the insight determined component, smooth in time, and the component close to White Gaussian Noise. That is why in the set of variate values models, arranged by their difficulty (the measurability of β vector of unknown parameter), indexes I_1 and I_3 limit the measurability of n vector β , whilst index I_2 at increasing n decreases.

Weight indexes g_i as weighted sum of the following three components, are given depending on the identification objective:

$$\hat{I} = \sum_{i=1}^3 g_i I_i, \quad \sum_{i=1}^3 g_i = 1, \quad g_i \geq 0. \quad (4)$$

To control the parameters β_i of the model with known structure, the maximum weight is g_1 ; for the problem of series exact approximation $x(k)$ by model $\hat{x}(k)$ is g_2 ; for the prediction problem is g_3 . Indexes I_1, I_2, I_3 in the aggregate provide the trading-off for the model estimation stability, accuracy approximation and prediction.

The aim of the experiment: to demonstrate the appropriateness of applying the group of external estimation criteria not only for predicting quality by different time series models, but also the advisability of applying groups of methods for these models' identification.

The research content

Through the example of the time series containing 43 discrete samples $x(k)$ with uniform lead $\Delta t = 4$ months (one of the power economy parameter in Ukraine, Fig. 1), the solution for the problem of prediction $x(k)$, $k = \overline{1, 37}$, for 6 last points, regarded as unknown, shall be considered.

Such task setting for the research allows implementing physically infeasible for implementation in terms of the future prediction objective index I of the relative prediction accuracy for these 6 points, i.e. to calculate relative standard deviation

$$\varepsilon(k) = \hat{x}(k) - x(k), \quad k = \overline{38, 43}$$

of the predicted values $\hat{x}(k)$ from the known $x(k)$, which is being optimized in the multitude of 15 models and 4 methods of their identification.

$$I = \frac{[\varepsilon(38), \dots, \varepsilon(43)] \cdot [\varepsilon(38), \dots, \varepsilon(43)]^T}{[x(38), \dots, x(43)] \cdot [x(38), \dots, x(43)]^T}. \quad (5)$$

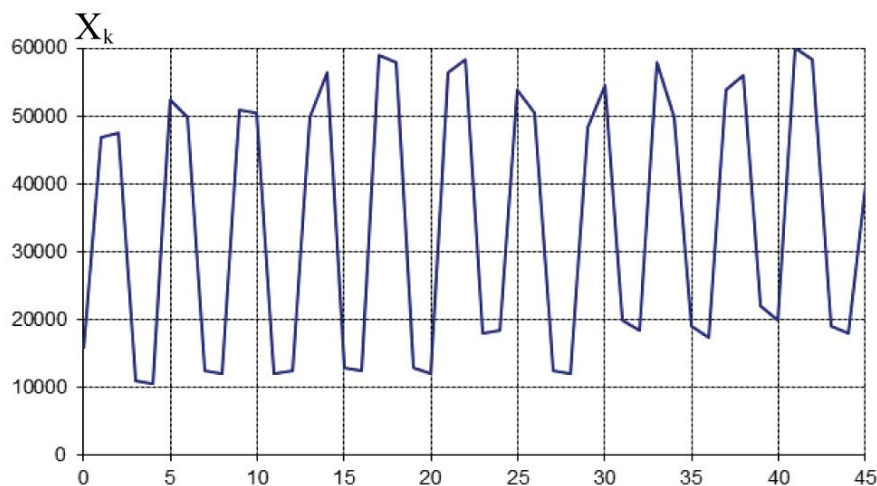


Fig. 1. Time series

In criterion (3)

$$\eta = \frac{1}{L} = \frac{1}{6}$$

is taken, in generalized criterion (4):

$$g_1=0.9; g_2=g_3=0.4.$$

Then it should be determined, in what way index (4), which is being implemented, corresponds to the ideal (5), that cannot be implemented physically.

Mathematical models multitude.

1. Model in the form of power polynomial for discrete samples of time k:

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 k, \quad (6)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 k + \beta_2 k^2, \quad (7)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 k + \beta_2 k^2 + \beta_3 k^3, \quad (8)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 k^{\frac{1}{4}} + \beta_2 k^{\frac{1}{3}} + \beta_3 k^{\frac{1}{2}} + \beta_4 k^{\frac{3}{2}}, \quad (9)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 k + \beta_2 k^{-1} + \beta_3 k^{-3}. \quad (10)$$

2. Autoregressive model for fixed and variable lead k:

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 x(k-1); \quad (11)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 x(k-1) + \beta_2 x(k-2), \quad (12)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 x(k-1) + \beta_2 x(k-2) + \beta_3 x(k-3); \quad (13)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 x(k-4); \quad (14)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 x(k-1) + \beta_2 x(k-2) + \beta_3 x(k-3) + \beta_4 x(k-4); \quad (15)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 x(k-1) + \beta_2 x(k-4); \quad (16)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 x(k-1) + \beta_2 x(k-4) + \beta_3 x(k-8). \quad (17)$$

3. Combined polynomial-time and autoregressive models:

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 k + \beta_2 x(k-1), \quad (18)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 k + \beta_2 x(k-4), \quad (19)$$

$$\hat{x}(k) = \beta_0 + \beta_1 k + \beta_2 x(k-1) + \beta_3 x(k-4). \quad (20)$$

The multitude of model identification methods (6 ÷ 20)

1. Least square method (LSM) The estimation $\hat{\beta}$ of models (6...20) parameter vector β is calculated under the condition that:

$$\hat{\beta} =$$

$$= \arg \min_{\beta} \left[\hat{\varepsilon}(1), \dots, \hat{\varepsilon}(37) \right] \cdot \left[\hat{\varepsilon}(1), \dots, \hat{\varepsilon}(37) \right]^T \frac{\partial^2 \Omega}{\partial u \partial v}, \quad (21)$$

where $\varepsilon(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, $k = \overline{1..37}$.

2. Generalized least squares method (GLSM) The estimation $\hat{\beta}$ of models (6 ÷ 20) parameter vector β is calculated under the condition that:

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} [\tilde{\varepsilon}(1), \dots, \tilde{\varepsilon}(37)] \cdot [\tilde{\varepsilon}(1), \dots, \tilde{\varepsilon}(37)], \quad (22)$$

where

$$\tilde{\varepsilon}(k) = \tilde{x}(k) - \hat{x}(k), \quad k = \overline{1..37}; \quad \tilde{x}(k)$$

is moving average $x(k)$:

$$\tilde{x}(k) = \frac{1}{5} \sum_{i=k-2}^{k+2} x(k+i).$$

3. Correlation method (CM) [9]. The estimation $\hat{\beta}$ of models (6...20) parameter vector β is calculated under the condition that:

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta} \sum_{p=1}^5 [\varepsilon(1), \dots, \varepsilon(37-p)] \cdot [\varepsilon(p), \dots, \varepsilon(37)]^T, \quad (23)$$

So, under the condition of sum minimum displaced at p discrete Δt running time $\varepsilon(k)$ for $\varepsilon(k+p)$.

4. Intermediate variable method (IVM) The estimation $\hat{\beta}$ of models (6...20) parameter vector β is calculated in the same way as in LSM– estimation (21),

but, instead of sensitivity function $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \hat{\beta}}$ some auxiliary function U with components U_i is taken. In our example U_i is equal to signum function of $\frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta_i}$.

Numeral experiment

The effectiveness of the criteria applying that is to be realized physically upon the object of its proximity till the required criteria that cannot be implemented physically has been checked on the multitude of 15 models and 4 methods (CM). The results of number modeling for models (6)...(20) are given in 15 lines of table 1. In columns 1...10 the following data are given:

1 – model types (power (6) - (10), autoregressive (11) – (17), combined (18) – (20));

2 – relative mean-square error of the series modeling.

By the corresponding model for $k = \overline{1..37}$ at its identification according to LSM; 3 – ideal criterion (5), that cannot be implemented physically for the model obtained by LSM;

- 4 – the criterion (4), that is to be realized physically at model identification according to LSM;
- 5 – the best, according to the criterion (4), identification method for the corresponding model line;
- 6 – the ideal criterion value (5), selected according to the method for the real criterion (4) and the corresponding model line;
- 7 – the criterion value (4) for the selected best identification model for the corresponding model line;
- 8 – the best, according to the ideal (5), identification method or the corresponding model line;
- 9 – the ideal criterion value (5) for the criterion (4) for the best identification method for the corresponding model line according to the criterion (5).

The analyses of the experiment results:

1. The autoregressive model (17) with variable delay at k-1, k-4 i k-8 steps (IVM method) has proved to be the best one according to the ideal criteria (5) basing on the multitude of 15 models and 4 identification methods. The same results have been

obtained according to the real criterion (4). Generally, at 8 cases out of 15 under consideration the optimal identification method according to real criteria has been selected correctly (lines 2, 3, 6, 7, 10, 11, 12, 15 in the table), so, it coincides with the method, selected according to the ideal criterion (5). In other 7 cases (lines 1, 4, 5, 8, 9, 13, 14) the ideal value (5) for the method, selected according to the real value (4), is just a little worse than the same value for the optimal, according to the ideal value, method (columns 6 and 9).

2. For power series (6), (7), (8), value (2) (II column of the table) relative mean-square approximation error of the series modeling (6) – (8) is decreasing, with is the natural consequence of Weierstrass theorem about the approximation by Taylor series. At the same time the ideal criterion of prediction accuracy at the model complication worsens (lines 1,3 of the third column in table). This proves the biased nature of the inner approximation criterion (2) and the inexactness of its application for the prediction problem-solving.

Table 1

Modeling results

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	6	0.49	0.47	0.25	GLSM	0.41	0.24	IVM	0.36	0.26	1.3
2	7	0.48	0.59	0.26	ILSM	0.41	0.22	CM	0.41	0.22	1.4
3	8	0.47	0.88	0.41	ILSM	0.38	0.2	CM	0.38	0.2	2.32
4	9	0.485	0.593	0.27	GLSM	0.43	0.226	CM	0.365	0.235	1.62
5	10	0.488	0.49	0.25	ILSM	0.45	0.23	GLSM	0.425	0.237	1.15
6	11	0.49	0.435	0.24	GLSM	0.42	0.235	GLSM	0.415	0.235	1.05
7	12	0.62	0.58	0.28	GLSM	0.56	0.262	GLSM	0.558	0.262	1.04
8	13	0.123	0.143	0.04	LSM	0.143	0.04	IVM	0.096	0.048	1.49
9	14	0.133	0.1	0.03	LSM	0.1	0.03	IVM	0.088	0.126	1.13
10	15	0.113	0.122	0.037	IVM	0.092	0.03	IVM	0.092	0.03	1.33
11	16	0.131	0.103	0.034	IVM	0.091	0.031	IVM	0.091	0.031	1.13
12	17	0.087	0.092	0.015	IVM	0.063	0.011	IVM	0.063	0.011	1.46
13	18	0.488	0.47	0.245	IVM	0.489	0.225	GLSM	0.411	0.237	1.14
14	19	0.132	0.108	0.035	LSM	0.108	0.035	IVM	0.081	0.038	1.33
15	20	0.131	0.111	0.036	LSM	0.111	0.037	LSM	0.111	0.037	1

3. The situation is slightly different for the autoregressive and combined polynomial-time and autoregressive models (11)-(20). In this case, the inner criteria (2) of mean-square proximity measurement at

the approximation section and both the ideal (5) and the ($k=1.37$) real (4) criteria become substantially correlated as a result of LSM regulation property, when variables are noise-contaminated.

Consequently, for this model class the application of the approximation criterion (2) for the prediction problem at points (38...43) for the noise-contaminated data at points (1...37) is less crucial. This is the case of self-regulation.

The more complex auto regression is, the worse the conditioning of information LSM matrix for the exact data becomes. But for more noise-contaminated and obstacle non-correlated data the diagonal elements of this matrix expand and, as a result, they cause the decrease according to LSM module - the estimation of model indexes, alongside simplifying (or, according to A. M. Tihonov [3], regulating) the model.

4. Let us compare the value of the ideal criterion (5) for the models, obtained according to LSM (column 3) and for one of the suggested methods (column 6) with real criterion (4) optimization.

The index (5) was unessentially smaller only for model (18) out of 15 models. So, only in this case according to criterion (4) LSM was mistakenly selected instead of IVM. In other 14 cases the method, obtained under the condition of minimal criterion (4) of prediction accuracy, provides better or practically the same results as LSM, if according to (4) it has been chosen as better than LSM (columns 6 and 3 in table 1).

5. In terms of one method identification, e.g. IVM (column 6, lines 10...13) ideal criterion dispersion (5) depending on model structure makes up from 0.063 to 0.489, which proves the effectiveness of model structure selection.

Within the framework of one model, e.g. model (17) optimal according to the criteria (5), the optimal solution in terms of the multitude of 4 methods (LSM, IVM, GLSM, CM) gives advantage of 1.5 times (0.092 for LSM and 0,063 for IVM as an optimal method). This proves the effectiveness of identification method selection.

6. Generally, the optimization of identification models and methods provides substantial profit in the prediction accuracy.

The advantage can be defined as the ratio of criterion (5) for the index model obtained according to LSM (column 3 of table 1) to the same criterion (5) value for the index model obtained according to the optimal method (5) (column 9 of table 1).

In column 11 of table 1 this ratio is given as to be calculated in the range from 1 to 2.32.

Conclusion

In general, the optimization of identification models and methods provides substantial profit in the prediction accuracy.

References

1. Bidyuk P.I., Polovtsev O.V. *Analiz i modelyuvannya ekonomichnykh protsesiv perekhidnoho periodu.* – Kyiv: NTU KPI, 1999. – 210 p.
2. Ferster E., Rents B. *Metodyi korrelyatsionnoho i regressionnoho analiza.* – M.: Finansyi i statistika. 1983. – 302 p.
3. Enders W. *Applied Econometric Time Series.* – New York: Wiley & Sons, Inc., 1995. – 433 p.
4. Minaev Yu.N., Filimonova O.Yu., Benameur Lies. *Metodyi i algoritmy identifikatsii i prognozirovaniya v usloviyah neopredelenosti v neyrosetevom logicheskom bazise.* – M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2003. – 205 p.
5. Ivahnenko A.G. *Samoobuchayuschiesya sistemyi raspoznavaniya i avtomaticheskogo upravleniya.* – K.: Tekhnika, 1969. – 392 p.
6. Yakovlev V.L., Yakovlev G.L., Lisitskiy L.A. *Sozdanie matematicheskikh modeley prognozirovaniya pri pomoschi neyrosetevykh algoritmov // Informatsionnyie tehnologii.*
7. Ivahnenko A.G. *Dolgostrochnoe prognozirovanie i upravlenie slozhnyimi sistemami.* – K.: Tekhnika, 1975. – 312 p.
8. Silvestrov A.N., Chinaev P.I. *Identifikatsiya i optimizatsiya avtomaticheskikh sistem* – M.: Energoatomizdat, 1983. – 280 p.
9. Tihonov A.N., Arsenin V.Ya. *Metodyi resheniya nekorrektnykh zadach* – M.: Nauka, 1979 – 286 p.

Надійшла до редакції 03.03.2018

Рецензент: д.т.н., проф. А.М. Сільвєстров, Національний технічний університет України “КПІ”, Київ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СТАТИСТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛЕННЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В.Н. Галай

В статье доказано на 15 математических моделях временных рядов и 4 методах их идентификации целесообразность оптимизации задачи прогнозирования с соответствующим внешним критерием качества прогноза на расширенном методах идентификации множестве элементов.

Ключевые слова: прогноз, идентификация, измерения, сигналы, помехи, модели, оптимизация.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАДАЧІ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАТИСТИЧНО НЕВИЗНАЧЕНИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ

В.М. Галай

В статті доведено на 15 математичних моделях часових рядів та 4 методах їх ідентифікації доцільність оптимізації задачі прогнозування за відповідним зовнішнім критерієм якості прогнозу на розширеній методах ідентифікації множині елементів.

Ключові слова: прогноз, ідентифікація, вимірювання, сигнали, перешкоди, моделі, оптимізація.

В.Ю. Дубницкий, О.Е. Петренко, А.И. Ходырев

Харьковский учебно-научный институт ГВУЗ «Университет банковского дела», Харьков

ВЫЧИСЛЕНИЕ ЭНТРОПИИ ФУНКЦИИ КВАНТИЛЕЙ (ЭНТРОПИИ ВАСИЧЕКА)

Поставлена задача определения численного значения энтропии функции квантилей (энтропии Васичека) для непрерывной случайной величины. Для показательного распределения, распределения Чампернауна, логистического распределения, распределения арксинуса, распределения Рэлея, распределения Парето, распределения Лапласа получены в явном виде выражения для определения численных значений энтропии функции квантилей (энтропии Васичека). Для распределения Коши, распределения минимального значения, распределения максимального значения, двойного показательного распределения и распределения Вейбулла описана процедура решения поставленной задачи численными методами. Предложена единица измерения энтропии Васичека - вит.

Ключевые слова: Васичек, энтропия, показательное распределение, распределение Чампернауна, логистическое распределение, распределение арксинуса, распределение Рэлея, распределение Парето, распределение Лапласа, распределение Коши, распределение минимального значения, распределение максимального значения, двойное показательное распределение, распределение Вейбулла, численные методы.

Введение

Пусть для непрерывной случайной величины X известны функция распределения $F(x)$ и плотность распределения $f(x)$. Энтропией Шеннона этой случайной величины называют функционал вида:

$$H_{sh} = - \int_{-\infty}^{\infty} \ln f(x) f(x) dx. \quad (1)$$

Формальные свойства этого функционала подробно описаны в работе [1]. Его применение в технике связи изложено в работах [2, 3, 4].

Для дальнейшего изложения используем понятия квантиля. В работе [5] квантиль x_p уровня p , $0 < p < 1$, определён как корень уравнения

$$F(x_p) = p, \quad (2)$$

откуда следует, что:

$$x_p = F^{-1}(p). \quad (3)$$

В работе [6] было введено условие вида:

$$H_v = \int_0^1 \ln \left(\frac{d}{dx} F^{-1}(p) \right) dp. \quad (4)$$

Это условие получило название энтропии функции квантилей или энтропии Васичека. Вид энтропии Шеннона для большинства наиболее распространённых видов законов распределения дискретной и непрерывной случайной величины X приведен в работе [7].

Так как в доступной авторам данного сообщения литературе отсутствует наименование единицы измерения энтропии Васичека, то, по аналогии с единицей измерения энтропии Шеннона, предлагаем называть её «вит».

Анализ литературы. В работе [5] было отмечено, что функция квантилей тесно связана с порядковыми статистиками. Поэтому условие (4) было использовано при построении различных критериев соответствия эмпирических функций распределения их теоретическим аналогам. Обоснование этого подхода дано в работе [6]. На алгоритмическом уровне применение этого критерия описано в работе [7]. Результаты его применения, полученные в последние годы, изложены в работах [8, 9].

Для наиболее распространённых функций распределения дискретных и непрерывных случайных величин в работе [10] приведены выражения для энтропии Шеннона. Для энтропии Васичека аналогичных исследований авторам данного сообщения найти не удалось.

Постановка задачи: вычисление энтропии квантилей (энтропии Васичека) для конкретных законов распределения непрерывной случайной величины X .

Полученные результаты

В настоящей работе энтропия Васичека определена для тех случаев, когда распределение непрерывной случайной величины X соответствует: 1) показательному закону, 2) распределению Чампернауна, 3) логистическому закону, 4) распределению арксинуса, 5) распределению Рэлея, 6) распределению Парето, 7) распределению Лапласа, 8) распределению Коши, 9) распределению минимального значения, 10) распределению максимального значения, 11) двойному показательному распределению, 12) распределению Вейбулла. Необходимые сведения о функциях распределения и функциях квантилей, свойственных этим законам, приведены в справочнике [11] и использованы авторами данного сообщения. Для случаев 1) ... 7) решение поставленной

задачи получено в явном виде. Для случаев 8) ...12) решение поставленной задачи получено численными методами. При решении задач использована система компьютерной алгебры DERIVE 6 [12].

Для законов распределения, допускающих получение выражения энтропии Васичека в явном виде, получены следующие результаты.

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей показательное распределение. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x), \quad x > 0. \quad (5)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(x) = -\frac{1}{\lambda} \ln(1-p). \quad (6)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} \left(-\frac{1}{\lambda} \ln(1-p) \right) = \frac{1}{\lambda(1-p)}. \quad (7)$$

Таким образом, энтропия Васичека для показательного распределения будет равна величине:

$$H_v(p) = \int_0^1 \ln \left[\frac{1}{\lambda(1-p)} \right] dp = \ln \left(\frac{1}{\lambda+1} \right), \quad (\text{вит}). \quad (8)$$

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение Чампернауна. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(X) = \frac{2}{\pi} \arctg \left[\exp(\alpha \cdot (x - \mu)) \right], \quad -\infty < x < \infty. \quad (9)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(x) = \mu + \frac{1}{\alpha} \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\pi p}{2} \right). \quad (10)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} \left(\mu + \frac{1}{\alpha} \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\pi p}{2} \right) \right) = \frac{\pi}{\alpha \sin(\pi p)}. \quad (11)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения Чампернауна будет равна величине:

$$H_v(p) = \int_0^1 \ln \left[\frac{\pi}{\alpha \sin(\pi p)} \right] dp = \ln \left(\frac{2\pi}{\alpha} \right), \quad (\text{вит}). \quad (12)$$

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей логистическое распределение. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{x-\mu}{\lambda}\right)} = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{th} \left(\frac{x-\mu}{\lambda} \right) \right], \quad -\infty < x < \infty. \quad (13)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(x) = \mu - \lambda \ln \left((1-p)/p \right). \quad (14)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} \left(\mu - \lambda \ln \frac{1-p}{p} \right) = \frac{\lambda}{p(1-p)}. \quad (15)$$

Таким образом, энтропия Васичека для логистического распределения будет равна величине:

$$H_v(p) = \int_0^1 \ln \left[\frac{\lambda}{p(1-p)} \right] dp = \ln \lambda + 2, \quad (\text{вит}). \quad (16)$$

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение арксинуса. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \frac{x-\mu}{\lambda}, \quad \frac{2\mu - \pi\lambda}{2} \leq x \leq \frac{2\mu + \pi\lambda}{2}. \quad (17)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(x) = \mu + \lambda \sin \left[\pi \left(p - 1/2 \right) \right]. \quad (18)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} \left(\mu + \lambda \sin \left[\pi \left(p - \frac{1}{2} \right) \right] \right) = \pi \lambda \sin(\pi p). \quad (19)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения арксинуса будет равна величине:

$$H_v(p) = \int_0^1 \ln \left[\pi \lambda \sin(\pi p) \right] dp = \ln \left(\frac{\pi \lambda}{2} \right), \quad (\text{вит}). \quad (20)$$

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение Рэлея. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = 1 - \exp \left[-x^2 / (2a^2) \right], \quad x > 0. \quad (21)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(x) = a \sqrt{-2 \ln(1-p)}. \quad (22)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} a \sqrt{-2 \ln(1-p)} = \frac{a \sqrt{2}}{2(1-p) \sqrt{-\ln(1-p)}}. \quad (23)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения арксинуса будет равна величине:

$$H_v(p) = \int_0^1 \ln \left[\frac{a \sqrt{2}}{2(1-p) \sqrt{-\ln(1-p)}} \right] dp = \ln \left[\frac{1}{(1-p) \sqrt{-\ln(1-p)}} \right] - \frac{\ln 2}{2} - 1, \quad (\text{вит}). \quad (24)$$

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение Парето. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = 1 - (x_0/x)^\alpha, \quad x > x_0. \quad (25)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид

$$F^{-1}(x) = x_0 / (1-p)^{1/\alpha}. \quad (26)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} \frac{x_0}{(1-p)^{1/\alpha}} = \frac{x_0 (1-p)^{-(\alpha+1)/\alpha}}{\alpha}. \quad (27)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения Парето будет равна величине:

$$H_v(p) = \int_0^1 \ln \left(x_0 (1-p)^{-(\alpha+1)/\alpha} / \alpha \right) dp = \ln(x_0/\alpha) + (\alpha+1)/\alpha, \quad (\text{вит}). \quad (28)$$

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение Лапласа. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = \begin{cases} 0.5 \exp(\lambda(x - \mu)), & x \leq \mu; \\ 1 - 0.5 \exp(\lambda(x - \mu)), & x \geq \mu; \end{cases} \quad (29)$$

при условии, что $-\infty < x < \infty$.

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(x) = \begin{cases} \mu + \frac{\ln(2p)}{\lambda}, & 0 < p < 0,5; \\ \mu - \frac{\ln(2(1-p))}{\lambda}, & 0,5 < p < 1. \end{cases} \quad (30)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} F^{-1}(x) = \begin{cases} 1/(p\lambda), & 0 < p < 0,5; \\ 1/(\lambda(1-p)), & 0,5 < p < 1. \end{cases} \quad (31)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения Лапласа будет равна величине:

$$H_v(p) = \int_0^{0,5} \ln \left(\frac{1}{p\lambda} \right) dp + \int_{0,5}^1 \ln \left(\frac{1}{\lambda(1-p)} \right) dp = \ln(2/\lambda) + 1 \quad (\text{вит}). \quad (32)$$

Далее изложим результаты определения энтропии Васичека, полученные численным интегрированием.

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение Коши. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arctg \frac{x - \mu}{\lambda}, \quad -\infty < x < \infty. \quad (33)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(x) = \mu + \lambda \operatorname{tg} \frac{\pi(2p-1)}{2}. \quad (34)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} F^{-1}(x) = \frac{2\pi\lambda}{1 - \cos(2p\pi)}. \quad (35)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения Коши будет равна величине интеграла вида:

$$\int_0^1 \ln \frac{2\pi\lambda}{1 - \cos(2p\pi)} dp, \quad (\text{вит}). \quad (36)$$

Численные значения энтропии Васичека для распределения Коши при $\mu=0$ и $\lambda=0,2(0,2)0,8$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Численные значения энтропии Васичека для распределения Коши

λ	0,2	0,4	0,6	0,8
$H_v, (\text{вит}).$	0,912	1,612	2,018	2,305

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение минимального значения. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\exp \frac{x - \mu}{\lambda} \right], \quad -\infty < x < \infty. \quad (37)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(p) = \mu + \lambda \ln(-\ln(1-p)). \quad (38)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} F^{-1}(x) = \frac{\lambda}{(p-1) \ln(1-p)}. \quad (39)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения минимального значения будет равна величине интеграла вида:

$$H_v = \int_0^1 \ln \left[\frac{\lambda}{(p-1) \cdot (1-p)} \right] dp, \quad (\text{вит}). \quad (40)$$

Численные значения энтропии Васичека для распределения минимального значения при $\mu=8$ и $\lambda=1, (0,5) 2,5$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения энтропии Васичека для распределения минимального значения

λ	1,0	1,5	2,0	2,5
$H_v, (\text{вит}).$	1,577	1,982	2,270	2,493

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение максимального значения. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left[-\frac{(x-\mu)}{\lambda}\right]\right], \quad -\infty < x < \infty. \quad (41)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(p) = \mu - \lambda \ln(-\ln p). \quad (42)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} F^{-1}(x) = -\frac{\lambda}{p \ln p}. \quad (43)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения максимального значения будет равна величине интеграла вида:

$$H_V(p) = \int_0^1 \ln\left(-\frac{\lambda}{p \ln p}\right) dp, \quad (\text{вит}). \quad (44)$$

Численные значения энтропии Васичека для распределения максимального значения при $\mu = 4$ и $\lambda = 1$ (0,5) 2,5 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Численные значения энтропии Васичека для распределения максимального значения

λ	1,0	1,5	2,0	2,5
H_V , (вит).	1,577	1,982	2,270	2,493

Заметим, что для этих двух функций распределения энтропия Васичека не зависит от параметра положения μ , но зависит от параметра масштаба $\lambda > 0$.

Также следует отметить совпадение численных значений энтропии Васичека для распределений минимального и максимального значений.

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей двойное показательное распределение. Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = \exp(-\mu \exp(-\lambda x)), \quad -\infty < x < \infty. \quad (45)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(x) = \frac{\ln \mu - \ln(-\ln p)}{\lambda}. \quad (46)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} F^{-1}(x) = -\frac{1}{p \lambda \ln p}. \quad (47)$$

Таким образом, энтропия Васичека для двойного показательного распределения будет равна величине интеграла вида:

$$H_V = \int_0^1 \ln\left(-\frac{1}{p \lambda \ln p}\right) dp, \quad (\text{вит}). \quad (48)$$

Численные значения энтропии Васичека для двойного показательного распределения при $\lambda = 0,3$ (0,3) 1,2 приведены в табл. 4.

Таблица 4

Численные значения энтропии Васичека для двойного показательного распределения

λ	0,3	0,6	0,9	1,2
H_V , (вит).	2,781	2,088	1,682	1,395

Рассмотрим решение поставленной задачи для случайной величины X , имеющей распределение Вейбулла.

Функция распределения этого закона имеет вид:

$$F(x) = 1 - \exp\left[-(x/a)^c\right], \quad x > 0. \quad (49)$$

Функция квантилей для этого распределения имеет вид:

$$F^{-1}(p) = a[-\ln(1-p)]^{1/c}. \quad (50)$$

Производная функции квантилей по переменной p в этом случае примет вид:

$$\frac{d}{dp} F^{-1}(x) = a[-\ln(1-p)]^{(1-c)/c} \quad (51)$$

Таким образом, энтропия Васичека для распределения Вейбулла будет равна величине интеграла вида:

$$H_V = \int_0^1 \ln\left[a[-\ln(1-p)]^{(1-c)/c}\right] dp, \quad (\text{вит}). \quad (52)$$

Изменение величины энтропии Васичека для распределения при Вейбулла при значении его параметров: $a=1$ (1) 4 и $c=1$ (0,5) 2,5, показана на рис. 1.

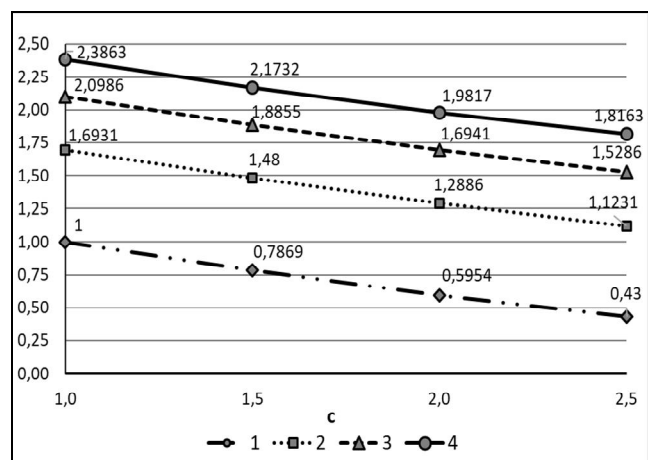


Рис. 1. Изменение величины энтропии Васичека для распределения при Вейбулла при значении его параметров: $a=1$ (1) 4 и $c=1$ (0,5) 2,5

В работе не рассмотрено решение поставленной задачи для таких столь распространённых распределений, как нормальное, логарифмически нормальное и гамма-распределение. Это связано с тем, что возникающие при этом вычислительные затруднения, по мнению авторов, должны стать предметом дальнейшего рассмотрения.

Выводы

1. Поставлена задача определения численного значения энтропии квантилей (энтропии Васичека) для непрерывной случайной величины.

2. Для показательного распределения, распределения Чампернауна, логистического распределения, распределения арксинуса, распределения Рэлея, распределения Парето, распределения Лапласа получены в явном виде выражения для определения численных значений энтропии квантилей (энтропии Васичека).

3. Для распределения Коши, распределения минимального значения, распределения максимального значения, двойного показательного распределения и распределения Вейбулла описана процедура решения поставленной задачи численными методами.

4. Предложена единица измерения энтропии Васичека – вит.

Список литературы

1. Мартин Н. Математическая теория энтропии. / Н. Мартин, Дж., Инглэнд. – Москва: Мир, 1988. – 350 с.
2. Кузьмин И.В. Основы теории информации и кодирования. / И.В. Кузьмин, В.А., Кеорус. – К.: «Вища школа», 1986. – 238 с.
3. Лифшиц Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления. В 2 т. Т 1. Вероятностные и статистические характеристики воздействий и процессов. Линейные стационарные и нестационарные системы. / Н.А. Лифшиц, В.Н. Пугачёв. – Москва: Изд. «Советское радио», 1963. – 896 с.

4. Стратонович Р.Л. Теория информации. / Р.Л. Стратонович. – Москва: «Сов. Радио», 1975. – 424 с.

5. Дунин-Барковский И.В. Теория вероятностей и математическая статистика в технике (общая часть). / И.В. Дунин-Барковский и Н.В. Смирнов. – Москва: Госуд. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 556 с.

6. Vasicek O. A test for normality based on sample entropy. / O. Vasicek // Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological). – 1976. – Vol. 38, No. 1. – pp. 54-59.

7. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 816 с.

8. Блинов П.Ю. О критериях проверки равномерности, использующих оценки энтропии. / Блинов П.Ю., Лемешко Б.Ю. // Обработка информации и моделирование. Материалы конференции. – Новосибирск.: Изд. ФГОБУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», 2015. – С. 32 – 41.

9. Блинов П.Ю. О критериях проверки отклонения распределения от равномерного. / Блинов П.Ю., Лемешко Б.Ю. // Обработка информации и моделирование. Материалы конференции. – Новосибирск.: Изд. ФГОБУ ВПО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики», 2015. – С. 31– 31.

10. Michlowicz J. V. Handbook of DIFFERENTIAL ENTROPY / J.V. Michlowicz, J.M. Nichols, Bucholtz F. – New York.: A. CHAPMAN & HALL, 2014. – 220 p.

11. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. / Р.Н. Вадзинский. – М.: НАУКА, 2001. – 295 с.

12. Дьяконов В.П. Система компьютерной алгебры DERIVE: Самоучитель и руководство пользователя. / Дьяконов В.П. – Москва: СОЛОН-Р, 2002, – 320 с.

Надійшла до редколегії 23.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Можаяев, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

ОБЧИСЛЕННЯ ЕНТРОПІЇ ФУНКЦІЇ КВАНТИЛЕЙ (ЕНТРОПІЇ ВАСИЧЕКА)

В.Ю. Дубницький, О.С. Петренко, О.І. Ходирев

Поставлено задачу визначення чисельного значення ентропії функції квантилей (ентропії Васичека) для неперервної випадкової величини. Для показникового розподілу, розподілу Чампернауна, логістичного розподілу, розподілу арксинусу, розподілу Релея, розподілу Парето, розподілу Лапласа отримано в явному вигляді вирази для визначення чисельних значень ентропії функції квантилей (ентропії Васичека). Для розподілу Коши, розподілу мінімального значення, розподілу максимального значення, подвійного показникового розподілу і розподілу Вейбулла викладено процедуру розв'язання задачі чисельними методами. Запропоновано одиницю вимірювання ентропії Васичека – вит.

Ключові слова: Васичек, ентропія, показниковий розподіл, розподіл Чампернауна, логістичний розподіл, розподіл арксинуса, розподіл Релея, розподіл Парето, розподіл Лапласа, розподіл Коши, розподіл мінімального значення, розподіл максимального значення, подвійний показниковий розподіл, розподіл Вейбулла, чисельні методи.

THE ENTROPY CALCULATION OF FUNCTION QUANTILE (VASICEK ENTROPY)

V. Yu. Dubnitskiy, L.D. Filatova, A.I. Khodyrev

The subject is to denote the mining of entropy function quantile (Vasicek entropy). There are the expressions Exponential Distribution, Champernown Distribution, Logistic Distribution, Pareto Distribution, Laplace Distribution, Cauchy Distribution have been received in an explicit form the expressions of entropy function quantile (Vasicek entropy). The procedure of solving tasks is represented by using numerical method for Cauchy Distribution, Minimum Value Distribution, Maximum Value Distribution, Double Exponential Distribution, and Distribution Weibull. The Vasicek entropy unit is suggested.

Keywords: entropy, quantil, Vasicek, Exponential Distribution, Champernown Distribution, Logistic Distribution, Arcsine Distribution, Logistic Distribution, Pareto Distribution, Laplace Distribution, Cauchy Distribution, Minimum Value Distribution, Maximum Value Distribution, Double Exponential Distribution, Distribution Weibull.

С.О. Оберемок

Кіровоградська льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КОМУТАЦІЇ В ЗАСОБАХ З ПОВНОЗВ'ЯЗНОЮ ТОПОЛОГІЄЮ В МЕРЕЖАХ АСУ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

Запропонована модель комутації яка дозволяє оцінити пропускну здатність вузлів розподіленої мережі автоматизованої системи управління повітряним рухом. Запропоновано шляхи підвищення ефективності функціонування засобів комутації. В результаті моделювання отримані залежності середнього часу комутації від ймовірності мультиплексування пакетів при різних коефіцієнтах і ймовірності буферизації.

Ключові слова: пакет, буферизація, фільтрація, мультиплексування, комутації пакетів, АСУ повітряним рухом, повнозв'язна топологія, буфер, вихідний порт, вхідний порт, максимальне завантаження.

Вступ

Найбільш актуальним питанням при побудові складних інформаційних мереж АСУ повітряним рухом є визначення максимально важливої пропускну здатності комутаційних вузлів мережі АСУ повітряним рухом при максимальному інформаційному навантаженні. Тому побудова моделей, які дозволяють оцінити ефективність комутації пакетів в різних режимах навантаження є актуальною задачею.

Постановка задачі і аналіз відомих публікацій. Найбільш поширено технологію комутації є організація процесу обміну у засобах з повнозв'язною топологією. Аналіз публікацій [1, 2] дозволяє сказати, що у комутаторах з повнозв'язною топологією між будь-яким вхідним і вихідним портом існує єдиний шлях.

Поступаючи на вхідні порти пакети передаються не адресні фільтри всіх вихідних портів. Якщо адреса співпадає з номером вихідного порту, пакет, що поступив, поміщається у вихідний буфер, звідки, згодом, відправляється одержувачу через блок мультиплексорів [3].

У мережах передачі даних АСУ повітряним рухом ймовірність виникнення довготривалих пікових навантажень вельми значна. Зважаючи на це актуальним є завдання аналізу можливості комутації пакетів без втрат в найкоротші терміни.

Мета статті. Є оцінка ефективності функціонування комутаційних засобів за максимальних інформаційних навантажень.

Основна частина

Побудуємо модель процесу комутації. Як початкові дані введемо такі обмеження:

- комутатор працює в режимі пікового завантаження (максимальна інтенсивність надходження пакетів на всі вхідні порти);

- застосовується стратегія випадкового вибору пакетів з проміжних буферів для мультиплексування на вхідний порт;

- передаються кадри мінімального розміру (найгірше поєднання параметрів трафіка) [4].

Процес функціонування i -го каналу комутації пакетів (вхідний порт i) в загальному випадку можна описати послідовністю операцій (рис. 1):

- а) прийом пакета ($T_{ПРМ}$ – час прийому пакета);

- б) фільтрація ($T_{Ф}$ – час фільтрації; P_A – ймовірність відповідності адреси пакета адресою вихідного порту). Якщо адреса пакета не збігається з адресою поточного вихідного порту, він відкидається;

- в) буферизація (T_B – час запису пакета в буфер; P_{B_j} – ймовірність буферизації пакета в відповідному полі (позицію) буфера; $j = \overline{1, K}$);

- г) рух по черзі (пакет, що знаходиться в j -й позиції очікує наступного моменту мультиплексування $T_{ОЧ}$; при настанні моменту мультиплексування він переміститься на $j-1$ позицію з ймовірністю $P_{ПБ}$ (просування по буферу) в разі мультиплексування і передачі пакета, що знаходиться в 1-й позиції черзі. При цьому зсувається вся черга);

- д) мультиплексування (T_M – час перемикання мультиплексора на необхідний буфер; P_M – ймовірність мультиплексування);

- е) передача пакета ($T_{ПРД}$ – час зчитування пакета з буфера і видачі його через вихідний порт).

При цьому запис в буфери каналів комутації здійснюється з бітовими швидкостями вхідних портів комутатора, а читання і передача через вихідний порт - з бітовою швидкістю вихідного порту. Нові пакети завжди записуються в "хвіст" черги.

Описаний процес можна представити у вигляді ймовірнісно-часового графа (рис. 1) i -й каналу комутації (вхідний порт i) [5].

Після проведення еквівалентних перетворень вихідного ймовірнісно-часового графа, отримуємо кінцевий граф (рис. 2).

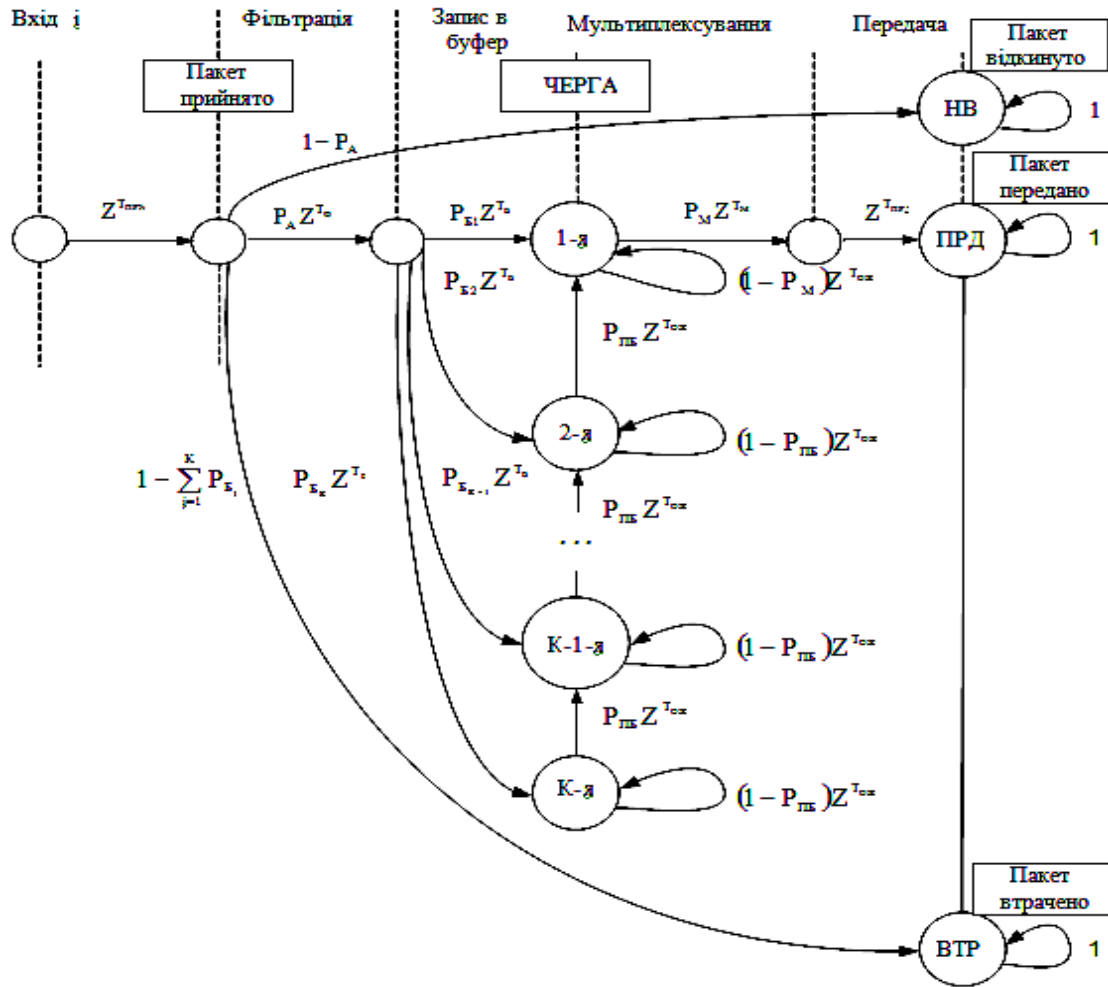


Рис. 1. Імовірісно-часовий граф процесу комутації пакетів i-м каналом комутатора

Функції переходів записується такими виразами:

$$f_1 = Z^{T_{ПРМ}} (1 - P_A); \quad (1)$$

$$f_2 = Z^{T_{ПРМ}} \cdot P_A Z^{T_{Ф}} \cdot \left[P_{B_1} Z^{T_{B_1}} + P_{B_2} Z^{T_{B_2}} \times \left(\frac{P_{ПБ} Z^{T_{Оч}}}{1 - (1 - P_{ПБ}) Z^{T_{Оч}}} \right)^1 + \dots + P_{B_K} Z^{T_{B_K}} \times \left(\frac{P_{ПБ} Z^{T_{Оч}}}{1 - (1 - P_{ПБ}) Z^{T_{Оч}}} \right)^{K-1} \right] \cdot \frac{P_M Z^{T_M}}{1 - (1 - P_M) Z^{T_{Оч}}} \times Z^{T_{ПРД}} = Z^{T_{ПРМ}} \cdot P_A Z^{T_{Ф}} \cdot Z^{T_B} \cdot \frac{P_M Z^{T_M}}{1 - (1 - P_M) Z^{T_{Оч}}} \times \left[\sum_{j=1}^K P_{B_j} \cdot \left(\frac{P_{ПБ} Z^{T_{Оч}}}{1 - (1 - P_{ПБ}) Z^{T_{Оч}}} \right)^{j-1} \right], \quad (2)$$

$$f_3 = Z^{T_{ПРМ}} \cdot P_A Z^{T_{Ф}} \cdot \left(1 - \sum_{j=1}^K P_{B_j} \right). \quad (3)$$

Для випадку максимального завантаження комутатора $P_A = 1$.

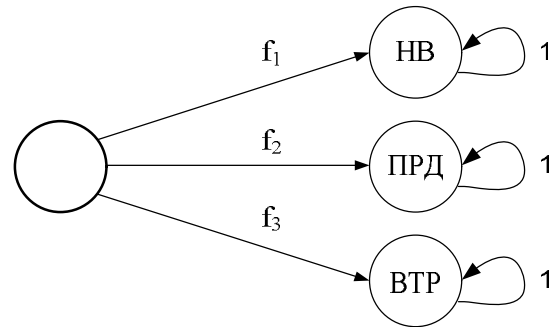


Рис. 2. Кінцевий імовірісно-часовий граф

Прийемо, що на всі входи комутатора надходять пакети однакової довжини в розрядів [6, 7].

Час прийому пакета може бути виражено через його довжину і бітову швидкість вхідного порту:

$$T_{ПРМ} = \frac{m}{B_{ВХ}}. \quad (4)$$

Час фільтрації є апаратно залежним і не залежить від довжини пакету, може бути прийнято рівним нулю.

Час запису пакета в буфер для випадку інтенсивного надходження пакетів мінімальної довжини може бути прийнято рівним нулю.

Ймовірності записи в кожному з позицій буфера вимагають окремого розгляду і можуть бути визначені на основі математичного моделювання черзі комутатора. Ймовірність просування пакета в черзі дорівнює ймовірності мультиплексування:

$$P_{ПБ} = P_M \quad (5)$$

Оскільки якщо вихідний порт "забирає" перший пакет з черги, все решта синхронно зміщуються до початку черги [8].

Будемо вважати, що пакети в черзі встигають листуватися між позиціями буфера за час менше або дорівнює, тобто до моменту початку передачі в вихідний порт черговий пакет вже переміщений на першу позицію черги.

Будь інтервал між можливими змінами позицій в черзі дорівнює:

$$T_{Оч} = T_M + T_{ПРД}, \quad (6)$$

Оскільки наступний момент мультиплексування наступить не раніше, ніж буде закінчена передача попереднього пакету через вихідний порт.

Час мультиплексування також може бути прийнято рівним нулю, тому що і, є апаратно залежним.

Час передачі пакета висловимо через його довжину і бітову швидкість вихідного порту.

$$T_{ПРД} = \frac{m}{V^{ВИХ}} \quad (7)$$

Таким чином, з урахуванням прийнятих припущень:

$$P_A = 1, T_B = 0, T_M = 0, P_{ПБ} = P_M \quad (8)$$

$$T_{Ф} = 0, T_{Оч} = T_M + T_{ПРД} \approx T_{ПРД} \quad (9)$$

Отримаємо спрощений кінцевий граф (рис. 3).

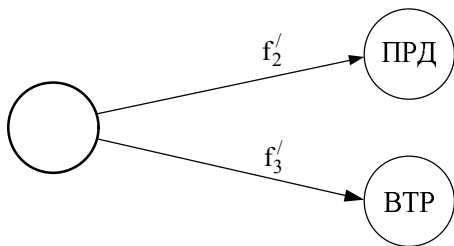


Рис. 3. Кінцевий ймовірнісно-часовий граф

Функції переходів записується таким виразом:

$$f'_2 = Z^{T_{ПРМ}} \times \left[\sum_{j=1}^K P_{Б_j} \left(\frac{P_M Z^{T_{ПРД}}}{1 - (1 - P_M) Z^{T_{ПРД}}} \right)^{j-1} \right] \times \quad (10)$$

$$\times \frac{P_M}{1 - (1 - P_M) Z^{T_{ПРД}}} \cdot Z^{T_{ПРД}}; \quad f'_3 = Z^{T_{ПРМ}} \cdot \left(1 - \sum_{j=1}^K P_{Б_j} \right). \quad (11)$$

Похідна функція дорівнює $F(Z) = f'_2 + f'_3$. Тоді середній час комутації:

$$T_{СР} = \frac{F(Z)}{dZ} \Big|_{Z=1} = T_{ПРМ} + \frac{1}{P_M} \cdot T_{ПРД} \cdot \sum_{j=1}^K j \cdot P_{Б_j} \quad (12)$$

Ймовірність втрати пакета через переповнення буфера:

$$P_{(ПОТ)} = f'_3 \Big|_{Z=1} = 1 - \sum_{j=1}^K P_{Б_j} \quad (13)$$

Очевидно, що сума

$$\sum_{j=1}^K P_{Б_j} \leq 1.$$

Причому, якщо вона дорівнює одиниці, втрати пакетів через переповнення буфера не відбувається, тому що всі вони записуються в вільні комірки.

Середній час зручніше оцінювати числом одиничних посилок (тобто при $V=1$ біт/с)

З урахуванням того, що

$$T_{ПРМ} = \frac{m}{V^{ВХ}}, \quad T_{ПРД} = \frac{m}{V^{ВИХ}},$$

введемо коефіцієнт:

$$\beta = \frac{V^{ВИХ}}{V^{ВХ}}, \quad (14)$$

$$V^{ВИХ} = \beta V^{ВХ}, \quad V^{ВХ} = \frac{V^{ВИХ}}{\beta} \quad (15)$$

Тоді,

$$T_{ПРМ} = m,$$

$$T_{ПРД} = \frac{m}{\beta}.$$

Відповідно, середній відносний час комутації (виражене в одиничних послілках):

$$T_{СР.ВІД} = \frac{T_{СР}}{m} \Big|_{V=1} = \frac{1}{m} \left[m + \frac{1}{P_M} \cdot \frac{m}{\beta} \sum_{j=1}^K j P_{Б_j} \right] = 1 + \frac{1}{\beta P_M} \sum_{j=1}^K j P_{Б_j}.$$

Для попередньої (грубої) оцінки приймемо, що однакові (але при цьому їх сума менше 1) [19].

Як видно з графіків, наведених на рис. 4, основними шляхами скорочення відносного середнього часу комутації в умовах максимального завантаження є:

- підвищення ймовірності мультиплексування пакетів;
- більш висока бітова швидкість вихідного порту по відношенню до вхідного трафіка [9, 10].

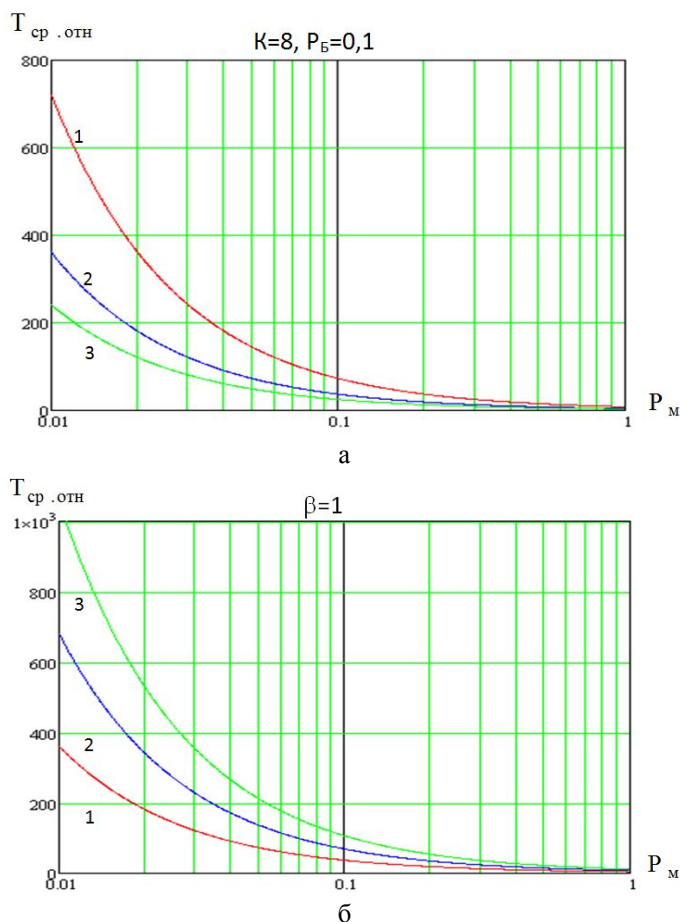


Рис. 4. Оцінка середнього часу комутації
 а – (1 – при $\beta=0,5$; 2 – при $\beta=1$; 3 – при $\beta=1,5$), б – (1 – при $K=8, P_B=0,1$; 2 – при $K=16, P_B=0,05$; 3 – при $K=32, P_B=0,02$)

Висновки

Таким чином, необхідно прагнути до забезпечення такого режиму комутації, при якому б підтримувалася мінімально можлива чергу в буферах при заданих параметрах. Особливо це важливо для випадку максимального завантаження, оскільки тільки шляхом недопущення переповнення буфера можна виключити втрату пакетів в комутаторі.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОММУТАЦИИ В СРЕДСТВАХ С ПОЛНОСВЯЗНУЮ ТОПОЛОГИИ В СЕТЯХ АСУВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

С.О. Оберемок

Предложена модель коммутации, которая позволяет оценить пропускную способность узлов распределенной сети автоматизированной системы управления воздушным движением. Предложены пути повышения эффективности функционирования средств коммутации. В результате моделирования получены зависимости среднего времени коммутации от вероятности мультиплексирования пакетов при различных коэффициентах и вероятности буферизации.

Ключевые слова: пакет, буферизация, фильтрация, мультиплексирования, коммутации пакетов, АСУ воздушным движением, полносвязная топология, буфер, выходной порт, входящий порт, максимальная загрузка.

MATHEMATICAL MODEL FOR THE PROCESS OF COMPUTING IN FULL CONTROLLED TOPOLOGIES IN THE NETWORK OF ACSAIR MOVEMENT

S.O. Oberemok

In the article the switching model is proposed which allows to estimate the bandwidth of nodes of distributed network of automated air traffic control system. The ways of increasing the efficiency of switching facilities functioning are proposed. As a result of simulation, the dependencies of the average switching time on the probability of multiplexing packets with different coefficients and the probability of buffering are obtained.

Keywords: package, buffering, filtering, multiplexing, packet switching, air traffic control system, full-fledged topology, buffer, out port, inbound port, maximum download.

Список літератури

1. Соломатин А.В. Методы коммутации в вычислительных сетях / А.В. Соломатин // Информационные системы. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ. – 2002.- Вып. 1(2). – С.42-47.
2. Мизин М.Н. Сети коммутации пакетов / Н.А. Мизин, В.А. Богатырев. – М.: Радио и связь, 2000. – 408с.
3. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера / В.П. Сигорский – К.: Техника 2000. – 765с.
4. Дружинин В.В. Системотехника / В.В. Дружинин, Д.С. Конторов. – М.: Радио и связь, 1985. – 200 с.
5. Зайченко Ю. П., Гонта Ю. В. Структурная оптимизация сетей ЭВМ. – К.: Техника, 1986. – 168 с.
6. Пасечников И. И. Геометрическое совмещение пространств состояний каналов связи и путевых потоков в информационных сетях // Труды 3-й международной научно-технической конференции «Кибернетика и технологии XXI века». – Воронеж, 2002. – С. 367-379.
7. ITU – T Recommendation Y.1540, IP Packet Transfer and Availability Performance parameters. December 2002.
8. Lee G. M. A survey of multipath routing for traffic engineering // Proc. of LNCS 3391. Springer-Verlag. - 2015. - Vol. 4. - P. 635-661.
9. Tahirramani K. H., Weiss A., Kanwar S., Kalya-Naraman S., Gandhi. A. BANANAS: An evolutionary framework for explicit and multipath routing in the internet // Proc. ACM SIGCOMM Workshop on Future Directions in Network Architecture. Karlsruhe. - 2013. – P. 277-288.
10. EUROCONTROL Standard document for radar data exchange. Part 2a Transmission of monoradar data target reports. SUR.ETI.ST05.2000-STD 02a-01. Edition 1.1,2012

Надійшла до редколегії 29.01.2018

Рецензент: д-р техн. наук, доц. М.А. Павленко, Харківський національний університет Повітряних Сил імені І. Кожедуба, Харків.

Ю.Е. Стоян, А.В. Панкратов, Т.Е. Романова

Институт проблем машиностроения имени А.Н. Подгорного НАН Украины

УПАКОВКА МНОГОГРАННИКОВ В ВЫПУКЛЫЙ КОНТЕЙНЕР МИНИМАЛЬНОГО ОБЪЕМА

Рассматривается задача упаковки заданного набора произвольных многогранников в выпуклый контейнер минимального объема. Допускаются непрерывные вращения и трансляции многогранников. Учитываются минимально допустимые расстояния между многогранниками и ограничения баланса. Построена математическая модель в виде задачи нелинейного программирования с использованием ρ -функций и квази ρ -функций. Предложен эффективный метод решения, который включает в себя быстрый алгоритм поиска допустимой стартовой точки и процедуру локальной оптимизации. Преимущество предложенного метода подтверждается результатами численных экспериментов.

Ключевые слова: упаковка, многогранники, непрерывное вращение, выпуклый контейнер, математическое моделирование, нелинейная оптимизация.

Введение

Задачи упаковки и раскроя ([1 – 3]) имеют очень широкий спектр применения, например, в биологии, минералогии, медицине, материаловедении, нанотехнологиях, робототехнике, системах распознавания образов, системах управления космическими аппаратами, а также в химической промышленности, энергетике, машиностроении, судостроении, авиастроении, гражданском строительстве.

В данном исследовании рассматриваются задачи упаковки набора произвольных многогранников в выпуклый контейнер минимального объема.

Одно из интересных применений для этой задачи возникает при оптимизации аддитивного производства, часто упоминаемого как 3D печать. Технологии аддитивного производства создают объект посредством добавления тонкого слоя материала за один цикл, например, вовремя экструзии материала или спекания слоев порошкового материала. Упаковка объектов в один компактный паттерн может уменьшить время печати, улучшая использование производственных мощностей, и уменьшить необходимость в дополнительном поддерживающем материале.

Задача оптимальной упаковки многогранников является NP-сложной [4], и, как следствие, методологии решения, как правило, используют эвристики (см., например, [5]-[8]). В некоторых работах (см., например, [9]-[11]) строятся математические модели и применяются методы математического программирования.

В данном исследовании предлагается подход, основанный на математическом моделировании отношений между геометрическими объектами с использованием метода ρ -функций [12], который позволяет сформулировать задачу упаковки в виде задачи нелинейного программирования. Рассматривается задача упаковки в следующей постановке.

Постановка задачи

Контейнеры. Имеется выпуклый контейнер $\Omega = \Omega(p)$ с переменными метрическими характеристиками, $\Omega = \{(x, y, z, p) \in \mathbb{R}^3 : \Psi(x, y, z, p) \geq 0\}$, заданный в неподвижной системе координат OXYZ, где $\Psi(x, y, z, p) = \min\{\Psi_s(x, y, z, p), s = 1, \dots, n_\Omega\}$, $\Psi_s(x, y, z, p)$ – дифференцируемые функции, $s = 1, \dots, n_\Omega$. В частности, рассматриваются следующие виды контейнеров:

$$B = \{(x, y, z, l, w, h) \in \mathbb{R}^3 \mid \min\{x + l, -x + l, y + w, -y + w, z + h, -z + h\} \geq 0\} -$$

кубоид с переменными размерами l, w и h , $p = (l, w, h)$;

$$S = \{(x, y, z, r) \in \mathbb{R}^3 \mid r^2 - x^2 - y^2 - z^2 \geq 0\} -$$

шар с переменным радиусом r , $p = (r)$;

$$E = \{(x, y, z, \lambda) \in \mathbb{R}^3 \mid \lambda^2 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} \geq 0\} -$$

эллипсоид с полуосями $\lambda a, \lambda b, \lambda c$, $p = (\lambda)$, λ – переменный коэффициент гомотетии, $\lambda = 1$ соответствует исходным размерам контейнера;

$$C = \{(x, y, z, \lambda) \in \mathbb{R}^3 \mid \min\{(\lambda r)^2 - x^2 - y^2, -z + \lambda h, z + \lambda h\} \geq 0\} -$$

цилиндр высоты λh и основанием радиуса λr , λ – переменный коэффициент гомотетии, $p = (\lambda)$, $\lambda = 1$ соответствует исходным размерам контейнера;

$$A = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \min_{s=1,2} \Psi_s(x, y, z, r) \geq 0\}, -$$

область, образованная непустым пересечением двух шаров с центрами в точках (x_s, y_s, z_s) переменного радиуса $r_s = r$, $p = (r)$, где

$$\Psi_s(x, y, z, r) = r^2 - (x - x_s)^2 - (y - y_s)^2 - (z - z_s)^2,$$

$s = 1, 2$. Полагаем, что $(x_1 = a, y_1 = 0, z_1 = 0)$ $(x_2 = -a, y_2 = 0, z_2 = 0)$, тогда

$$\Psi_1(x, y, z, r) = r^2 - (x - a)^2 - y^2 - z^2,$$

$$\Psi_2(x, y, z, r) = r^2 - (x + a)^2 - y^2 - z^2.$$

Отметим, что каждая из метрических характеристик контейнера Ω может быть переменной сама по себе, например a, b, c – для эллипсоида или r, h – для цилиндра.

Контейнер Ω имеет фиксированные параметры размещения $(0, 0, 0)$ в глобальной системе координат.

Объекты. Пусть $\{1, 2, \dots, N\} = J_N$ и набор многогранников $Q_q, q \in J_N$ заданы.

В целях данной работы предположим, что масса M_q и центр массы c_q каждого многогранника Q_q известны.

С каждым из многогранников Q_q связана его локальная система координат с центром в v_q . Каждый невыпуклый многогранник Q_q представлен в виде объединения выпуклых многогранников $K_j^q, j = 1, \dots, n_q$. Каждый выпуклый многогранник K_j^q определяется его вершинами $p_s^{qj}, s = 1, \dots, m_j^q$, в системе координат невыпуклого многогранника Q_q .

В пределах данного исследования полагаем что $Q_q = \bigcup_{j=1}^{n_q} K_j^q$ – известно. Не теряя общности, полагаем, также, что центр v_q многогранника Q_q совпадает с центром описанной вокруг него сферы S_q радиуса r_q . Для построения описанной вокруг многогранника сферы используется быстрый алгоритм, предложенный в работе [13], который вычисляет наименьшую охватывающую сферу для набора точек (<https://github.com/hbf/miniball>).

Положение и ориентация каждого многогранника Q определяется вектором $u = (v, \theta)$ его переменных параметров размещения. Здесь $v = (x, y, z)$ – вектор трансляции, $\theta = (\theta^1, \theta^2, \theta^3)$ – вектор угловых параметров, $\theta^1, \theta^2, \theta^3$ – углы Эйлера.

Многогранник, повернутый на θ и транслированный на вектор v обозначается через $Q(u) = \{p \in R^3 : p = v + M(\theta) \cdot p^0, p^0 \in Q^0\}$, где $u = (v, \theta)$, Q^0 – неповернутый и нетранслированный многогранник Q , $M(\theta) = M(\theta^1, \theta^2, \theta^3)$ – матрица поворота.

Между каждой парой многогранников Q_q и $Q_g, q < g \in J_N$, могут быть заданы минимально допустимые расстояния, также как и между многогранником $Q_q, q \in J_N$, и границей контейнера Ω .

Ограничения баланса могут быть учтены как минимальное отклонение механической системы (контейнер с размещенными в нем объектами) от заданной точки. Рассматриваются различные типы функций цели, которые зависят от параметров размещения многогранников и переменных метрических характеристик контейнера Ω . Отметим, что любая метрическая характеристика контейнера Ω может быть переменной либо фиксированной.

Задача упаковки многогранников может быть сформулирована следующим образом:

Упаковать набор многогранников $Q_q, q \in J_N$, внутри выпуклого контейнера Ω , учитывая геометрические и механические ограничения, так, чтобы функция цели достигала экстремума.

Моделирование ограничений размещения

В этом разделе описывается методология моделирования ограничений включения, непересечения и ограничений на минимально допустимые расстояния. Рассмотрим ограничения размещения, которые встречаются в задаче упаковки многогранников.

Пусть $\rho_{qg} > 0$ – минимально допустимое расстояние между парой многогранников Q_q и Q_g и $\rho_q > 0$ – минимально допустимое расстояние между многогранником Q_q и объектом Ω^* .

Сформулируем ограничения размещения следующим образом:

Ограничения непересечения

$$\text{int } Q_q \cap \text{int } Q_g = \emptyset, q < g \in J_N.$$

Ограничения включения

$$Q_q \subset \Omega \Leftrightarrow \text{int } Q_q \cap \Omega^* = \emptyset, q \in J_N, \Omega^* = R^3 \setminus \text{int } \Omega.$$

Ограничения на минимально допустимые расстояния между многогранниками

$$\text{dist}(Q_q, Q_g) = \min_{a \in Q_q, b \in Q_g} d(a, b) \geq \rho_{qg},$$

где $d(a, b)$ – евклидово расстояние между $a, b \in R^3$.

*Ограничения на минимально допустимые расстояния между многогранником и объектом Ω^**

$$\text{dist}(Q_q, \Omega^*) \geq \rho_q, q \in J_N.$$

Отметим, что, если допустимые расстояния не заданы, то имеем дело с ограничениями непересечения, $\text{int } Q_q \cap \text{int } Q_g = \emptyset$, и ограничениями включения, $Q_q \subset \Omega \Leftrightarrow \text{int } Q_q \cap \Omega^* = \emptyset$.

С целью аналитического описания ограниченного размещения, перечисленных выше, используется метод ϕ -функций [12].

Ограничения непересечения. Для построения квази ϕ -функций и псевдонормализованных квази ϕ -функций для двух невыпуклых многогранников используются квази ϕ -функции и псевдонормализованные квази ϕ -функции для каждой пары выпуклых многогранников, которые формируют исходные невыпуклые многогранники.

Прежде всего, рассмотрим квази ϕ -функцию для пары выпуклых многогранников.

Пусть $A(u_A)$ и $B(u_B)$ – два выпуклых многогранника, заданных собственными вершинами p_s^A , $s = 1, \dots, m_A$, и p_s^B , $s = 1, \dots, m_B$.

Квази ϕ -функция $\Phi'^{AB}(u_A, u_B, u' = u_P)$ для выпуклых многогранников $A(u_A)$ и $B(u_B)$ может быть определена следующим образом:

$$\Phi'^{AB}(u_A, u_B, u' = u_P) = \min\{\Phi^{AP}(u_A, u_P), \Phi^{BP^*}(u_B, u_P)\}, \quad (1)$$

где $\Phi^{AP}(u_A, u_P)$ – ϕ -функция для $A(u_A)$ и $P(u_P)$,

$\Phi^{BP^*}(u_B, u_P)$ – ϕ -функция для $B(u_B)$ и

$$P^*(u_P) = R^3 \setminus \text{int} P(u_P),$$

$$P(u_P) = \{(x, y, z) : \psi_P = \alpha \cdot x + \beta \cdot y + \gamma \cdot z + \mu_P \leq 0\},$$

$$\alpha = \sin \theta_P^1 \sin \theta_P^2, \beta = -\cos \theta_P^1 \sin \theta_P^2, \gamma = \cos \theta_P^2,$$

θ_P^1 и θ_P^2 соответствующие переменные углы Ейлера (при $\theta_P^3 = 0$), $u_P = (\theta_P^1, \theta_P^2, \mu_P)$ – вектор переменных параметров, которые определяют плоскость $L_{AB} = \{(x, y, z) : \psi_P = 0\}$ в трехмерном Евклидовом пространстве ($\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 1$),

$$\Phi^{AP}(u_A, u_P) = \min_{1 \leq s \leq m_A} \psi_P(p_s^A),$$

$$\Phi^{BP^*}(u_B, u_P) = \min_{1 \leq s \leq m_B} (-\psi_P(p_s^B)).$$

Как известно [14], если $\Phi'^{AB}(u_A, u_B, u_P) \geq 0$ для некоторых u_P , тогда $\text{int} A(u_A) \cap \text{int} B(u_B) = \emptyset$.

Пусть задано минимально допустимое расстояние ρ_{AB} между двумя произвольными выпуклыми многогранниками $A(u_A)$ и $B(u_B)$. Для описания ограничения на допустимые расстояния, $\text{dist}(A, B) \geq \rho_{AB}$, используются псевдонормализованные квази ϕ -функции для выпуклых многогранников $A(u_A)$ и $B(u_B)$, полученные следующим образом

$$\widehat{\Phi}'^{AB}(u_A, u_B, u_P) = \Phi'^{AB}(u_A, u_B, u_P) - 0.5\rho_{AB} \quad (2)$$

Заметим, что

$$\max_{u_P} \widehat{\Phi}'^{AB}(u_A, u_B, u_P) \geq 0 \Leftrightarrow \text{dist}(A, B) \geq \rho_{AB}.$$

Прежде, чем определить квази ϕ -функции и псевдонормализованные квази ϕ -функции для пары невыпуклых многогранников, представим заданный набор выпуклых многогранников, K_j^q , $j=1, \dots, n_q$, $q \in J_N$, в виде множества, состоящего из

$$n = \sum_{q=1}^N n_q \text{ выпуклых многогранников } K_i,$$

$i \in \{1, 2, \dots, n\} = I_n$, используя следующее правило:

$$K_j^q \rightarrow K_i, \quad i = \sum_{l=0}^{q-1} n_l + j, \quad j=1, \dots, n_q, \quad q \in J_N, \text{ при условии, что } n_0 = 0.$$

Введем вектор $\mathbf{a} = (a_1, \dots, a_n)$, $a_i \in J_N$, где $a_i = q$, если $K_i \subset \mathbb{Q}_q$, $q \in J_N$. Пусть

$I_n = I^1 \cup I^2 \cup \dots \cup I^N$ – упорядоченное разбиение I_n ,

где $I^q = \{i \in I_n, a_i = q\}$, $|I^q| = n_q$, $q \in J_N$. Пусть

$$\mathbb{Q}_q(u_q) = \bigcup_{i \in I^q} K_i(u_q) \text{ и } \mathbb{Q}_g(u_g) = \bigcup_{j \in I^g} K_j(u_g) - \text{невыпуклые многогранники и } q \neq g.$$

Тогда квази ϕ -функция для невыпуклых многогранников $\mathbb{Q}_q(u_q)$ и $\mathbb{Q}_g(u_g)$ может быть определена в виде:

$$\widehat{\Phi}'_{qg}(u_q, u_g, u_{qg}) = \min\{\widehat{\Phi}'_{ij}(u_q, u_g, u'_{ij}), i \in I^q, j \in I^g\}, \quad (3)$$

где $\widehat{\Phi}'_{ij}(u_q, u_g, u'_{ij})$ – псевдонормализованная квази ϕ -функция и u'_{ij} – вектор вспомогательных переменных для выпуклых многогранников $K_i(u_q)$ и $K_j(u_g)$, $i \in I^q, j \in I^g$, $u_{qg} = (u'_{ij}, i \in I^q, j \in I^g)$.

Ограничения включения. Псевдонормализованная ϕ -функция для невыпуклого многогранника $\mathbb{Q}_q(u_q)$ и объекта Ω^* может быть определена в виде

$$\widehat{\Phi}_q(u_q) = \min\{\widehat{\Phi}_i(u_q), i \in I^q\}, \quad (4)$$

где $\widehat{\Phi}_i(u_q)$ – псевдонормализованная ϕ -функция для выпуклого многогранника $K_i(u_q)$ и Ω^* , $i \in I^q$. Заменяя каждую псевдонормализованную ϕ -функцию $\widehat{\Phi}_i(u_q)$ в (4) на ϕ -функцию $\Phi_i(u_q)$ для $i \in I^q$, получаем ϕ -функцию $\Phi_q(u_q)$ для многогранника $\mathbb{Q}_q(u_q)$ и объекта Ω^* .

Для описания ограничений включения, $K_i(u_q) \subset \Omega \Leftrightarrow \text{int} K_i(u_q) \cap \Omega^* = \emptyset$, используются ϕ -функции для выпуклого многогранника $K_i(u_q)$ и объекта Ω^* [12].

Пусть $K_i(u_q)$ – выпуклый многогранник, заданный в собственной локальной системе координат

своими вершинами p_k^i , $k = 1, \dots, m_i$, где $p_k^i = (p_{kx}^i, p_{ky}^i, p_{kz}^i)$. Phi-функция для $K_i(u_q)$ и объекта Ω^* имеет вид

$$\Phi_i(u_q, p) = \min \{ \Psi_s(u_q, p), s = 1, \dots, n_{\Omega} \}, \quad (5)$$

$$\Psi_s(u_q, p) = \min \{ \varphi_s(p_k^i(u_q), p), k = 1, \dots, m_i \}.$$

В частности, используются следующие phi-функции для описания ограничений включения.

Phi-функция для выпуклого многогранника $K_i(u_q)$ и объекта $S^ = \mathbb{R}^3 / \text{int } S$*

$$\Phi^{K_i S^*}(u_q, r) = \min \{ \varphi(p_k^i(u_q), r), k = 1, \dots, m_i \},$$

$$\varphi(p_k^i(u_q), r) =$$

$$= r^2 - (p_{kx}^i(u_q))^2 - (p_{ky}^i(u_q))^2 - (p_{kz}^i(u_q))^2.$$

Phi-функция для выпуклого многогранника $K_i(u_q)$ и объекта $E^ = \mathbb{R}^3 / \text{int } E$*

$$\Phi^{K_i E^*}(u_q, \lambda) = \min \{ \varphi(p_k^i(u_q), \lambda), k = 1, \dots, m_i \},$$

$$\varphi(p_k^i(u_q), \lambda) =$$

$$= \lambda^2 \frac{(p_{kx}^i(u_q))^2}{a^2} - \frac{(p_{ky}^i(u_q))^2}{b^2} - \frac{(p_{kz}^i(u_q))^2}{c^2}.$$

Phi-функция для выпуклого многогранника $K_i(u_q)$ и объекта $B^ = \mathbb{R}^3 / \text{int } B$*

$$\Phi^{K_i B^*}(u_q, l, h, w) = \min \{ \Psi_s(u_q, l, h, w), s = 1, \dots, 6 \},$$

$$\Psi_s(u_q, l, h, w) = \min \{ \varphi_{ks}^i(u_q, l, h, w), k = 1, \dots, m_i \},$$

$$\varphi_{k1}^i(u_q, l, h, w) = p_{kx}^i(u_q) + l, \quad \varphi_{k2}^i(u_q) = -p_{kx}^i(u_q) + l,$$

$$\varphi_{k3}^i(u_q, l, h, w) = p_{yk}^i(u_q) + w,$$

$$\varphi_{k4}^i(u_q, l, h, w) = -p_{yk}^i(u_q) + w,$$

$$\varphi_{k5}^i(u_q, l, h, w) = p_{zk}^i(u_q) + h,$$

$$\varphi_{k6}^i(u_q, l, h, w) = -p_{zk}^i(u_q) + h.$$

Phi-функция для выпуклого многогранника $K_i(u_q)$ и объекта $C^ = \mathbb{R}^3 / \text{int } C$*

$$\Phi^{K_i C^*}(u_q, \lambda) = \min \{ \Psi_s(u_q, \lambda), s = 1, 2, 3 \},$$

$$\Psi_s(u_q, \lambda) = \min \{ \varphi_s(p_k^i(u_q), r), k = 1, \dots, m_i \},$$

$$\varphi_1(p_k^i(u_q), \lambda) = (\lambda r)^2 - (p_{kx}^i(u_q))^2 - (p_{yk}^i(u_q))^2,$$

$$\varphi_2(p_k^i(u_q), \lambda) = -p_{zk}^i(u_q) + \lambda h,$$

$$\varphi_3(p_k^i(u_q), \lambda) = p_{zk}^i(u_q) + \lambda h.$$

Phi-функция для выпуклого многогранника $K_i(u_q)$ и объекта $\Lambda^ = \mathbb{R}^3 / \text{int } \Lambda$*

$$\Phi^{K_i \Lambda^*}(u_q, r) = \min \{ \Psi_1(u_q, r), \Psi_2(u_q, r) \}$$

$$\Psi_1(u_q, r) = \min \{ \varphi_1(p_k^i(u_q), r), k = 1, \dots, m_i \},$$

$$\varphi_1(p_k^i(u_q), r) =$$

$$= r^2 - (p_{kx}^i(u_q) - a)^2 - (p_{ky}^i(u_q))^2 - (p_{kz}^i(u_q))^2.$$

$$\Psi_2(u_q, r) = \min \{ \varphi_2(p_k^i(u_q), r), k = 1, \dots, m_i \},$$

$$\varphi_2(p_k^i(u_q), r) =$$

$$= r^2 - (p_{kx}^i(u_q) + a)^2 - (p_{ky}^i(u_q))^2 - (p_{kz}^i(u_q))^2.$$

Пусть задано минимально допустимое расстояние $\rho_q > 0$ между выпуклым многогранником $K_i(u_q)$ и объектом Ω^* . Для описания ограничения на допустимые расстояния, $\text{dist}(K_i, \Omega^*) \geq \rho_q$, используется псевдонормализованная phi-функция для выпуклого многогранника $K_i(u_q)$ и объекта Ω^* вида

$$\widehat{\Phi}_i(u_q) = \Phi_i(u_q) - \rho_q. \quad (6)$$

Математическая модель

Вектор $u \in R^\sigma$ всех переменных может быть описан следующим образом: $u = (\zeta, \tau) \in R^\sigma$, где $\zeta = (p, u_1, u_2, \dots, u_N)$, p – вектор переменных метрических характеристик заданного контейнера Ω и $u_{a_i} = (v_{a_i}, \theta_{a_i}) = (x_{a_i}, y_{a_i}, z_{a_i}, \theta_{a_i}^1, \theta_{a_i}^2, \theta_{a_i}^3)$ – вектор параметров размещения K_i , $i \in I_n$, индекс $a_i \in \{1, 2, \dots, N\}$ – компонента “склеивающего” вектора a . Здесь $\tau = (u_p^1, \dots, u_p^m)$ – вектор всех вспомогательных переменных, $u_p^s = (\theta_p^{1s}, \theta_p^{2s}, \mu_p^s)$ – вектор дополнительных переменных для s -ой пары выпуклых многогранников определенных в (1), $s = 1, \dots, m$, $m = \text{card}(\Xi)$,

$$\Xi = \{(i, j), a_i \neq a_j, i < j \in I_n\}, \quad (7)$$

$\sigma = p + 6N + 3m$ – размерность задачи.

Математическая модель задачи упаковки многогранников может быть сформулирована в следующем виде

$$\min_{u \in W \subset R^\sigma} F(u), \quad (8)$$

$$W = \{u \in R^\sigma : \widehat{\Phi}'_{ij}(u_{a_i}, u_{a_j}, u'_{a_i a_j}) \geq 0, \quad (9)$$

$$(i, j) \in \Xi, \widehat{\Phi}_i(u_{a_i}, p) \geq 0, i \in I_n\},$$

где $F(u) = p$, $\widehat{\Phi}'_{ij}(u_{a_i}, u_{a_j}, u'_{a_i a_j})$ – псевдонормализованная квази phi-функция определенная в (2), $a_i, a_j \in I_n$, $(i, j) \in \Xi$, $u'_{a_i a_j} = u_p^s$, $s = 1, \dots, m$, Ξ приведено в (7), для K_i и K_j , учитывая минимально допустимые расстояния $\rho_{qg} > 0$, $\widehat{\Phi}_i(u_{a_i}, p)$ – псев-

донормализованная ϕ -функция, определенная в (6) для K_i и объекта Ω^* , учитывая минимально допустимые расстояния $\rho_q > 0$. Если ρ_{qg} и ρ_q не заданы, то заменяем псевдонормализованные квази ϕ -функции $\hat{\Phi}'_{ij}(u_{a_i}, u_{a_j}, u'_{a_i a_j})$ на квази ϕ -функции $\Phi'_{ij}(u_{a_i}, u_{a_j}, u'_{a_i a_j})$, определенные в (1), и псевдонормализованные ϕ -функции $\hat{\Phi}_i(u_{a_i}, p)$ на ϕ -функции $\Phi_i(u_{a_i}, p)$, определенные в (5).

Следует отметить, что для того, чтобы избежать избыточности неравенств в ограничениях включения, можно использовать набор псевдонормализованных ϕ -функций $\hat{\Phi}_q^h(u_q, p) \geq 0$, $q \in J_N$, для выпуклой оболочки невыпуклых многогранников \mathbb{Q}_q , вместо набора псевдонормализованных ϕ -функций $\hat{\Phi}_i(u_{a_i}, p) \geq 0$, $i \in I_n$, для выпуклых многогранников K_i , $i \in I_n$.

Каждое неравенство квази ϕ -функции в (9) представлено системой неравенств с дифференцируемыми функциями. Модель (8)-(9) является невыпуклой непрерывной задачей нелинейного программирования и содержит все глобально оптимальные решения. Таким образом, существует возможность непосредственно использовать глобальные NLP-солверы для решения задачи (8)-(9). Однако, на практике математическая модель (8)-(9) содержит большое количество переменных и огромное число неравенств, а именно: $O(n^2)$ нелинейных неравенств и $O(n^2)$ переменных с учетом вспомогательных переменных, необходимых для построения квази ϕ -функций, где n – число выпуклых многогранников. В этой связи поиск локально оптимального решения становится практически нереальной задачей для существующих современных NLP-солверов, применяя их непосредственно к модели (8)-(9): для $N > 15$, стартуя из случайной точки и для $N > 30$, стартуя из допустимой точки. Для поиска “хорошего” локально оптимального решения за разумное время предлагается стратегия, которая включает быстрый алгоритм поиска допустимой стартовой точки и специальную процедуру локальной оптимизации. В большинстве случаев эта процедура сводит задачу (8)-(9) к последовательности подзадач нелинейного программирования значительно меньшей размерности и со значительно меньшим числом нелинейных неравенств.

Стратегия решения

Стратегия решения задачи (8)-(9) основана на методе мультистарта и включает в себя такие этапы:

1) формирование множества $\{\zeta^0\}$ векторов $\zeta^0 = (p^0, u_1^0, u_2^0, \dots, u_N^0)$ допустимых параметров раз-

мещения многогранников, размещенных в контейнере Ω^0 с размерами (p^0) в задаче (8)-(9). В данном исследовании используется алгоритм, основанный на гомотопических преобразованиях объектов (см., например, [17]);

2) поиск локального минимума функции цели $F(u)$ в задаче (8)-(9), стартуя из каждой точки множества $\{\zeta^0\}$, полученной на первом этапе. Для поиска локального минимума задачи (8)-(9) используется COMPOLY алгоритм, который подробно описан в [17] для случая, когда контейнер имеет форму кубоида;

3) лучший из найденных на втором этапе локальных минимумов выбирается в качестве локально оптимального решения задачи (8)-(9).

Поскольку задача (8)-(9) не может быть решена для $N > 30$ при непосредственном использовании современных NLP-солверов (стартуя из допустимой точки), предлагается специальный алгоритм поиска локального оптимального решения.

COMPOLY алгоритм сводит задачу (8)-(9), которая имеет большое число неравенств и большую размерность $O(n^2)$ множества допустимых решений W (9), к последовательности подзадач нелинейного программирования с меньшим количеством нелинейных неравенств $O(n)$ и меньшей размерности $O(n)$. Ключевая идея этого алгоритма заключается в следующем. Для каждого вектора допустимых параметров размещения размещаемых многогранников, строится фиксированный индивидуальный кубический контейнер для сфер, описанных вокруг соответствующих выпуклых многогранников. Затем каждая из сфер размещается внутри индивидуальных контейнеров. Движение каждой из сфер в фиксированном индивидуальном контейнере описывается системой, состоящей из шести линейных ε -неравенств. Затем формируется подобласть допустимых решений следующим образом: добавляется $O(n)$ ε -неравенств (для всех сфер) к системе неравенств (9), что позволяет: удалить $O(n^2)$ ϕ -неравенств для тех пар многогранников, чьи индивидуальные контейнеры не пересекаются, а также удалить некоторые избыточные неравенства для ограничения включения многогранников в контейнер.

Далее осуществляется поиск локального минимума на подобласти размерности $O(n)$, каждая из которых описывается $O(n)$ нелинейными неравенствами; полученный локальный минимум используется в качестве стартовой точки для следующей итерации. На последней итерации получаем локальный минимум задачи (8)-(9).

Вычислительные эксперименты

Эксперименты проводились на компьютере AMD Athlon 64 X2 5200+. Язык программирования C++, Windows 7. Для решения задач нелинейного

программирования (при реализации шагов 1–2) использовалась программа IPOPT [15], <https://projects.coin-or.org/Ipopt>. Исходные данные об объектах приведены в работах [16, 17].

Пример 1. Рассматривается набор $n=40$ выпуклых многогранников. Контейнером является пересечение шаров с центрами в точках $(-10,0,0)$ и $(10,0,0)$ и с одинаковыми переменными радиусами r . На рис. 1, а приведено локально-оптимальное размещение заданного набора многогранников в

произвольной выпуклой области. Значение функции цели – $F^* = 27.624$. Время решения – 3730.34 сек.

Пример 2. Рассматривается набор $N=25$ невыпуклых многогранников. Контейнером является пересечение шаров с центрами в точках $(-10,0,0)$ и $(10,0,0)$ и с одинаковыми переменными радиусами r . На рис. 1, б приведено локально-оптимальное размещение многогранников. Значение функции цели – $F^* = r^* = 26.376$. Время решения – 8658.87 сек.

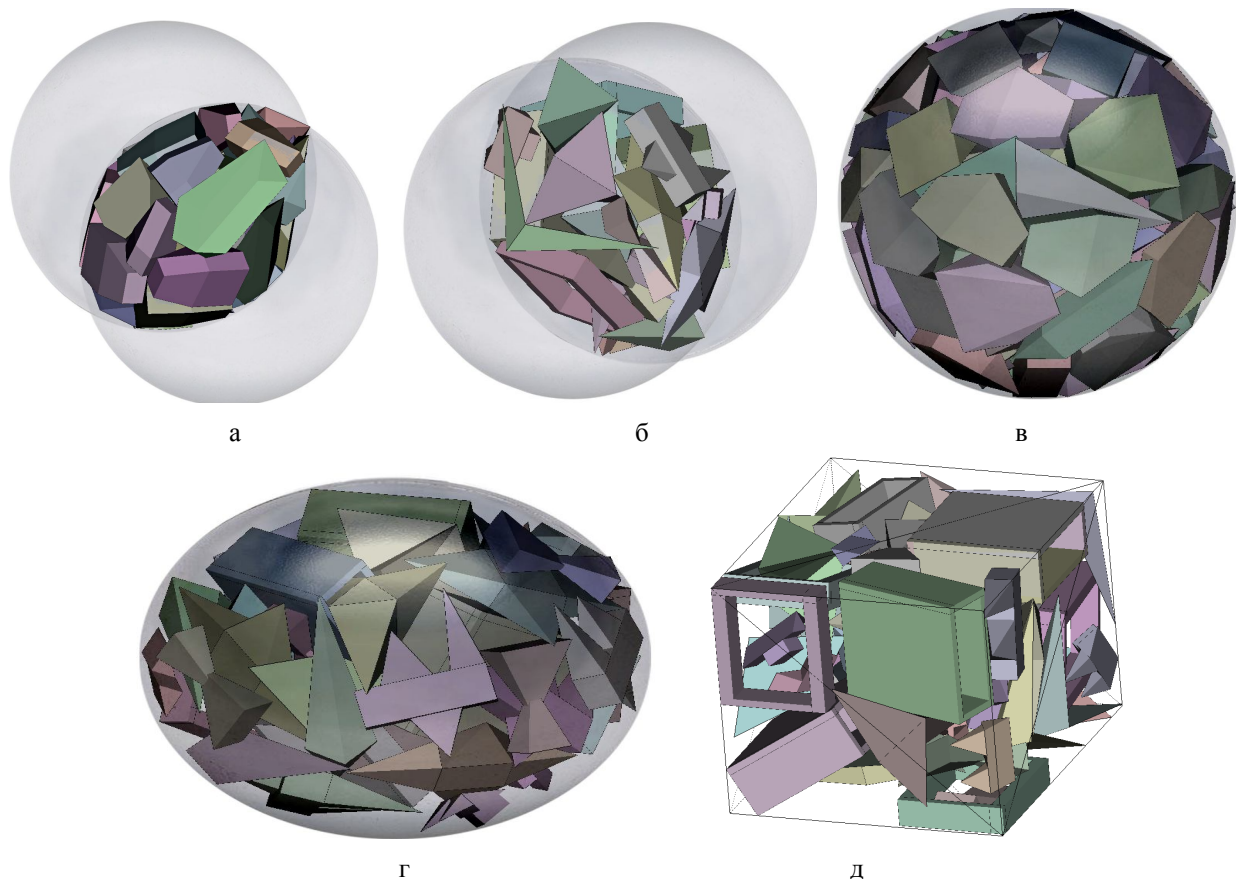


Рис. 2 Локально-оптимальное размещение многогранников для примеров: а – 1; б – 2; в – 5; г – 3; д – 4

Пример 3. Рассматривается набор $N=40$ невыпуклых многогранников. На рис. 1, г изображено локально оптимальное размещение многогранников в эллипсоиде, который имеет размеры: $a^* = 28.3608$, $b^* = 24.8157$, $c^* = 21.270$. Использовалось 10 стартовых точек. Время решения – 29491.35 сек.

Пример 4. Рассматривается набор $N=50$ невыпуклых многогранников. На рис. 1, д приведено локально оптимальное размещение набора невыпуклых многогранников. Контейнер имеет следующие размеры и объем $(l^*, w^*, h^*) = (46.9742, 34.8305, 41.6923)$ и $F(u^*) = 68214.5610$. Использовалась одна стартовая точка и установлен предел времени 10 часов.

Пример 5. Рассматриваются $N=98$ выпуклых многогранников с заданными весами. На рис. 1, в приведена локально оптимальная балансная упаковка многогранников в шаре минимального радиуса. Цель – минимизация радиуса r с минимальным отклонением d системы от центра шара: $F(u^*) = \kappa_1 r^* + \kappa_2 d^*$, $r^* = 18.0409$, $d^* = 0$. Использовалась одна стартовая точка. Время решения – 26150.23 сек.

Примеры локально оптимальных упаковок многогранников в цилиндрическом и шаровом контейнерах приведены в работе [18].

Выводы

В статье приведена математическая модель задачи оптимальной упаковки многогранников в вы-

пуклом контейнере в виде задачи нелинейного программирования.

Предложен эффективный алгоритм решения, который включает в себя быстрый алгоритм поиска стартовой точки, а также процедура COMPOLY локальной оптимизации для поиска “хороших” локально оптимальных решений. Процедура COMPOLY позволяет существенно сократить вычислительные затраты (время и память).

Список литературы

1. Bennell, J., Oliveira, J. (2008). *The geometry of packing problems: A tutorial*. *European Journal of Operational Research* 184:397–415.
2. Gomes, A. Miguel *Irregular Packing Problems: Industrial Applications and New Directions Using Computational Geometry*. (2014) *Paper in special issue on “Cutting and Packing”. Vol II | Part 1*, 378-383. DOI: 10.3182/20130522-3-BR-4036.00113.
3. Wascher, G., Hauner, H., Schumann, H. (2007). *An improved typology of cutting and packing problems*. *Eur. J. Oper. Res.*, **183**(3), 1109–1130.
4. Chazelle, B., Edelsbrunner, H., Guibas, L. J. (1989). *The complexity of cutting complexes*. *Discr. & Comput. Geom.*, **4**(2), 139–181. DOI: 10.1007/BF02187720.
5. Chen, E. R., Klotsa, D., Engel, M., Damasceno, P. F., Glotzer, S. C. (2014). *Complexity in surfaces of densest packings for families of polyhedra*. *Phys Rev X* **4**(1), DOI:10.1103/PhysRevX.4.011024.
6. Galvão, R. A., Oliveira J. F., Gonçalves J. F., Lopes M. P. (2016) *A container loading algorithm with static mechanical equilibrium stability constraints*. *Transportation Research, (Part B)*, **91**, 565-581. DOI: 10.1016/j.trb.2016.06.003.
7. Smeets, B., Odenthal, T., Vanmaercke, S., Ramon, H. (2015). *Polygon-based contact description for modeling arbitrary polyhedra in the Discrete Element Method*. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **290**, 277-289. DOI: 10.1016/j.cma.2015.03.004.
8. Tasios, N., Gantapara, A. P., Dijkstra M. (2014). *Glassy dynamics of convex polyhedra*. *The Journal of Chemical Physics*. **141**: 224502. PMID 25494755 DOI: 10.1063/1.49029922.
9. Egeblad, J., Nielsen, B. K., Brazil, M. (2009). *Translational packing of arbitrary polyhedra*. *Comp. Geom.*, **42**(4), 269–288. DOI:10.1016/j.comgeo.2008.06.003.
10. Fasano, G. A. (2013). *Global Optimisation point of view for non-standard packing problems*. *J. Glob. Optim.*, **55**(2), 279–299. DOI: 10.1007/s10898-012-9865-8.
11. Torquato, S., Jiao, Y. (2009). *Dense polyhedral packings: Platonic and Archimedean solids*. *Phys. Rev.*, **80**, 041104. DOI: 10.1103/PhysRevE.80.041104.
12. Chernov, N., Stoyan, Y., Romanova, T. (2010). *Mathematical model and efficient algorithms for object packing problem*. *Comput. Geom.: Theory and Appl.*, **43**(9), 535–553. DOI:10.1016/j.comgeo.2009.12.003.
13. Fischer, K., Gärtner, B. and Kutz, M. (2003). *Fast Smallest-Enclosing-Ball Computation in High Dimensions*. *Algorithms - ESA 2003*, **2832**, 630–641. DOI:10.1007/978-3-540-39658-1_57.
14. Stoyan, Y., Pankratov, A., Romanova, T. (2016). *Quasi phi-functions and optimal packing of ellipses*. *J. of Glob. Optim.*, **65** (2), 283–307. DOI: 10.1007/s10898-015-0331-2.
15. Wachter, A., Biegler, L. T. (2006). *On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming*. *Math. Program.*, **106** (1), 25–57. DOI: 10.1007/s10107-004-0559-y.
16. Stoyan, Y. G., Gil, N. I., Pankratov, A. V., et al., (2004). *Packing Non-convex Polyhedra into a Parallelepiped*. *Technische Universitat Dresden*. Mode of access: <http://www.math.tu-dresden.de/~scheith/ABSTRACTS/PREPRINTS/04-non-conv.pdf>
17. Romanova, T., Bennell, J., Stoyan, Y., Pankratov, A. (2018) *Packing of concave polyhedra with continuous rotations using nonlinear optimization*. *European Journal of Operational Research* **268** (1), 37-53. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.025>
18. Панкратов, А.В., Романова, Т.Е., Стоян, Ю.Е., Чугай, А.М. (2016). *Задача оптимізації упаковки многогранників в сферическом и цилиндрическом контейнерах*. *Eastern-European J. of Entrepr. Tech.*, **1/4** (79), 39–47.

Надійшла до редколегії 24.10.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Гребеннік, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

УПАКОВКА БАГАТОГРАННИКІВ В ОПУКЛИЙ КОНТЕЙНЕР МІНІМАЛЬНОГО ОБСЯГУ

Ю.Є. Стоян, А.В. Панкратов, Т.Є. Романова

Розглядається задача упаковки заданого набору довільних багатогранників в опуклий контейнер мінімального обсягу. Допускаються безперервні обертання і трансляції багатогранників. Враховуються мінімально допустимі відстані між многогранниками і обмеження балансу. Побудовано математичну модель у вигляді задачі нелінійного програмування з використанням ϕ -функцій і квазі ϕ -функцій. Запропоновано ефективний метод рішення, який включає в себе швидкий алгоритм пошуку допустимої стартової точки і процедуру локальної оптимізації. Перевага запропонованого методу підтверджується результатами численних експериментів.

Ключові слова: упаковка, багатогранники, безперервне обертання, опуклий контейнер, математичне моделювання, нелінійна оптимізація.

PACKAGING POLYHEDRONS INTO A CONVENIENT CONTAINER OF MINIMUM VOLUME

Yu.E. Stoyan, A.V. Pankratov, T.Ye. Romanova

The problem of packing a given set of arbitrary polyhedron into a convex container of minimal volume is considered. Continuous rotations and translations of polyhedron are allowed. Minimum distances between polyhedron and balance constraints are taken into account. A mathematical model is constructed in the form of a non-linear programming problem using ϕ -functions and quasi- ϕ -functions. An effective method of solution is proposed that includes a fast algorithm for finding an acceptable starting point and a procedure for local optimization. The advantage of the proposed method is confirmed by the results of numerical experiments.

Keywords: packing, polyhedron, continuous rotation, convex container, mathematical modeling, nonlinear optimization.

А.М. Чугай

Інститут проблем машинобудування імені А.М. Підгорного НАН України, Харків

МОДЕЛЮВАННЯ ЩІЛЬНОГО ПАКУВАННЯ ПОДІБНИХ 3D ОБ'ЄКТІВ

На основі ρ -функції для двох опуклих багатогранників побудована математична модель задачі упакування гомотетичних багатогранників у прямому паралелепіпеді мінімального об'єму. Наведено деякі особливості побудованої математичної моделі, на підставі яких запропоновано підхід для побудови початкових припустимих точок, швидкий алгоритм пошуку локальних екстремумів і спрямований неповний перебір локальних мінімумів для отримання наближення до глобального мінімуму. Наведено числові приклади.

Ключові слова: гомотетичні багатогранники, пакування, метод ρ -функцій, обертання, нелінійна оптимізація.

Стан проблеми та огляд літературних джерел

Розв'язок задач щільного пакування тривимірних геометричних об'єктів є актуальним у багатьох областях людської діяльності. Так наприклад, щільні пакування однорідних твердих часток становлять великий інтерес, оскільки можуть бути представлені у вигляді моделей фізичних систем, таких як рідина, скло та аморфні матеріали. Крім цього, системи щільноупакованих твердих тіл використовуються при проведенні досліджень в області гранульованих порошків і пористих матеріалів. Вивчення випадкових упакувань різних часток, також допомагає зрозуміти закономірності виникнення “безладу” у твердих тілах [1-3]. Для тривимірного моделювання, візуального й кількісного аналізу структурних особливостей різних твердих структур, а також для моделювання структури матеріалів, що використовуються у нанотехнологіях, можуть бути використані математичні моделі й методи теорії оптимізаційного геометричного проектування.

Огляд робіт, присвячених задачі пакування тривимірних геометричних об'єктів, дозволяє зробити висновок, що складність розв'язку розглянутої задачі обумовлена відсутністю ефективних алгоритмів її розв'язку. Більшість робіт зводиться до розміщення простих геометричних фігур (паралелепіпедів, циліндрів, сфер), у той час як більшість практичних задач вимагає розміщення об'єктів довільної форми. Тому пошук нових підходів і алгоритмів для розв'язку задачі розміщення тривимірних геометричних об'єктів залишається актуальним. Обчислювальна складність розв'язку задачі тривимірного пакування в загальній постановці змушує вводити ряд спрощень (\square), які звужують область припустимих розв'язків, однак, дозволяють знаходити раціональні пакування із прийнятними витратами обчислювальних ресурсів.

На сьогоднішній день у класі задач розміщення тривимірних геометричних об'єктів найменш ви-

вченими є задачі, у яких допускаються афінні перетворення не тільки трансляції, але й довільного повороту об'єктів. Разом з тим ці задачі мають важливе як теоретичне, так і практичне значення. По своїй постановці задачі розміщення тривимірних геометричних об'єктів є оптимізаційними. Однак, існує проблема застосування методів локальної та глобальної оптимізації для розв'язання задач розміщення неорієнтованих (тобто таких, що припускають довільні обертання) тривимірних об'єктів. Це обумовлено відсутністю конструктивних засобів математичного моделювання відносин між цими об'єктами. У статті [4] приводиться огляд сучасних підходів до розв'язку задач розміщення. Автори відзначають, що одним з перспективних підходів для побудови адекватних математичних моделей зазначених задач є метод ρ -функцій. На сьогодні побудові ρ -функцій (квазі ρ -функцій) для тривимірних об'єктів присвячені роботи [5-9].

Метою даної роботи є математичне моделювання щільного розміщення неорієнтованих гомотетичних багатогранників.

Постановка задачі

Нехай задані опуклі гомотетичні багатогранники P_i , $i \in I = \{1, 2, \dots, n\}$, та кубоїд (прямий прямокутний паралелепіпед)

$$C = \{X \in R^3 : w_2 \leq x_1 \leq w_1, l_2 \leq x_2 \leq l_1, \eta_2 \leq x_3 \leq \eta_1\},$$

параметри якого $w_1, w_2, l_1, l_2, \eta_1, \eta_2$ є змінними. Тоді вектор $Y = (w_1, w_2, l_1, l_2, \eta_1, \eta_2)$ визначає розміри C . Багатогранники P_i задані вершинами та коефіцієнтами гомотетії $h_i^\nabla, i \in I$. Вважаємо, що $1 = h_1^\nabla \geq h_2^\nabla \geq \dots \geq h_n^\nabla$ та хоча б одна з нерівностей виконується строго.

Розміщення P_i у R^3 визначається вектором трансляції $v_i = (x_i, y_i, z_i)$ та вектором кутів обертання $\theta_i = (\phi_i, \psi_i, \omega_i)$, $i \in I$. Таким чином, вектор

$u_i = (v_i, \theta_i) = (x_i, y_i, z_i, \phi_i, \psi_i, \omega_i)$ визначає розташування P_i в R^3 , а вектор $u = (u_1, u_2, \dots, u_n) \in R^m$, де $m = 6n$, визначає розташування $P_i, i \in I$, в R^3 .

Надалі багатогранник P_i з вектором v_i та кути θ_i позначимо через $P_i(u_i)$, а прями́й прямокутний паралелепіпед C зі змінними розмірами Υ через $C(\Upsilon)$.

Задача. Необхідно визначити вектор $u \in R^m$, який забезпечує розміщення $P_i(u_i), i \in I$, без їх взаємного перетину в прямому прямокутному паралелепіпеді $C(\Upsilon)$ так, щоб його об'єм

$$H(\Upsilon) = (w_2 - w_1)(l_2 - l_1)(h_2 - h_1)$$

досягав мінімального значення.

Математична модель та метод розв'язання

На основі *phi*-функцій [5] математична модель задачі може бути записана у вигляді класичної задачі нелінійного програмування

$$H(\Upsilon^*) = \min_{(u, \Upsilon) \in \Lambda} H(\Upsilon), \quad (1)$$

де

$$\Lambda = \{(u, \Upsilon) \in R^{m+6} : \Phi_{ij}(u_i, u_j) \geq 0, 0 < i < j \in I, \Phi_i(u_i, \Upsilon) \geq 0, i \in I, w_1 \geq 0, l_1 \geq 0, \eta_1 \geq 0, w_2 - w_1 \geq 0, l_2 - l_1 \geq 0, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\}.$$

Доведено, що

$$\Lambda = \bigcup_{q=0}^{\zeta} \Lambda_q,$$

де кожна з підобластей Λ_q визначається системою нерівностей, ліві частини яких є нескінченно диференційовані функції.

Таким чином, для знаходження точки глобального мінімуму задачі (1)-(2) необхідно розв'язати задачу

$$H(\Upsilon^*) = \min\{H(\Upsilon^{*q}), q \in Q\},$$

де

$$H(\Upsilon^{*q}) = \min_{(u, \Upsilon) \in \Lambda_q} H(\Upsilon), q \in Q.$$

Оскільки $\zeta \gg n!$, то за розумний час неможливо знайти розв'язок цієї задачі. Тому для пошуку наближення до глобального мінімуму задачі (1)-(2) пропонується підхід, який складається з наступних етапів: побудова початкових точок, пошук точок локальних мінімумів та їх спрямований неповний перебір для отримання наближення до глобального мінімуму.

Для отримання початкових точок покриваємо багатогранники P_i кулями S_i мінімальних радіусів $\rho_i^{\nabla}, i \in I$. Припускаємо, що $\Upsilon = \Upsilon^0$, зафіксовано і забезпечує розміщення багатогранників в C . Радіуси ρ_i куль $S_i, i \in I$, є змінними і формують вектор $\rho = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n) \in R^n$. Це дає можливість сформулювати наступну задачу

$$\Pi(\rho^0) = \max \Pi(\rho) = \max_{(v, \rho) \in \Omega} \sum_{i=1}^n \rho_i, \quad (3)$$

$$\Omega = \{(v, \rho) \in R^{4n}, \Phi_{ij}^{SS}(v_i, v_j, \rho_i, \rho_j) \geq 0,$$

де $0 < i < j \in I, \Phi_i^S(v_i, \rho_i) \geq 0, i \in I,$ (4)

$$s_i(\rho_i) = \rho_i - \rho_i^{\nabla} \geq 0, i \in I\};$$

$$\Phi_{ij}^{SS}(v_i, v_j, \rho_i, \rho_j) = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 - (\rho_i + \rho_j)^2;$$

$$\Phi_i^S(v_i, \rho) = \min\{x_i - \rho_i - w_2^0, y_i - \rho_i - l_2^0, z_i - \rho_i - \eta_2^0, w_1^0 - x_i - \rho_i, l_1^0 - y_i - \rho_i, \eta_1^0 - z_i + \rho_i\}.$$

Задаємо початкову точку (v^0, ρ^0) , де $v_i^0 \in C(\Upsilon^0), \rho^0 = 0$ і для цієї точки обчислюємо точку глобального максимуму (v^*, ρ^*) задачі (3)-(4).

Після цього беремо багатогранники $P_i(v_i^*)$ замість куль $S_i(v_i^*)$, задаємо випадково кути $\theta_i^s = (\phi_i^s, \psi_i^s, \omega_i^s) \in [0, \pi], i \in I$, фіксуємо їх та розв'язуємо задачу

$$H(\Upsilon^*) = \min_{(v, \Upsilon) \in \Gamma \subset R^{3n+6}} H(\Upsilon), \quad (5)$$

де $\Gamma = \{(v, \Upsilon) \in R^{3n+6} : \Phi_{ij}(v_i, v_j) \geq 0,$ (6)

$$0 < i < j \in I, \Phi_i(v_i, \Upsilon) \geq 0, i \in I,$$

$$w_1 \geq 0, l_1 \geq 0, \eta_1 \geq 0, w_2 - w_1 \geq 0,$$

$$l_2 - l_1 \geq 0, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\}.$$

Вочевидь, що

$$\Gamma = \bigcup_{q=0}^{\zeta} \Gamma_q,$$

де Γ_q визначається лінійною системою нерівностей.

Це означає, що пошук точок локальних мінімумів зводиться до розв'язання послідовності задач лінійного програмування.

Нехай точка (v^*, Υ^*) є точкою локального мінімуму задачі (5)-(6). Після цього будуємо початкову точку

$$(u^s, \Upsilon^s) = (v^*, \theta^s, \Upsilon^*).$$

Для цієї початкової точки знаходимо точку (u^{0*}, Υ^{0*}) локального мінімуму задачі (1)-(2).

Спрямований неповний перебір локальних мінімумів задачі (1)-(2) зводиться до розв'язку наступних допоміжних задач.

Припускаємо, що коефіцієнти гомотетії $h = (h_1, h_2, \dots, h_n) \in \Delta$ є змінними. Це дає можливість сформулювати задачу

$$H(\Upsilon) = \min_{\Upsilon=(u, \Upsilon, h) \in \Delta} H(\Upsilon), \quad (7)$$

$$\Delta = \{\Upsilon \in R^{7n+6}, \Phi_{ij}(u_i, u_j, h_i, h_j) \geq 0, \quad (8)$$

$$0 < i < j \in I, \Phi_i(u_i, \Upsilon, h_i) \geq 0,$$

$$h_i \geq 0, i \in I, H(\Upsilon^{0*}) - H(\Upsilon) \geq \varepsilon, w_1 \geq 0, l_1 \geq 0,$$

$$\eta_1 \geq 0, w_2 - w_1 \geq 0, l_2 - l_1 \geq 0, \eta_2 - \eta_1 \geq 0\};$$

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{2}\right)^t 0.1H(\Upsilon^{0*}), t = 0, 1, 2, \dots \quad (9)$$

Для початкової точки $\Upsilon^0 = (u^{0*}, \Upsilon^{0*}, h^\nabla)$ знаходимо точку локального мінімуму $\Upsilon^{*1} = (u^{*1}, \Upsilon^{*1}, h^{*1})$. Будуємо послідовність $h_{i_1}^1 \geq h_{i_2}^1 \geq \dots \geq h_{i_n}^1$. На основі цієї послідовності та послідовності $1 = h_1^\nabla \geq h_2^\nabla \geq \dots \geq h_n^\nabla$ формуємо точку (\tilde{u}, \tilde{h}) , де $\tilde{u}_j = u_{ij}^{*1}$, $\tilde{h}_j = \min\{h_{i_j}^1, h_j^\nabla\}$, $j \in I$.

Далі для початкової точки (\tilde{u}, \tilde{h}) обчислюємо точку (u^0, h^0) локального максимуму задачі

$$F(h^*) = \max_{(u, h) \in D} F(h) = \max_{i=1}^n h_i, \quad (10)$$

де

$$D = \{(u, h) \in R^{7n}, \Phi_{ij}(u_i, u_j, h_i, h_j) \geq 0, \quad (11)$$

$$i < j \in I, \Phi_i(u_i, h_i) \geq 0, h_i^\nabla - h_i \geq 0, h_i \geq 0, i \in I\}.$$

Якщо $F(h^0) = \sum_{i=1}^n h_i^0 = \sum_{i=1}^n h_i^\nabla = b$, то всі P_i , $i \in I$, пакуються у $C(\Upsilon^1)$. У цьому випадку для початкової точки (u^0, Υ^{0*}) знову розв'язуємо задачу (1)-(2) і так далі. Якщо $j \neq i_j$, $j \in I$, хоча б для однієї пари індексів i $F(h^0) < b$, то збільшуємо t у (9) на 1 і розв'язуємо задачу (7)-(8) і так далі, поки не отримаємо $F(h^0) = b$ або $j = i_j$, $j \in I$. У випадку $F(h^0) = b$ переходимо до розв'язування задачі (1)-(2). Якщо $j = i_j$, $j \in I$, попередня точка локального мінімуму задачі (1)-(2) приймається у якості наближення до точки глобального мінімуму цієї задачі.

Відзначимо, що для пошуку локальних екстремумів сформульованих оптимізаційних задач розроблено спеціальний метод декомпозиції, який дозво-

ляє значно зменшити обчислювальні витрати за рахунок значного зменшення кількості нерівностей у процесі пошуку локальних екстремумів.

Представимо невеликий приклад, який можна використовувати в якості тестового. Нехай задано найпростіший опуклий багатогранник з такими координатами чотирьох вершин: (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (0,0,0,-1).

Необхідно упакувати у прямий прямокутний паралелепіпед мінімального об'єму послідовність з 10 заданих багатогранників з такими коефіцієнтами гомотетії: 0.93, 0.92, 0.89, 0.87, 0.83, 0.84, 0.77, 0.75, 0.72, 0.7.

В результаті розв'язання задачі, використовуючи розроблений підхід, отримано точку локального мінімуму, у якій значення об'єму контейнеру дорівнює 2.4. Ця точка прийнята в якості наближення до глобального мінімуму задачі, координати її наведено у таблиці 1, а розміщення багатогранників представлено на рис. 1.

Таблиця 1

Параметри розміщення многогранників

i	x_i	y_i	z_i	Φ_i	Ψ_i	ω_i
1	9,86	9,53	9,45	5,55	4,71	5,55
2	9,61	10,09	10,09	2,25	-0,75	3,1
3	10,4	10,05	9,94	3,68	2,35	-1,23
4	10,48	10,03	10,03	3,67	2,34	0,38
5	9,58	10,09	10,42	1,52	-0,9	-1,52
6	10,39	10,21	10,1	1,17	3,97	3,28
7	10,75	10,14	9,93	3,31	2,53	2,36
8	8,99	10,01	10,06	2,28	3,14	1,6
9	10,53	10,34	10,06	4,19	5,43	-1,43
10	10,74	9,66	9,84	3,52	5,53	4,84

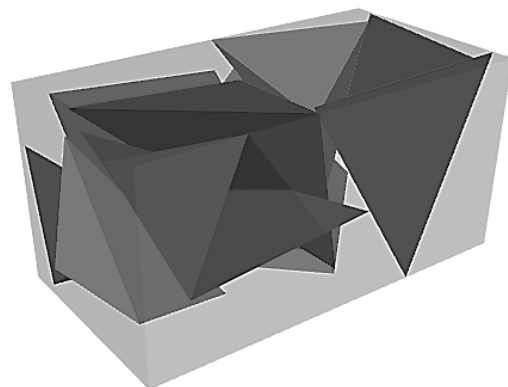


Рис. 1. Результат упакування 10 багатогранників

Для того щоб продемонструвати можливості розробленого програмного забезпечення на рис. 2 наведено результати розміщення 50 багатогранників, з кількістю 16 та 4 вершини.

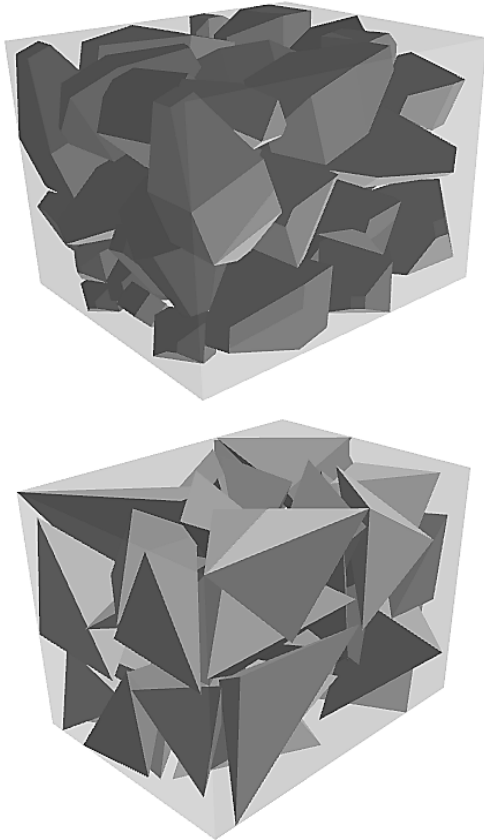


Рис. 2. Результати розміщення 50 різних багатогранників

ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано один з підходів для розв'язання задачі упакування опуклих гомотетичних багатогранників у прямий паралелепіпед, заснований на використанні методу ϕ -функцій. Використовуючи ϕ -функцію для двох опуклих багатогранників побудовано математичну модель задачі у вигляді задачі нелінійного програмування.

Для пошуку локальних екстремумів сформульованих оптимізаційних задач розроблено спеціальний метод декомпозиції, який дозволяє значно

зменшити обчислювальні витрати за рахунок значного зменшення кількості нерівностей у процесі пошуку локальних екстремумів.

Список літератури

1. Korte A.C.J. *Random packing of digitized particles* / A.C.J Korte, H.J.H. Brouwers // *Powder Technology*. – 2013. – №233. – P. 319-324.
2. Wang Y. *3D image segmentation for analysis of multisize particles in a packed particle bed* / Wang Y., Lin C.L., Miller J.D. // *Powder Technology*. – 2016. 301, pp. 160–168.
3. Liu X. *HAF3D-a new constructive algorithm for the 3D irregular packing problem*/ Liu X., Liu J., Cao A. // *Frontiers Inf Technol Electronic Eng*. – 2015. – № 16. – pp. 380-390.
4. Bennell J. *The geometry of nesting problems: A tutorial* / J.Bennell, J. Oliveira // *European Journal of Operational Research*. – 2008. – 184. – P. 397-415.
5. Stoyan Y. *Mathematical modeling of the interaction of non-oriented convex polytopes*/ Stoyan Y., Chugay A. // *Cybernetics and System Analyses*. – 2012. – №48. pp. 837–845.
6. Stoyan Y. *Optimized object packings using quasi-phi-functions* // Stoyan Y.G., Romanova T., Pankratov A., Chugay A. – *Springer Optimization and Its Applications. Volume 105*, – 2015, pp. 265-293.
7. Grebennik I.V. *Packing n-dimensional parallelepipeds with the feasibility of changing their orthogonal orientation in an n-dimensional parallelepiped*/ Grebennik, I.V., Pankratov, A.V., Chugay, A.M., Baranov // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 46(5). – 2010, pp. 793-802.
8. Стоян Ю.Г. *Построение свободной от радикалов Ф-функции для шара и неориентированного многогранника* / Стоян Ю.Г., Чугай А.М. // *Доповіді Національної академії наук України*. 2011. № 12. с.35-40.
9. Pankratov A.V. *Optimal packing of convex polytopes using quasi-phi-functions*/ A.V. Pankratov, T.E. Romanova, A.M. Chugay // *Проблемы машиностроения*. – 2015. –Т. 18, № 2. – С. 55-65.

Надійшла до редколегії 26.12.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Т.С. Романова, Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОЙ УПАКОВКИ ПОДОБНЫХ 3D ОБЪЕКТОВ

А.М. Чугай

На основании ϕ -функции для двух выпуклых многогранников построена математическая модель задачи упаковки выпуклых гомотетичных многогранников в прямом параллелепипеде минимального объема. Указаны некоторые особенности математической модели, на основании которых предложены подход к построению начальных допустимых точек, быстрый алгоритм поиска локальных экстремумов и их направленный неполный перебор для получения приближения к глобальному минимуму. Приведены численные примеры.

Ключевые слова: гомотетичные многогранники, упаковка, метод ϕ -функций, повороты, нелинейная оптимизация.

MODELLING OF CLOSE PACKING OF HOMOTHETIC 3D OBJECTS

A.M. Chugay

On the ground of the ϕ -function for two polytopes a mathematical model of the problem of packing homothetic polytopes into a cuboid of a minimum volume is constructed. A number of characteristics of the mathematical model are pointed out. Based on the characteristics a way of construction of starting points, a rapid algorithm of searching for local minima and an original approach for directed non-exhaustive search of local extrema to obtain a good approximation to a global extremum are offered. Numerical results are given.

Keywords: homothetic polytopes, packing, ϕ -function technique rotations, non-linear optimization.

Н.В. Глухова¹, Л.А. Пісоцька²

¹ДВНЗ «Національний гірничий університет», Дніпро

²ДВНЗ «Дніпропетровська медична академія МОЗ України», Дніпро

РОЗРОБКА МЕТОДУ АНАЛІЗУ КОЛЬОРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ГАЗОРОЗРЯДНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Виконаний аналіз сучасних методів отримання та обробки зображень газорозрядного випромінювання. Представлено результати експериментальних досліджень стану людини на основі реєстрації зображень газорозрядного світіння пальців в імпульсному електромагнітному полі. Запропоновано методику аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання шляхом побудови гістограм яскравості пікселів для трьох базових кольорів. Викладено правила класифікації зображень на основі використання кількісних значень глобальних та локальних екстремумів огинаючих гістограм, які розраховуються шляхом застосування пікового детектору.

Ключові слова: газорозрядне випромінювання, цифрова обробка зображень.

Вступ

Аналіз характеристик плазмового випромінювання при розповсюдженні електричного розряду на поверхні фізичних та біологічних об'єктів широко використовується у техніці та медицині при дослідженні їх властивостей [1, 2].

За умови існування газового прошарку між електродами при впливі зовнішнього електромагнітного поля високої напруженості на досліджуваний об'єкт виникає газовий електричний розряд, що розповсюджується у двох формах. Перша форма отримала назву лавинного розряду, дія якого обмежується рамками простору між діелектричними поверхнями досліджуваного об'єкту та фотоматеріалом. Таким чином, лавинний розряд існує у зоні іонізації та обумовлений лавинами збуджених електронів газового прошарку. Друга форма відома під назвою ковзного розряду. Особливість існування цієї форми обумовлено коронним розрядом, що ковзає по поверхні діелектрику. Він виникає у неоднорідному електричному полі, що формується електродами з малим радіусом кривизни [3].

За умови достатнього рівня прикладеної до електродів напруги розряд набуває стримерної форми, для якої характерним є формування чітких розрядних треків навколо контуру об'єкту.

На сьогоднішній день розроблено досить багато модифікацій технічної реалізації методу газорозрядного випромінювання. У якості сенсорів для отримання зображень використовується рентгенівська або фотоплівка; цифрові камери на базі ПЗС-матриць; кольорова фотоплівка. Найбільш поширеними є перші два варіанти реєстрації, для яких розроблені відповідні методики аналізу та параметри-

зації зображень. При цьому останній варіант є перспективним, оскільки забезпечує можливість отримання значно більших об'ємів вимірювальних даних щодо досліджуваного об'єкту. Особливості та переваги аналогової реєстрації зображень газорозрядного випромінювання фізичних та біологічних об'єктів розглядаються у роботах [4-6].

Постановка проблеми та аналіз літератури.

Кольорові зображення газорозрядного випромінювання, зареєстровані на фотоплівці, характеризуються високою інформативністю, тому представляють науково-практичний інтерес у галузі медичної діагностики. Характерні ознаки газорозрядного випромінювання обумовлено переходом електронів з низьких на більш високі енергетичні рівні та відповідний зворотній процес. Фізичні явища супроводжуються випромінюванням дискретного кванту світла (фотона). Параметри процесу випромінювання обумовлено електричним полем електродів та властивостями досліджуваного об'єкту. Саме від електронного стану досліджуваного об'єкту залежить величина імпульсів енергії, якими володіють збуджені електрони. Тому вони потрапляють на різні енергетичні рівні та випромінюють кванти світла з різною частотою хвилі, що реєструється експериментально у вигляді різнокольорового розподілу корони випромінювання навколо об'єкту.

Залежність спектру газорозрядного випромінювання від енергії електронів, що випускаються, наведено у роботі [4]: фіолетовий – 3,03 еВ; синій – 2,64 еВ; блакитний – 2,43 еВ; жовтий – 2,14 еВ; помаранчевий – 2,05 еВ; червоний – 1,82 еВ. На відміну від півтонових зображень, які реєструються на рентгенівській плівці та підлягають секторному аналізу, кольорові зображення дозволяють додатково

оцінити кольорову гаму випромінювання. Інтенсивність та кольорова забарвленість зображень газорозрядного випромінювання слугують додатковими критеріями для медичної діагностики стану організму людини. Зокрема, психофізіологічних параметрів, рівня метаболічних процесів, стану органів та їх систем. Патологічні явища в організмі напряму впливають на біоелектричні характеристики тіла та тканин, тому їх наявність відзначається у зміні кольорів на зображеннях [6].

На сьогоднішній день основною проблемою при практичному застосуванні методу кольорової аналогової реєстрації зображень газорозрядного випромінювання є фактична відсутність кількісного аналізу отриманих експериментальних даних.

Метою даної роботи є розробка методів аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання біологічних об'єктів.

Основна частина

Як відомо, на сьогоднішній день методи обробки та параметризації зображень мають принципово евристичний характер та вимагають індивідуальних підходів при необхідності адаптації до розв'язання певного класу задач.

Зафіксовану на кольоровій фотоплівці картину газорозрядного випромінювання математично можна представити у лінійному просторі зображень. Тоді зображення математично описується у вигляді числової функції. Оскільки зображення має конкретні контури, то функція задається на обмеженій підмножині X площини \mathbb{R}^2 . Тоді позначена область X має назву поля зору. Яскравістю у точці x , яка розташована у полі зору X , називається значення функції $f(x)$ для будь-якої точки $x \in X$.

З метою комп'ютерного аналізу зафіксовані на кольоровій фотоплівці зображення газорозрядного випромінювання підлягають процедурі аналого-цифрового перетворення. В результаті у пам'яті комп'ютера зображення зберігається у вигляді матриці, яка представляє собою сукупність вузлів прямокутної сітки. Значення яскравості кожного вузла у полі зору X задається цілим числом.

При аналізі зображень зазвичай використовуються їх яскравісні та геометричні параметри. З цією метою використовуються проєктивні морфологічні розкладання, які базуються на структурних однорідних моделях. При такому підході зображення, як правило, поєднуються на основі незалежних лінійних проєкцій.

Кольорова фотоплівка за своєю будовою має декілька окремих шарів для фіксації кольору. Стисло розглянемо ці шари. У поперечному перерізі кольорової фотоплівки присутні наступні смуги шарів: покриття, яке попереджає скручування; протиорео-

льний шар; основа фотоплівки; чутливий до червоного кольору шар блакитної фарби; чутливий до зеленого кольору шар пурпурної фарби; смуга жовтого фільтру; чутливий до синього кольору шар жовтої фарби; шар, призначений для захисту від механічних ушкоджень. Для отримання відтінків кольорів на певних ділянках плівки використовується декілька світлочувливих шарів.

Таким чином, кольорову плівку можна розглядати як сенсор з кількома детекторами випромінювання. Кожний з n детекторів можна охарактеризувати спектральною чутливістю (λ – довжина хвилі випромінювання

$$w_j(\lambda) \geq 1, j = \overline{1, n}.$$

Газорозрядне випромінювання має спектральну щільність та породжує оптичні сигнали, які аналітично можна описати вектором

$$\overline{f}_e = \int_0^{\infty} \overline{w}(\lambda) e(\lambda) d\lambda.$$

Вектор спектральних чутливостей складається з компонентів, пов'язаних з детекторами кольорового газорозрядного випромінювання,

$$\overline{w} = (w_1(\cdot), \dots, w_n(\cdot)).$$

Відповідно сумарна спектральна чутливість усіх детекторів кольорової фотоплівки

$$w(\lambda) = \sum_{i=1}^n w_i(\lambda).$$

Яскравість випромінювання представляє собою сумарний сигнал

$$f_e = \int_0^{\infty} w(\lambda) e(\lambda) d\lambda \geq 0.$$

Тоді колір випромінювання

$$\overline{\varphi}_e = \overline{f}_e / f_e, \quad f_e > 0.$$

З метою аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання біологічних об'єктів та розв'язання завдання виділення їх інформативних ознак у кількісній формі запропоновано проведення дослідження та параметризації гістограми яскравості для кожного каналу простору RGB (модель, у якій колір кожного пікселя цифрового зображення описується композицією з червоного, зеленого та синього кольорів, які у даному контексті називають первинними основними кольорами або компонентами). Кожна з трьох гістограм яскравості відображує відповідно розподіл R, G, B-кодів пікселів матриці за усім зображенням, а, відповідно, може використовуватись у якості інтегральної характеристики кольорової палітри газорозрядного випромінювання.

Завдання розпізнавання образів у даному випадку полягає у розподілі зареєстрованих кольорових

зображень газорозрядного випромінювання на класи (групи), які відповідають певним типам енергоінформаційної взаємодії організму. Завдання класифікації вирішується шляхом виділення інформативних ознак. У якості таких ознак запропоновано використання параметрів, отриманих шляхом розрахунків на базі амплітудного пікового детектору. Параметри являють собою значення амплітуд глобального та локальних екстремумів для згинаючої трьох гістограм кожного каналу простору RGB.

Кожну з гістограм нормують відносно її глобального максимуму, та виділяють, як характерні ознаки, у кожній гістограмі значення яскравості глобального максимуму D_i та відносну кількість пікселів першого після глобального локального максимуму N_i , потім здійснюють класифікацію характерних ознак відносно двох класів, що відповідні ментальному та рефлекторному типам енергоінформаційної активності організму людини.

На рис. 1-3 представлено відповідно гістограми червоного, зеленого, синього кольорів для людини з ментальною активністю.

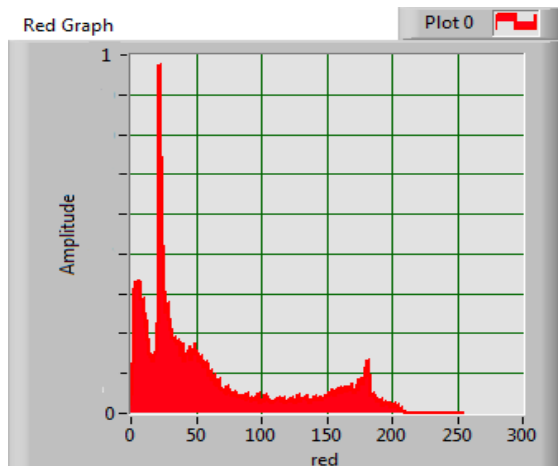


Рис. 1. Гістограма червоного кольору для газорозрядного випромінювання пальців людини з ментальною активністю

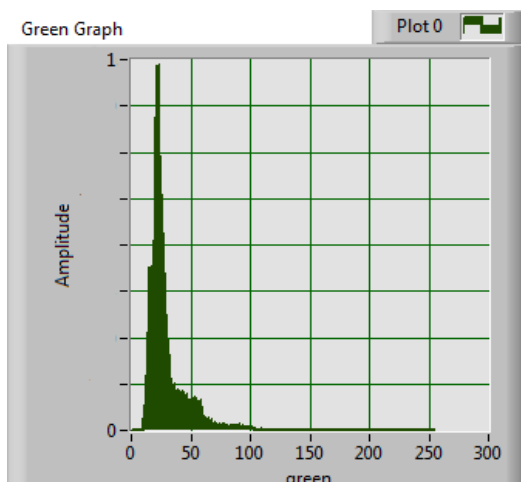


Рис. 2. Гістограма зеленого кольору для газорозрядного випромінювання пальців людини з ментальною активністю

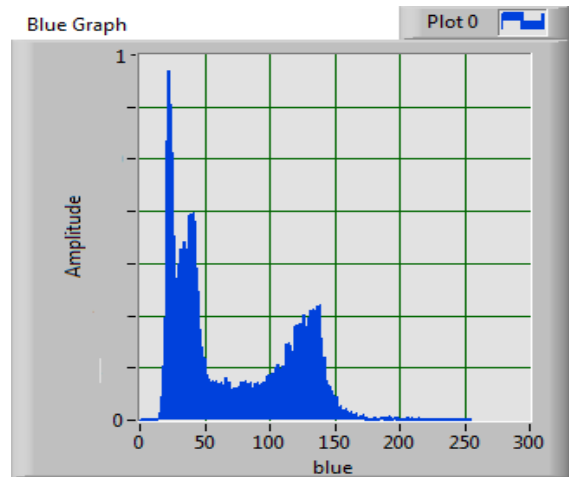


Рис. 3. Гістограма синього кольору для газорозрядного випромінювання пальців людини з ментальною активністю

На рис. 4-6 показано аналогічні графіки для людини з рефлекторною активністю.

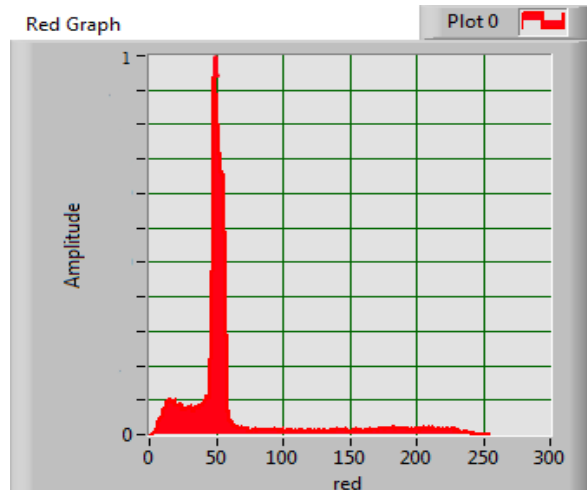


Рис. 4. Гістограма червоного кольору для газорозрядного випромінювання пальців людини з рефлекторною активністю

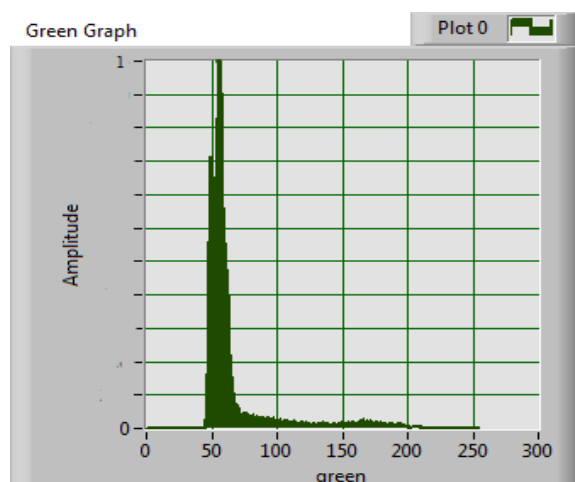


Рис. 5. Гістограма зеленого кольору для газорозрядного випромінювання пальців людини з рефлекторною активністю

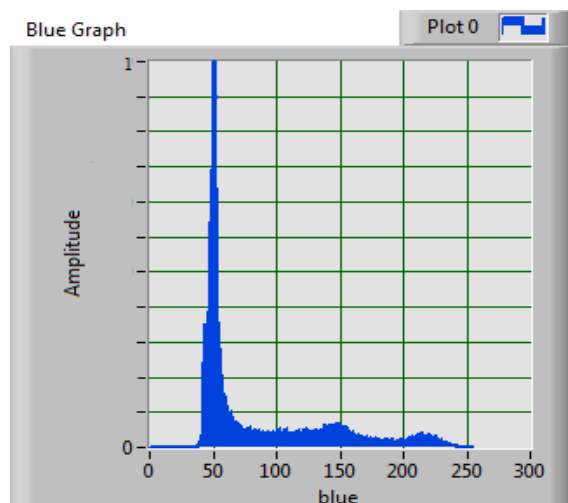


Рис. 6. Гістограма зеленого кольору для газорозрядного випромінювання пальців людини з рефлекторною активністю

Експериментально встановлена кореляція сукупності характерних ознак гістограм трьох базових кольорів у вигляді яскравості глобального максимуму D_i , та відносної кількості пікселів першого після нього локального максимуму N_i дозволяє здійснювати їх класифікацію відносно двох класів, що відповідні ментальному та рефлекторному типам енергетичної активності людини.

Сформовано наступні правила класифікації зображень за типами активності:

1) характерні ознаки для першого класу, що відповідає стану ментальній активності організму людини, мають, щонайменш для двох кольорів, наступні значення: $D_i < 30$; $0,1 < N_i < 0,8$.

2) характерні ознаки для другого класу, що відповідає стану рефлекторної активності організму людини, мають, щонайменш для двох кольорів, наступні значення: $D_i > 30$, при $N_i > 0,8$ або $N_i < 0,1$.

Висновки

Розглянутий метод аналізу кольорових зображень газорозрядного випромінювання дозволяє визначати ментальну або рефлекторну активність організму людини за кількісними параметрами характерних ознак гістограм яскравості пікселів для трьох базових кольорів кожного зображення, що забезпечує підвищення достовірності аналізу енергоінформаційного стану організму людини.

Список літератури

1. K. Korotkov and D. Korotkin, (2001) Concentration dependence of gas discharge around drops of inorganic electrolytes, *J.Appl.Phys.*, N. 89, 47-52.
2. Bell I, Lewis DA, Brooks AJ, et al. Gas Discharge Visualisation Evaluation of Ultramolecular Doses of Homeopathic Medicines Under Blinded, Controlled Conditions. *J Altern Complement Med* 2003;9;1:25-37.
3. Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрографии. – СПб. СПбГИТМО (ТУ), 2001. – 360 с.
4. Ignatov I. Kirlian Effect in Modeling of Non-Equilibrium Conditions With the Gas Electric Discharge, *Simulating Primary Atmosphere / I. Ignatov, O. Mosin // Nanotechnology Research and Practice*, 2014, Vol.(3), № 3, PP. 127-140.
5. Игнатов И. Цветной коронный (Кирлиановый) спектральный анализ в моделировании неравновесных условий с газовым электрическим разрядом, имитирующей первичную атмосферу / И. Игнатов, О. Мосин // *Наукоеведение*. - №3. – 2013. – С. 47-59.
6. Игнатов И. Изучение газоразрядного свечения биологических объектов и воды методом цветного анализа кирлиана / И. Игнатов, О. В. Мосин // *Наноинженерия*. – 2014. - №10(40). – С. 3-11.

Надійшла до редколегії 29.12.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Слесарев, ДВНЗ «Національний гірничий університет».

РАЗРАБОТКА МЕТОДА АНАЛИЗА ЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГАЗОРАЗРЯДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.В. Глухова, Л.А. Песоцкая

Выполнен анализ современных методов получения и обработки изображений газоразрядного излучения. Представлены результаты экспериментальных исследований состояния человека на основе регистрации изображений газоразрядного свечения пальцев в импульсном электромагнитном поле. Предложена методика анализа цветных изображений газоразрядного излучения путем построения гистограмм яркости пикселей для трех базовых цветов. Изложены правила классификации изображений на основе использования количественных значений глобальных и локальных экстремумов огибающих гистограмм, которые вычисляются путем использования пикового детектора.

Ключевые слова: газоразрядное излучение, цифровая обработка изображений.

DEVELOPMENT OF A METHOD OF ANALYSIS OF COLOUR IMAGES OF GAS DISCHARGE RADIATION

N.V. Glukhova, L.A. Pesotskaya

We have performed the analysis of modern methods of obtaining and processing the images of gas discharge radiation. This work presents the results of experimental studies of state of people based on the images of the discharge glow fingers in a pulse electromagnetic field. A new technique is proposed for the analysis of colour images of the discharge emission based on histograms of pixel brightness for three basic colors. We have developed rules for the classification of images based on the quantitative values of the global and local extrema of histogram envelopes that are calculated using the peak detector.

Key words: gas discharge radiation, digital image processing.

В.О. Гороховатський, К.Г. Солодченко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

ЗАСТОСУВАННЯ АПАРАТУ АНАЛІЗУ ТА ОБРОБЛЕННЯ БІТОВИХ ДАНИХ У МЕТОДАХ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА МНОЖИНОЮ КЛЮЧОВИХ ТОЧОК

Вирішена задача структурного розпізнавання візуальних об'єктів на підґрунті описів у вигляді множини ключових точок зображення. Запропоновано метод бінарного аналізу множин дескрипторів опису для формування центрів класів з метою класифікації у межах заданої бази еталонів. Обговорюються критерії оцінювання ефективності класифікації. Проведено програмне моделювання та дослідження методу у порівнянні з медіанними центрами, отримано підтвердження результативності розробленого методу для прикладної бази зображень.

Ключові слова: комп'ютерний зір, структурне розпізнавання, особливі точки зображення, детектор BRISK, дескриптори особливих точок, метод бінарного аналізу, матриця відстаней, база зображень, програмне моделювання, критерій правильної класифікації.

Вступ

У системах комп'ютерного зору при розпізнаванні візуальних об'єктів за їх структурним описом у вигляді множини дескрипторів особливих точок (ОТ) зображення постає задача побудови функції (правила, процедури) класифікації, що задає відношення еквівалентності на множині дескрипторів бази зображень, де класи представлені окремими описами еталонів.

Зважаючи на наявну подібність значень дескрипторів для різних візуальних об'єктів, така еквівалентність на практиці досягається лише наближено [1-6].

Останнього часу набули прикладного застосування такі детектори ОТ, як ORB та BRISK [4, 5], що отримують дескриптор особливих точок у вигляді бінарного вектора з розміром, кратним ступені двійки. Бінарне подання значно прискорює процес порівняння дескрипторів за рахунок можливості застосування двійкових операцій та відповідно спрощує апаратну реалізацію системи розпізнавання.

Крім того, бінарна арифметика дає потенцію застосувати ефективний апарат оброблення бінарних даних та синтезувати нові підходи для визначення подібності дескрипторів ОТ при побудові правил класифікації.

Метою статті є побудова методу класифікації зображень у просторі множин дескрипторів ключових точок з використанням апарату аналізу та оброблення бітових даних.

Задачами дослідження є створення математичних моделей оброблення бітових даних при побудові правил класифікації, вивчення їх властивостей та можливостей параметричного керування ними, оцінювання результативності процедур класифікації для прикладних баз зображень.

Постановка задачі класифікації для множини бітових рядків

Нехай $Z = \{Z^j\}_{j=1}^J$ – множина дескрипторів бази зображень, яку складають описи еталонів, Z^j – еталон, J – число класів, $s(j) = \text{card } Z^j$ – кількість елементів еталону Z^j , $Z \subseteq B^n$, B^n – множина бінарних векторів (ланцюжків, рядків) розмірності n . Кількість розпізнаваних класів визначається числом J еталонів.

Розглянемо правило класифікації $L: B^n \rightarrow [1, \dots, J]$ у вигляді функції такої, що $\forall z \in Z$ виконується $L(z) \in [1, \dots, J]$, тобто кожний елемент буде зараховано до одного із еталонів Z^j . При цьому конструктивно та параметрично функція опирається на апріорні дані конкретної бази, так як приналежність кожного з елементів $z \in Z$ до відповідного еталону всередині бази задана до початку класифікації.

Для побудови процедури класифікації застосуємо дискретну модель простору B^n ознак [1, 6], коли для кожного з еталонів Z^j попередньо сформуємо деякий «центр класу» $m_j \in B^n$, $j = 1, \dots, J$. У процесі здійснення класифікації довільний вектор будемо конкурентно відносити до класу v у відповідності до найменшої відстані

$$v = \arg \min_{j=1, \dots, J} \rho(b, m_j), \quad (1)$$

де $\rho(b, m_j)$ – метрика у просторі B^n .

Зрозуміло, якщо розпізнавання відбувається на універсумі B^n , то правило (1) на практиці треба параметрично доповнити логічним аналізом із застосуванням порогу [2]: віднесення дескриптора ОТ

до класу v здійснюється тільки у випадку, якщо для вектора b буде також виконано умову $\rho(b, m_j) \leq \delta$, де δ – заданий поріг еквівалентності елементів у просторі. При відсутності такого порогового обмеження до класу може бути віднесено зовсім не схожий елемент, хоча мінімум у (1) буде завжди досягнуто.

У результаті запропонованої процедури класифікації множина дескрипторів $O = \{o_1, \dots, o_v\}$, $o_i \in B^n$, що описує довільний візуальний об'єкт, буде подана у вигляді цілочисельного вектора $h[O] = \{h_1, \dots, h_J\}$, де $h_j = \text{card} \{o_i \in O \mid o_i \rightarrow Z^j\}$ – кількість елементів еталону, віднесених до класу з номером j . Одним із методів визначення класу d об'єкта $O \in$ парадигма

$$d = \arg \max_{j=1, \dots, J} h_j. \quad (2)$$

Правило (2) безпосередньо можна застосувати лише в ситуації, коли для подання $h[Z^j]$ кожного з еталонів максимум відповідає номеру j еталона, який класифікується. Коли ця умова не виконується навіть для даних бази еталонів, то треба застосовувати інші більш універсальні підходи [1]. В той же час побудова правила класифікації із застосуванням (2) дає ефективну можливість суттєво спростити прийняття рішення, так як кожний із структурних елементів безпосередньо може бути класифікований без додаткового аналізу їх сукупних властивостей. Застосування бінарного подання та оброблення дає можливість синтезувати саме такий спосіб.

Загалом підхід з визначенням центрів класів забезпечує значне підвищення швидкодії класифікації за рахунок переходу від обчислення міри релевантності множин до порівняння векторів чи навіть окремих їх елементів [6]. Бінарне подання даних додатково спрощує процес обробки, даючи можливість, наприклад в (1), застосовувати метрику Хемінга замість більш суттєвих за обсягом обчислень метрик.

Методи формування центрів класів

Традиційним підходом до обчислення центрів є застосування методів кластеризації, спираючись на ознаки, за якими різняться значення дескрипторів ОТ зображення. Зважаючи на те, що раніш використовували дескриптори SIFT, SURF взагалі нормовані, а вагомість норми для дескрипторів ORB, BRISK не є достатньо значимою характеристикою окремого класу, для кластеризації застосовувалися безпосередньо значення елементів множини Z [1].

У межах апарату бінарних даних викликає інтерес застосування націленого оброблення множини дескрипторів із визначенням одного з елементів, що

буде представляти множину як клас. Двійковий вид дескрипторів дає підвалини застосувати апарат логічного оброблення. Зважаючи на бінарний вид BRISK- та ORB-дескрипторів, для кожного з еталонів Z^j визначимо бінарний вектор центра класу на підставі логічного правила

$$m_j(a) = \begin{cases} 1, & f(Z^j, a) \geq s(j)/2, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (3)$$

де $m_j(a)$ – значення біту на позиції з номером a для центру m_j , $f(Z^j, a)$ – функція, що підраховує кількість одиничних бітів на позиції з номером a у множині дескрипторів еталону Z^j , $a = 1, \dots, n$. Функція $f(Z^j, a)$ може бути обчислена безпосередньо додаванням бітів як

$$f(Z^j, a) = \sum_{d=1}^{s(j)} x_d(a), \quad x_d \in Z^j, \quad (4)$$

де $x_d(a)$ – біт з номером a для дескриптора з номером d в описі еталона.

За виразом (3) значення кожного з бітів центру m_j для j -го класу визначається переважно більшістю значень відповідних розрядів усіх дескрипторів ОТ, які належать еталону Z^j . Бітове подання можна ефективно використати при роботі з множинами даних. Підрахунок числа одиничних бітів у (4) можна здійснити також застосуванням відповідних бінарних функцій [11].

Аналізуємо елементи $x \in X$ загального вмісту структурних описів бази еталонів (навчальна вибірка) шляхом віднесення їх до відповідного класу з використанням конкуренції (1). У якості ρ застосуємо метрику Хемінга

$$\rho(x, m_j) = \sum_{a=1}^n |x(a) - m_j(a)|, \quad (5)$$

що визначає кількість розбіжних бітів для двійкових послідовностей однакової довжини.

У результаті оброблення з використанням попередньо обчислених центрів одержуємо подання для кожного еталона: $h[Z^j] = (h_1^j, \dots, h_n^j)$, яке відповідає розподілу елементів множини Z^j за класами еталонів, де h_a^j – цілі числа, причому $\sum_{a=1}^{s(j)} h_a^j = s(j)$, так як кожний з елементів опису буде віднесено до одного з фіксованих класів.

Важливою характеристикою множини отриманих центрів є симетрична матриця відстаней між ними $\Upsilon = \{\rho(m_i, m_j)\}_{i,j=1}^J$, яка відображає їх сумісну наближеність у просторі B^n та фактично визначає фінальну якість класифікації. Чим більше віддалені центри між собою, тим вище досяжна ступінь розрізненості дескрипторів із різних класів.

Загальним же критерієм якості квантування простору у відповідності до апріорних даних – опису бази зображень у вигляді множин дескрипторів ОТ може бути нормоване значення розкиду даних навколо сформованих центрів

$$E = \frac{1}{sN} \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^{s(j)} \rho(x_v, m_j), \quad (6)$$

де N – розмір дескриптора ($N = 512$ для BRISK), $s = \sum_{j=1}^J s(j)$ – загальне число елементів навчальної вибірки, а для спрощення та приведення до інтервалу $0 \dots 1$ замість традиційного квадрата метрики вибрано її значення [7].

Зважаючи на бітове подання даних, виникає можливість також застосувати по-байтовий аналіз, використавши замість виразів (5), (6) міри, обчислені на підставі подібності окремих байтів.

З метою порівняння показників класифікації також розглянемо у якості центру множини її узагальнену медіану [8]. Узагальнена медіана m скінченної множини $X = \{x(i)\}$ визначається шляхом мінімізації функціоналу D :

$$m = \arg \min_{v \in X} D(v), \quad D(v) = \sum_{x(i) \in X} \rho(x(i), v), \quad (7)$$

де $\rho(x(i), v)$ – відстань між елементами. Обчислити медіану можна шляхом агрегації значень рядків матриці взаємних відстаней елементів множини [6]. У результаті обчислення (7) отримуємо медіану m_j як один із елементів еталону $m_j \in Z^J$.

Вектор $h[Z^i]$ також може виступити критерієм якості класифікації на навчальній вибірці. Ідеальним класифікатором є той, для якого $\arg \max_j h_j^i = i$, тобто при реалізації (2) максимальне значення досягається для номера еталону, що класифікується.

Другим критерієм при умові правильної класифікації є відношення загального числа дескрипторів, які за результатом оброблення віднесені до правильного класу, до гуртового числа дескрипторів бази

$$\beta = \sum_{i=1}^J h_i^i / s. \quad (8)$$

Критерій (8) – це відношення кількості правильно класифікованих дескрипторів бази до їх загального числа. Ідеальним варіантом є значення $\beta = 1$.

Результати комп'ютерних експериментів

У середовищі C++ з використанням бібліотеки програм Open CV [10] нами розроблено програмну модель для класифікації зображень на підставі описів, сформованих детектором BRISK. У якості бази еталонів застосовано набір із 5 зображень мечів, два з яких показано на рис. 1. Кількість виявлених ОТ в кожному із еталонів розміром 256×256 обмежена числом 51, загальна кількість ОТ бази (обсяг навчальної вибірки) дорівнює 255. Через обчислення центрів класів у відповідності до логіки (3) сформовано вектори $h[Z^i]$ для кожного із еталонів. Приклади центрів показано на рис. 2.

Характеристикою, що відображає властивості множини центрів, є матриця відстаней між ними (табл. 1). Можна побачити, що отримані центри досить вдало розрізняють еталонні описи, так як мінімальне значення серед діагональних елементів дорівнює 69 (відстань між центрами 1 і 3 еталонів), що чимало віддалено від мінімального значення 0.

Зауважимо, що застосований детектор та бінарне оброблення (3) відіграють провідну роль при розрізненні даних конкретної бази. У результаті оброблення (3) та застосування (1) з метрикою (5) отримано матрицю з рядками $h[Z^i]$ по класах у вигляді табл. 2.



Рис. 1. Координати дескрипторів BRISK ОТ зображення



Рис. 2. Бітове подання (3) для центрів зображень рис. 1

Таблиця 1
Матриця відстаней між центрами

Центр	Відстань				
	Z^1	Z^2	Z^3	Z^4	Z^5
Z^1	0	135	69	98	121
Z^2	135	0	108	137	122
Z^3	69	108	0	99	116
Z^4	98	137	99	0	123
Z^5	121	122	116	123	0

Як бачимо із табл. 2, множина дескрипторів BRISK для даної бази зображень з використанням бінарного оброблення однозначно класифікує множину ОТ кожного з еталонів, так як в рядках таблиці кількість ОТ на діагоналі максимальна, причому максимальний елемент відповідає зразку та у 2,2 рази перевищує найближчий із локальних максимумів. Розкид (6) отримав значення $E = 0,26$, а відношення правильно класифікованих дескрипторів до загального числа склало $\beta = 0,55$.

Таблиця 2
Розподіл ОТ еталонів по класах

Еталони	Класи				
	1	2	3	4	5
Z^1	26	2	4	9	10
Z^2	9	32	7	1	2
Z^3	9	11	25	4	2
Z^4	5	4	7	30	5
Z^5	9	2	2	12	26

Час формування 5 центрів склав 3.8 мс, а класифікація множини дескрипторів склала 4.4 мс на комп'ютері з процесором I5-250M (2.50 GHz) та з оперативною пам'яттю розміром 4 Гб, операційна система Windows 10 x64.

Для бази інших 5 зображень отримано аналогічні позитивні результати, причому відношення склало $\beta = 0,71$, а значення $E = 0,31$. Експеримент, проведений для 10 еталонів (навчальна вибірка 510 дескрипторів), показав близькі результати: усі еталони класифікуються вірно, розкид (6) дорівнює приблизно $E = 0,28$, а відношення правильно класифікованих дескрипторів до загального числа склало $\beta = 0,51 \dots 0,54$, тобто дещо менше, ніж для 5 еталонів. Зі збільшенням кількості еталонів треба і більше число точок, щоб отримати стабільне рішення. На нашу думку, у випадку 10 еталонів мінімально необхідно хоча б по 100 ОТ для кожного класу.

Застосування у експериментах способу оброблення даних по байтам не дало якихось суттєвих переваг: для 5 еталонів розкид (6) отримав значення $E = 0,26$, а відношення (8) склало $\beta = 0,53$.

Аналіз із використанням медіани у якості центрів класів показав наступне. Для 5 еталонів розкид (6) отримав значення $E = 0,31$, а відношення правильно класифікованих дескрипторів до загального числа склало $\beta = 0,44$. Як бачимо, застосування медіани у порівнянні з моделлю (3) дещо збільшує помилку квантування та зменшує долю правильно класифікованих даних.

З метою поглибленого вивчення властивостей створеного методу проведено повторне застосування бітового оброблення (3) до кластерів зображень, отриманих застосуванням (3) до вхідних описів візуальних об'єктів. Дослідження показало деяке зниження помилки $E = 0,28$ з одночасним незначним зниженням критерію $\beta = 0,47$, що підкреслює стабільність та можливість ітераційного застосування моделі (3).

Загалом треба сказати, що детектор BRISK за рахунок суттєво інформативного значення розміру дескриптора, що дорівнює 512, гарантує досить детальне подання і можливість аналізу властивостей зображення з метою результативного розрізнення візуальних об'єктів. Підтвердженням цього є факт, що детектор ORB з розміром 256 для цих же даних не дає результату відповідної якості, тобто напругу не забезпечує розрізнення еталонів.

Висновки

У результаті дослідження запропоновано ефективний метод класифікації зображень з використанням бінарного оброблення.

При практичній побудові правил класифікації візуальних об'єктів із застосуванням детекторів ОТ треба звернути увагу на ефективний вибір та поєднання можливостей як детекторів ОТ, так і апарату для оброблення їх значень для досліджуваних баз зображень.

Розроблений підхід універсально може бути застосовано для класифікації множин бінарних даних довільної природи. Етап попередньої обробки з визначенням центрів на базі бінарного аналізу можна вважати різновидом хешування на множині дескрипторів ОТ еталону.

Серед досліджених варіантів обчислення центрів класів найкращі показники має логічний аналіз із визначенням окремих бітів на множині ознак еталону.

Наукова новизна дослідження полягає у синтезі нового продуктивного методу класифікації зображень з використанням бітового аналізу та оброблення даних у просторі дескрипторів ключових точок зображення.

Практична значущість роботи – отримання практичних програмних моделей для застосування та оцінювання ефективності методів класифікації з бінарним поданням даних і підтвердження їх результативності в прикладних базах зображень.

Список літератури

1. Горюховатский В.А. Исследование результативности структурных методов классификации изображений с применением кластерной модели данных / В.А. Горюховатский, Е.П. Путятин, В.С. Столяров // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2017. – №3 (42). – С. 78–85.

2. Горюховатский В.А. Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении / В.А. Горюховатский. – Х.: Компания СМІТ, 2014. – 316 с.

3. Duda R.O. Pattern classification / Duda R.O., Hart P.E., Stork D.G. – 2ed., Wiley, 2000.–738p.

4. Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. – Computer Vision (ICCV), IEEE International Conference on IEEE, pp. 2564 – 2571, 2011.

5. Stefan Leutenegger, Margarita Chli, Roland Y. Siegwart. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. – Computer Vision (ICCV), pp. 2548 – 2555, 2011.

6. Gorokhovatsky V.A. Efficient Estimation of Visual Object Relevance during Recognition through their Vector Descriptions / V.A. Gorokhovatsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016, Vol. 75, No 14. – P. 1271–1283.

7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

8. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / Т. Кохонен. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 655 с.

9. Shapiro, L. and Stockman, G., (2001), Computer vision, Prentice Hall. – 625 p.

10. OpenCV Open Source Computer Vision. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.opencv.org/master/index.html>, свободный. – Загл. с экрана.

11. Солонина А.И. Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 464 с.

Надійшла до редколегії 11.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Є.П. Путятін, Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків.

ПРИМЕНЕНИЕ АППАРАТА АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ БИТОВЫХ ДАННЫХ В МЕТОДАХ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПО МНОЖЕСТВУ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК

В.А. Горюховатский, К.Г. Солодченко

Решена задача структурного распознавания визуальных объектов на основе описаний в виде множества ключевых точек изображения. Предложен метод бинарного анализа множеств дескрипторов описания для формирования центров классов с целью классификации в пределах заданной базы эталонов. Обсуждаются критерии оценки эффективности классификации. Проведено программное моделирование и исследование метода по сравнению с медианными центрами, получено подтверждение результативности разработанного метода для прикладной базы изображений.

Ключевые слова: компьютерное зрение, структурное распознавание, особые точки изображения, детектор BRISK, дескрипторы особых точек, метод бинарного анализа, матрица расстояний, база изображений, программное моделирование, критерий правильной классификации.

APPLICATION OF THE APPARATUS FOR ANALYSIS AND PROCESSING OF DATA BITS IN METHODS OF CLASSIFICATION OF IMAGES ON A SET OF KEY POINTS

V.O. Gorokhovatsky, K.G. Solodchenko

The problem of structural recognition of visual objects based on descriptions in the form of a set of key points of the image was solved. A method is proposed for binary analysis of sets of description descriptors for the formation of class centers with the aim of classifying them within a given base of standards. Criteria for evaluating the effectiveness of classification are discussed. The software modeling and research of the method was carried out in comparison with the median centers, the efficiency of the developed method for the applied image database was confirmed.

Keywords: computer vision, structural recognition, special image points, BRISK detector, special point descriptors, binary analysis method, distance matrix, image database, software modeling, criterion of correct classification.

В.А. Гороховатский, Д.В. Пупченко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВИЗУАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО МНОЖЕСТВУ ДЕСКРИПТОРОВ ОСОБЕННЫХ ТОЧЕК НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ КОХОНЕНА

Решена задача распознавания визуальных объектов на основе классификации дескрипторов изображений с применением сети Кохонена. Обсуждаются варианты и результаты обработки в плане различного числа подстраиваемых нейронов. Анализируются критерии оценивания уровня правильной классификации. Приводятся результаты программного моделирования сети с разными вариантами обработки и формирования центров классов.

Ключевые слова: компьютерное зрение, особые точки изображения, дескрипторы особых точек, детектор ORB, сеть Кохонена, программное моделирование, число подстраиваемых нейронов, критерий правильной классификации.

Введение

В системах компьютерного зрения представляется актуальным применение методов структурной классификации изображений в ситуации, где число классов (эталонов) равно числу кластеров, созданных на множестве характерных признаков (особенных точек) базы образцов [1-4]. В таком случае применяемая кластеризация непосредственно выполняет группирование множества дескрипторов эталонных изображений в фиксированное множество классов, т.е. решает задачу классификации. На этапе кластеризации осуществляется разбиение множества элементов структурных описаний на классы (подмножества признаков) и построение связанного с ним набора центров классов. Классификация вновь поступивших описаний воплощается путем конкурентного отнесения их элементов к одному из сформированных центров классов, а затем определения класса, набравшего наибольшее число дескрипторов (голосов) [4, 6].

Качество классификации напрямую зависит от результатов обучения системы распознавания на имеющемся множестве признаков структурных описаний базы образцов (обучающая выборка). Представляет интерес изучение возможностей и свойств такого процесса обучения в плане наиболее эффективного использования содержащейся в описаниях эталонной информации, а также исследование углубленных схем обучения, учитывающих степень близости элементов разных классов в пространстве признаков.

В последнее время популярны методы ORB и BRISK, которые обеспечивают детектирование особенных точек (ОТ) изображений [3,4]. ОТ – это числовой вектор, координатно зафиксированный в некоторой точке. BRISK по сравнению с ORB имеет набор альтернатив для формы масок при выявлении

ключевых точек. Основные преимущества детекторов ORB и BRISK заключаются в обеспечении высокого быстродействия за счет существенного упрощения процесса обработки в пространстве дескрипторов бинарного типа.

В связи с рядом прикладных преимуществ актуально применение конкурентных структур при обучении и классификации, а именно – сетей Кохонена, которые реализованы в пакетном и онлайн-режимах [1, 2, 7]. Сети Кохонена могут универсально и с успехом настраиваться на произвольные наборы данных, в том числе полученные в системах визуальной обработки [4]. Представляет интерес изучение адаптационных свойств и параметрических характеристик сетей Кохонена применительно к обучению в задачах классификации изображений по множеству ОТ, где фактически наблюдается неограниченное разнообразие анализируемых данных.

Целью работы есть изучение модификаций сети Кохонена применительно к задаче классификации изображений в пространстве дескрипторов особых точек и оценивание их результативности для конкретных баз изображений.

Задачи исследования – изучение адаптационных возможностей и особенностей применения сети Кохонена для множества дескрипторов, сравнение разных вариантов формирования центров классов, оценивание эффективности работы сети путем программного моделирования.

Применение сети Кохонена для классификации

Пусть $W = \{x \mid x \in R^n\}$, $W \subseteq R^n$ – пространство структурных признаков (дескрипторов) изображений. База описаний образцов (эталонов) $Z \subset W$ задана в виде множества $Z = \{Z^j\}_{j=1}^J$, $s_j = \text{card } Z^j$, $s = \text{card } Z$, $s = \sum_j s_j$. При этом каждый признак

$x_i^j \in Z^j$ асоціюється з еталоном Z^j в плані включення в його склад, ібо база образців задана.

Возьмемо за основу модель класифікації, коли для кожного класу, задаваного еталоном, попередньо синтезується його деякий «центр», а класифікація здійснюється шляхом віднесення до класу з найбільш близьким центром [4]. Приміємо для навчання і отримання центрів класів конкурентну структуру – нейронну мережу Кохонена [1, 2, 5]. Он-лайн-кластеризатор на основі мережі Кохонена і його застосування для множини структурних ознак зображень докладно обговорюються в [2]. Розглянемо процедуру навчання мережі в наступному вигляді.

1. Ініціюємо матрицю $M = \{m_j\}_{j=1}^J$ ваг, рядками якої є формовані вектори нейронів m_j – центрів класів так, що $m_j = x_1^j$, $x_1^j \in Z^j$, де i – номер довільного вектора з класу образців Z^j .

2. Сформуємо елементи навчального множини в вигляді сукупності $Z = \{Z^j\}_{j=1}^J$ всіх s елементів бази еталонів.

3. Вибіримо поточний елемент $z \in Z$, для кожного $j \in [1, 2, \dots, J]$ обчислимо відстань $q_j = \rho(z, m_j)$ і визначимо клас d нейрона-переможця: $d = \arg \min_j q_j$. Вид метрики визначається властивостями дескрипторів.

4. Обчислимо зміни ваг для нейронів вихідного шару мережі

$$\Delta m_j = h(j, d, t) \cdot \eta \cdot (z - m_j), \quad (1)$$

де η – задаваний коефіцієнт швидкості навчання; $h(j, d, t)$ – значення функції близькості для нейрона j в момент часу навчання t ; традиційно $h(j, d, t) = \exp[-\rho(j, d) / \sigma(t)]$ визначають в вигляді гауссової функції, а радіус $\sigma(t) = 1 / \exp(t^{-2})$ близькості зменшують з збільшенням параметра t часу навчання $t = 1, \dots, s$.

5. Корректируємо матрицю ваг $M = M + \Delta M$ на кроці t .

6. Продовжуємо навчання (п. 3-5) до завершення списку Z .

7. Перевіряємо виконання критерію зупинки навчання. Це може бути величина помилки кластеризації. При необхідності (невиконання умов зупинки) продовжуємо навчання з п. 2. Це може бути дублювання множини входних даних, вибір даних з множини Z в установленому або в довільному порядку і т.д.

Дослідники відзначають, що нормування даних (приведення норми вектора до одиниці) при застосуванні мережі Кохонена прискорює збіжність

мережі до локального мінімуму помилки [1, 8]. Для мереж з незначительним числом нейронів (2-3) застосування нормування вважається обов'язковим. Якщо обробляються нормовані дані, то нейрони мережі стають нормованими в ході навчання. В даній ситуації ми використовуємо ненормовані дані, прагнучи забезпечити достатнє віддалення нейронів між собою з метою забезпечення результативного розділення класів. В той же час існує досвід застосування для кластеризації і нормованих детекторів ОТ [4]. Значення помилки кластеризації оцінимо критерієм

$$E = \frac{1}{sN} \sum_{j=1}^J \sum_{v=1}^{s(j)} \rho(x_v, m_j), \quad (2)$$

де сумуються відстані елементів до центру всередині кластерів, а потім застосовується усереднення по числу s елементів навчального множини і по розміру N дескриптора ОТ [4].

Іншим ключовим індикатором для оцінювання якості класифікації може бути значення критерію, що підраховує частку елементів навчальної вибірки Z , які потрапили «не в свої» класи. Він обчислюється як

$$\beta = \sum_{j=1}^J (s_j - a_j) / s, \quad (3)$$

де a_j – кількість ознак з загальної кількості s_j в описанні еталона Z^j , віднесених в процесі класифікації до класу j .

Значення β відображають рівень помилкових рішень при класифікації ознак множини Z . Чим ближче β до нуля, тим вище досягнуто якість класифікації на навчальній вибірці.

Вивчимо в порівняльній перспективі три базових варіанти побудови класифікатора, що відрізняються кількістю нейронів, які модифікуються в процесі навчання:

- 1) налаштовується тільки нейрон-переможець;
- 2) модифікуються три нейрони, найближчих до відстані до нейрона-переможця;
- 3) модифікується повна мережа нейронів з відповіддю до відстані до нейрона-переможця.

Оцінимо результативність розпізнавання з застосуванням цих варіантів навчання мережі, що відрізняються глибиною аналізу даних і управлінням мережею.

Обговорювані варіанти навчання класифікатора принципово відрізняються тільки п. 4, де по-різному обчислюється функція $h(j, d, t)$. В той же час, для досягнення збіжності повинно бути виконано умову $h(j, d, t) \in [0, 1]$. При цьому версія 1 реалізує грубе розпізнавання (налаштовується тільки переможець, принцип «переможець забирає все»). Версія 2 відносить елемент до трьох найбільш близьких центрів (м'якше обчислення, «переможець забирає

больше»), а версия 3 осуществляет наиболее тонкую обработку, подобно нечеткому подходу относя анализируемый дескриптор ко всем кластерам одновременно, но с разными весами, пропорциональными расстоянию. Версии 2 и 3 позволяют управлять нейронами – соседями победителя, и фактически реализуют принцип «нейронного газа», в соответствии с которым осуществляют ранжирование элементов сети из окрестности признака обучения [1, 7].

Вычисление центров классов

Результативность работы сети Кохонена в значительной мере определяется начальными условиями ее функционирования, которые определяются значениями начальных центров m_j в п. 1 процедуры. В связи с этим изучим такие варианты выбора центров:

1) произвольно по одному дескриптору из каждого эталона;

2) посредством применения специальной процедуры формирования центров.

Учитывая бинарное представление дескрипторов, для каждого Z^i определим вектор центра класса на основании логического правила

$$m_i(b) = \begin{cases} 1, & \sum_{d=1}^{s(i)} x_d(b) \geq s(i)/2, \\ 0, & \sum_{d=1}^{s(i)} x_d(b) < s(i)/2, \end{cases} \quad (4)$$

$$x_d \in Z^i, \quad b = 1, \dots, 256,$$

где $x_d(b)$ – бит с номером b для дескриптора с номером d в описании эталона.

Центр (4) отражает свойства эталона (класса). Значение каждого из битов m_i определяется значениями соответствующих битов дескрипторов, принадлежащих эталону с номером i .

Анализируем элементы $x \in Z$ содержания структурных описаний базы эталонов (обучающая выборка) путем отнесения их к соответствующему классу v с использованием конкурентного способа

$$v = \arg \min_{i=1, \dots, J} \rho(x, m_i). \quad (5)$$

Отметим, что в (5), как и в п. 3 процедуры обучения Кохонена, необходимо определить метрику для вычисления отличия двух дескрипторов. В методе Кохонена естественным есть применение евклидовой метрики или ее квадрата

$$\rho(x, m_i) = \sum_{b=1}^{256} (x(b) - m_i(b))^2, \quad (6)$$

ибо здесь обрабатываются вещественные данные (256 – размер детектора ORB). В то же время при работе с битовыми данными, например в (5), более эффективно с точки зрения объема вычислений использовать метрику Хемминга

$$\rho(x, m_i) = \sum_{b=1}^{256} |x(b) - m_i(b)|, \quad (7)$$

что определяет количество расходящихся битов для двух двоичных последовательностей одинаковой длины. В результате обработки для каждого образца в соответствии с процедурой Кохонена или с соотношением (5) получаем кластерное представление $h[Z^i] = (h_1^i, \dots, h_J^i)$ эталона, где h_a^i – целые числа. Оно соответствует распределению элементов множества Z^i по классам эталонов. Если рассмотреть набор векторов $h[Z^i]$ как строки матрицы размером $J \times J$, то ошибка (3) вычисляется через сумму диагонали этой матрицы, деленной на общее число признаков s базы.

Результаты экспериментальных исследований

В среде C++ нами разработана программная модель для классификации изображений на основании структурных описаний, сформированных детектором ORB. Вычисления, анализ и обработка детекторов ОТ реализованы в виде программного средства на основе модуля features2d кросс-платформенной библиотеки OpenCV [9].

Дескрипторы имеют вид бинарного вектора размером 256, кодируются в Open CV в виде типа uchar (unsigned char – тип данных в C++, используются для хранения символов, объем 8 бит, значение 0 ... 255), а не в битах. Данные хранятся в матрице, где количество строк равно числу выявленных дескрипторов, а число столбцов равно 32 (256 бит дескриптора трансформируются в 32 uchar). В качестве базы эталонов применен набор из 5 изображений денежных знаков (рис. 1).

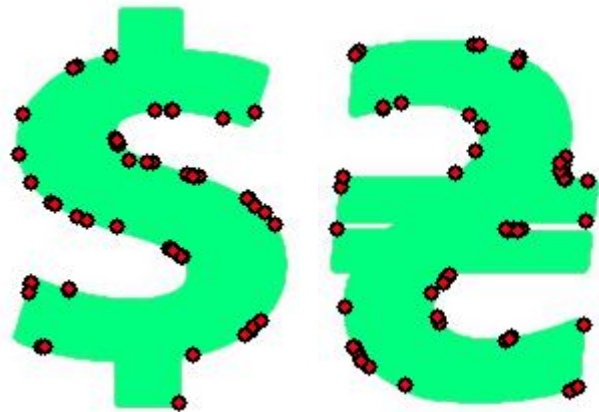


Рис. 1. Примеры изображений с координатами выделенных ОТ

В целях формирования качественных структурных описаний, устойчивых к фоновым и случайным помехам, на основе использования стандартных функций библиотеки OpenCV проведена специальная обработка анализируемых изображений, которую образно можно назвать «ретушированием». В ходе такой обработки изображение подвергалось фильтрации и бинаризации: изображение переводило-

лось в градации оттенков серого цвета, выбран по- порю яркости по критерию бинаризации Отсу, прове- дена бинаризация [10]. Примененная методика на- правлена на выделение контура объекта и снижает влияние помех, пересечений областей полутонов, случайных областей с резким изменением интен- сивности и т.д. Количество выявленных ОТ колеба- лось в пределах 47 ... 50, общий объем обучающей выборки, составило 244 ОТ.

Проведем обработку (4) для множеств дескрип- торов каждого из эталонов и для полученных цен- тров с использованием метрики Хемминга выпол- ним классификацию (5). В результате получена мат- рица распределения ОТ по классам в виде табл. 1.

Таблица 1
Распределение ОТ по классам с центрами (4)

Эталон	Классы				
	1	2	3	4	5
Z^1	14	17	3	4	14
Z^2	9	28	7	1	8
Z^3	10	18	7	7	11
Z^4	16	15	4	12	7
Z^5	7	14	2	1	29

Как видно из табл. 1, множество дескрипторов ORB для конкретной базы изображений с использо- ванием ретуширования и бинарной обработки не позволяет однозначно классифицировать множество ОТ каждого из эталонов.

Причина – число ОТ, отнесенных к определен- ному классу, не является максимальным для эталонов Z^1 , Z^3 и Z^4 . Ошибка классификации составляет $E = 0,74$ по формуле (2) и $\beta = 0,68$ по формуле (3).

Оценим и сравним теперь результативность клас- сификации с применением обсуждаемых трёх вариан- тов обучения сети, различающихся способом управления сетью из-за различного числа настраиваемых нейро- нов. Исходный набор данных содержит 244 бинарных вектора длины 256. Количество итераций равно коли- честву входных векторов. Матрица весов – матрица действительных чисел размером 244 на 256. На тестовом компьютере с процессором Intel Core i5-4440 об- работка выполняется в течении 3.8 - 4.3 с.

В табл. 2 показаны распределения дескрипторов ОТ по классам (варианты произвольного выбора цен- тров и вычисления по формуле (4)) для версии, когда в процессе обучения настраивается нейрон- победитель. Во второй половине табл. 2 наблюдается достаточно высокий уровень различения эталонов: максимумы значений находятся на диагоналях и зна- чительно превышают другие элементы в строках. Ошибки в случае произвольных центров составляют $E = 0,63$ и $\beta = 0,67$. В случае сформированных по (4) центров – $E = 0,38$ и $\beta = 0,34$. Как видим, примене- ние сети Кохонена в случае специального формиро- вания центров (4) приводит к значительному сниже- нию ошибки классификации, а следовательно, улуч- шается качество различения объектов по множеству значений их дескрипторов.

Таблица 2

Распределение ОТ эталонов в первом варианте обработки

Эталон	Произвольный выбор центров				
	Классы				
	1	2	3	4	5
Z^1	19	0	20	3	8
Z^2	6	14	18	5	7
Z^3	6	5	18	3	15
Z^4	6	1	14	21	8
Z^5	4	4	5	20	14

Эталон	Формирование центров (4)				
	Классы				
	1	2	3	4	5
Z^1	41	4	2	0	3
Z^2	20	26	1	0	3
Z^3	17	2	23	0	5
Z^4	14	2	2	30	2
Z^5	4	4	9	0	30

Кроме того, значения ошибок E и β оказались достаточно близки. Для варианта модификации трёх ближайших к победителю нейронов в случае произ- вольных центров ошибка составляет $E = 0,62$ и $\beta = 0,60$. Для сформированных в виде (4) центров $E = 0,30$ $\beta = 0,26$. Для варианта модификации всей сети нейронов ошибка в случае произвольных цен- тров составляет $E = 0,58$ и $\beta = 0,61$. Для сформиро- ванных в виде (4) центров $E = 0,22$ $\beta = 0,20$.

Как видим, с расширением числа настраиваемых нейронов, особенно для варианта специально сфор- мированных центров (4), ошибка классификации су-

щественно снижается. Например, динамика измене- ния значений β для трех вариантов обработки соста- вили 0,34, 0,26 и 0,20. Это подчеркивает возможно- сти адаптации сети Кохонена к произвольным дан- ным, особенно в случае успешного формирования первоначальных центров классов. Расширение набора адаптируемых нейронов от 1 до общего их числа по- вышает показатели удачной работы сети.

Выводы

Эффективность классификации визуальных объектов по множеству особых точек с использова- нием сети Кохонена непосредственно зависит от сле-

дующих ключевых взаимосвязанных факторов: распознаваемая база, метод предварительной обработки, способ формирования дескрипторов, начальный выбор центров, метрика для сравнения дескрипторов, размер кортежа подстраиваемых нейронов.

Исследование подтвердило универсальность и возможности успешной адаптации сети Кохонена к произвольным наборам визуальных данных, особенно в случае удачного формирования первоначальных центров классов. В ходе обучения сеть Кохонена как-бы «вытягивает» степень разрозненности данных, улучшая конечные показатели классификации. Это позволяет решать более сложный спектр задач классификации. Расширение набора адаптируемых нейронов в процессе обучения значимо совершенствует показатели действенной работы сети.

Наряду с путем непосредственного отнесения дескрипторов распознаваемого изображения по максимальному подобию к центрам в классификации могут быть применены способы долевого формирования подобия с весовым значением каждого из классов. Эти методы менее чувствительны к фактору равномерности распределения дескрипторов эталонов по классам. В плане влияния на результат классификации обладают преимуществом те методы формирования дескрипторов, которые имеют большую размерность дескриптора, поэтому BRISK имеет преимущество по отношению к ORB.

Научная новизна исследования состоит в построении метода структурной классификации на основе модификаций сети Кохонена, что обеспечивает необходимую результативность различения объектов. **Практическая значимость** – получение прикладных многовариантных программных моделей для оценивания эффективности метода классификации и подтверждение ее эффективности для конкретных баз изображений. Дальнейшее улучшение результативности распознавания может быть достигнуто за счет подходов обучения с учителем, т.к. классы дескрипторов базы известны. Другим раз-

витием методов обучения на сетях Кохонена есть применение пакетной обработки, имеющей, как правило, более высокие показатели качества классификации из-за тщательного и многократного анализа данных. В целом это позволяет обучить сеть и достичь требуемых показателей классификации универсально для произвольной базы.

Список литературы

1. Осовский С. *Нейронные сети для обработки информации* / С. Осовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. Борисов Е. *Кластеризатор на основе нейронной сети Кохонена*. Режим доступа: <http://mechanoide.kiev.ua/neural-net-kohonen-clusterization.html>
3. Ethan Rublee, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski. *ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF*. – *Computer Vision (ICCV), IEEE International Conference on IEEE*, pp. 2564 – 2571, 2011.
4. Гороховатский В.А. *Структурное распознавание изображений с применением моделей интеллектуальной обработки и самоорганизации признаков* / В.А. Гороховатский, А.В. Гороховатский, А.Е. Берестовский // *Радиоэлектроника, информатика, управление*. – 2016. – №3 (38). – С. 39–46.
5. Кохонен Т. *Самоорганизующиеся карты* / Т. Кохонен – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 655 с.
6. Gorokhovatsky V.A. *Efficient Estimation of Visual Object Relevance during Recognition through their Vector Descriptions* / V.A. Gorokhovatsky // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2016, Vol. 75, No 14. – P. 1271–1283.
7. Новотарський М.А. *Штучні нейронні мережі: обчислення*. / М.А. Новотарський, Б.Б. Нестеренко // *Праці інст. математики НАН України*. – 2004, т. 50. – 408 с.
8. Горбаченко В. И. *Сети и карты Кохонена*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://gorbachenko.self-organization.ru/articles/Self-organizing_map.pdf
9. *OpenCV Open Source Computer Vision*. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.opencv.org/master/index.html>.
10. *OpenCV Image Thresholding* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://docs.opencv.org/3.3.0/d7/44d/tutorial_py_thresholding.html

Надійшла до редколегії 11.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.П. Пуятін, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ ВІЗУАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА МНОЖИНОЮ ДЕСКРИПТОРІВ ОСОБЛИВИХ ТОЧОК НА БАЗІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ КОХОНЕНА

В.О. Гороховатський, Д.В. Пупченко

Вирішена задача розпізнавання візуальних об'єктів на основі класифікації дескрипторів зображень із застосуванням мережі Кохонена. Обговорюються варіанти та результати оброблення в плані різного числа нейронів, що налагоджуються. Аналізуються критерії оцінки рівня правильної класифікації. Приводяться результати програмного моделювання мережі з різними варіантами оброблення та формування центрів класів.

Ключові слова: комп'ютерний зір, особливі точки зображення, дескриптори особливих точок, детектор ORB, мережа Кохонена, програмне моделювання, кількість налагоджуваних нейронів, критерії правильної класифікації.

CLASSIFICATION OF IMAGES OF VISUAL OBJECTS BY A SET OF UNIQUE POINT DESCRIPTORS BASED ON THE KOHONEN NEURAL NETWORK

V.O. Gorokhovatsky, D.V. Pupchenko

The task of recognizing visual objects based on classification of image descriptors using the Kohonen network is solved. Variants and results of computation in terms of different numbers of adapted neurons are discussed. The criteria for assessing the level of the correct classification are analyzed. The results of the software modeling of the network with different variants of processing and formation of the centers of classes are given.

Keywords: computer vision, special image points, special point descriptors, ORB detector, Kohonen network, software simulation, number of tunable neurons, correct classification criterion.

А.А. Коваленко¹, Г.А. Кучук², С.М. Нечаусов³

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

² Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

³ Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СИНТЕЗУ І РЕКОНФІГУРАЦІЇ СТРУКТУР КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

В статті наведено результати розробки інформаційних технологій синтезу і реконфігурації структур комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування. Проаналізовано усі типи вимог до таких систем. Представлено детальний опис розроблених інформаційних технологій, їх складових, умов використання, проміжних та фінальних результатів їх застосування. Застосування розроблених інформаційних технологій дозволяє виконувати початковий синтез оптимальної структури комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування, отримати його формальний опис та виконати подальшу реконфігурацію системи в залежності від якісних та кількісних вимог до задач управління об'єктом критичного застосування, що реалізуються засобами такої комп'ютерної системи.

Ключові слова: синтез, реконфігурація, компонент, система, технологія.

Вступ

Процеси синтезу і реконфігурації інформаційних та відповідних технічних структур комп'ютерних систем (КС) сучасних об'єктів критичного застосування (ОКЗ) є надзвичайно важливими та комплексними, що обумовлене їхньою недостатньою формалізованістю, динамікою кількісних та якісних змін у КС, а також змінами принципів управління [1 – 4].

З іншого боку, чимала множина задач, що пов'язані з активностями життєвого циклу систем управління (на базі КС) ОКЗ, є слабо вивченою. З точки зору синтезу структур систем управління, однією з актуальних задач є оцінка якості варіанту такої структури, і, в свою чергу, відповідна динаміка функціонування її складових компонент. Також важливими підзадачами процесу синтезу структури системи управління є визначення оптимальної кількості рівнів ієрархії, оптимальний розподіл конкретних задач за такими рівнями, а також вибір конкретних компонент рівнів для вирішення поста-влених задач [5 – 9] при множині сумісних обмежень.

Таким чином, основна задача оптимального синтезу та реконфігурації структур комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування полягає у забезпеченні такого функціонування системи управління об'єктом критичного застосування, яке дозволить мінімізувати технічні та економічні витрати для всієї її ієрархічної структури.

Метою даної статті є розробка інформаційних технологій синтезу і реконфігурації структур комп'ютерних систем сучасних об'єктів критичного застосування при урахуванні обмежень на ресурси

на базі запропонованих авторами математичних моделей та методів.

Формування інформаційних технологій синтезу і реконфігурації структур КС ОКЗ

Основними групами вимог до сучасних систем управління ОКЗ є наступні:

- функціональні вимоги;
- вимоги до надійності виконання функцій; вимоги до стійкості виконання функцій;
- вимоги до якості функціонування; вимоги до незалежності функцій, що виконуються;
- вимоги до видів забезпечення;
- вимоги до оцінки та підтвердження відповідності;
- вимоги до експлуатації.

Вимогою до ієрархічної структури системи управління є її повнота, тобто повинна бути реалізована повна функціональність, від отримання заявок від ОКЗ до їх обробки кінцевим компонентом КС і видачі відповідного результату. Під час формалізації зв'язків між множинами компонент і рівнів КС ОКЗ зручно використовувати імовірнісний підхід, коли факт закінчення обслуговування заявки певним компонентом призводить до появи заявки на одному або певній множині інших компонент з заданої ймовірністю. Таким чином, є можливість використовувати наступні моделі для представлення будь-якого типу систем управління ОКЗ:

- системи збору та попередньої обробки інформації: на нижніх рівнях містять компоненти, що дозволяють збирати і обробляти інформацію, при цьому на більш високі рівні ієрархії передається лише незначна частина інформації;

- системи управління з вертикальною управлінням: збір і обробка інформації проводиться виключно компонентами нижніх рівнів, що не впливає на завантаження верхніх рівнів; при цьому останні управляють завантаженням нижніх рівнів;

- складні системи управління збору і обробки інформації: збір та обробка інформації може проводитися компонентами кожного з рівнів ієрархії.

Вибір структури КС ОКЗ може здійснюватися з використанням множини моделей і методів, що засновані на теорії масового обслуговування та імітаційному моделюванні. Дослідження таких КС, в свою чергу, виконується за допомогою методів статистичного моделювання.

У загальному випадку, кожен компонент більш високого рівня ієрархії КС ОКЗ отримує меншу кількість заявок, причому такий потік можна розглядати як найпростіший. Це призводить до можливості аналізу функціонування кожного з компонент певного рівня незалежно від функціонування компонент нижчого рівня.

Відповідно до вищенаведених вимог запропоновано комплекс, що складається із взаємопов'язаних інформаційних технологій синтезу і реконфігурації структур КС ОКЗ. Ілюстрацію інформаційної технології синтезу структур комп'ютерних систем ОКЗ наведено на рис. 1, а технології реконфігурації структур КС ОКЗ наведено на рис. 2.

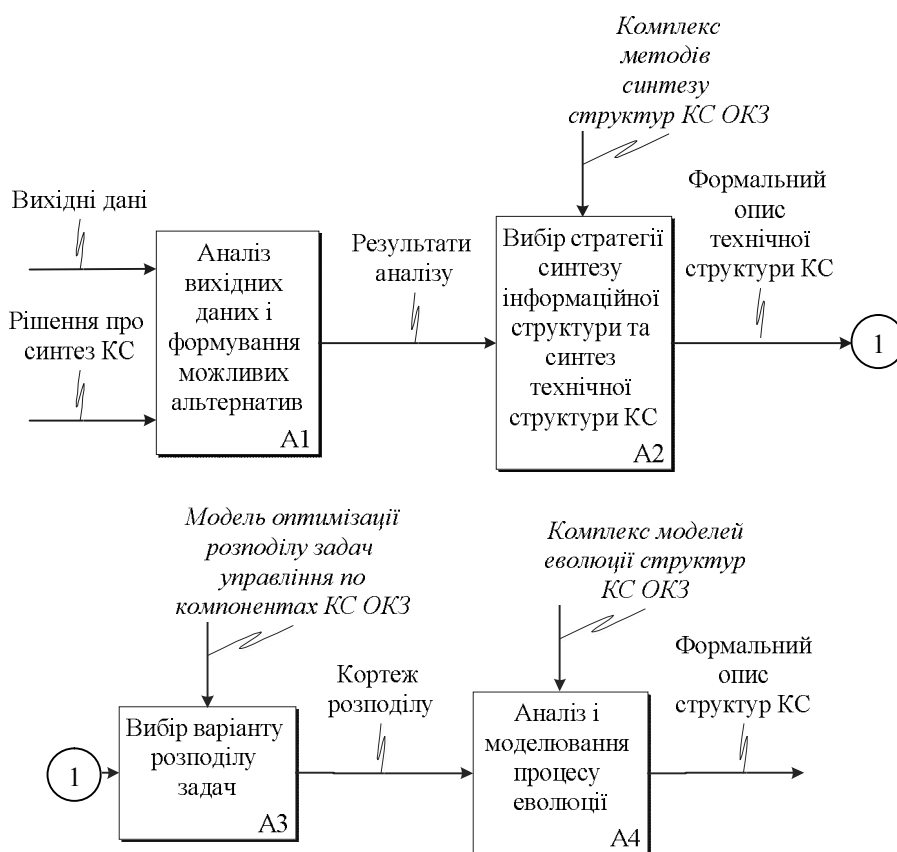


Рис. 1. Інформаційна технологія синтезу структур КС ОКЗ

Інформаційна технологія синтезу структур КС ОКЗ складається з етапів, опис яких наведено нижче, та має відношення до кількісного та якісного складу структури КС ОКЗ.

Етап аналізу вхідних даних і формування можливих альтернатив має на меті, на основі певного набору вихідних даних та факту прийнятого рішення про синтез КС, формування результатів аналізу щодо майбутньої КС ОКЗ. Такі результати аналізу є входом наступного етапу – вибору стратегії синтезу інформаційної структури та синтезу технічної структури КС ОКЗ, що призводить, завдяки використанню розробленого комплексу методів синтезу структури (інформаційної та технічної) до появи формаль-

ного опису технічної структури КС. Після отримання такого опису стає можливим виконання наступного етапу – вибору варіанту розподілу задач по компонентах такої КС, на основі відповідної моделі оптимізації розподілу задач управління. Таким чином, результатом етапу є кортеж розподілу, завдяки якому можна виконати останній етап інформаційної технології – етап аналізу і моделювання процесу еволюції. За реалізацію такого етапу відповідає комплекс моделей еволюції структур КС ОКЗ, а результатом є формальний опис структур КС.

Для реалізації запропонованої інформаційної технології необхідно мати набір вихідних даних системи та рішення про синтез КС.

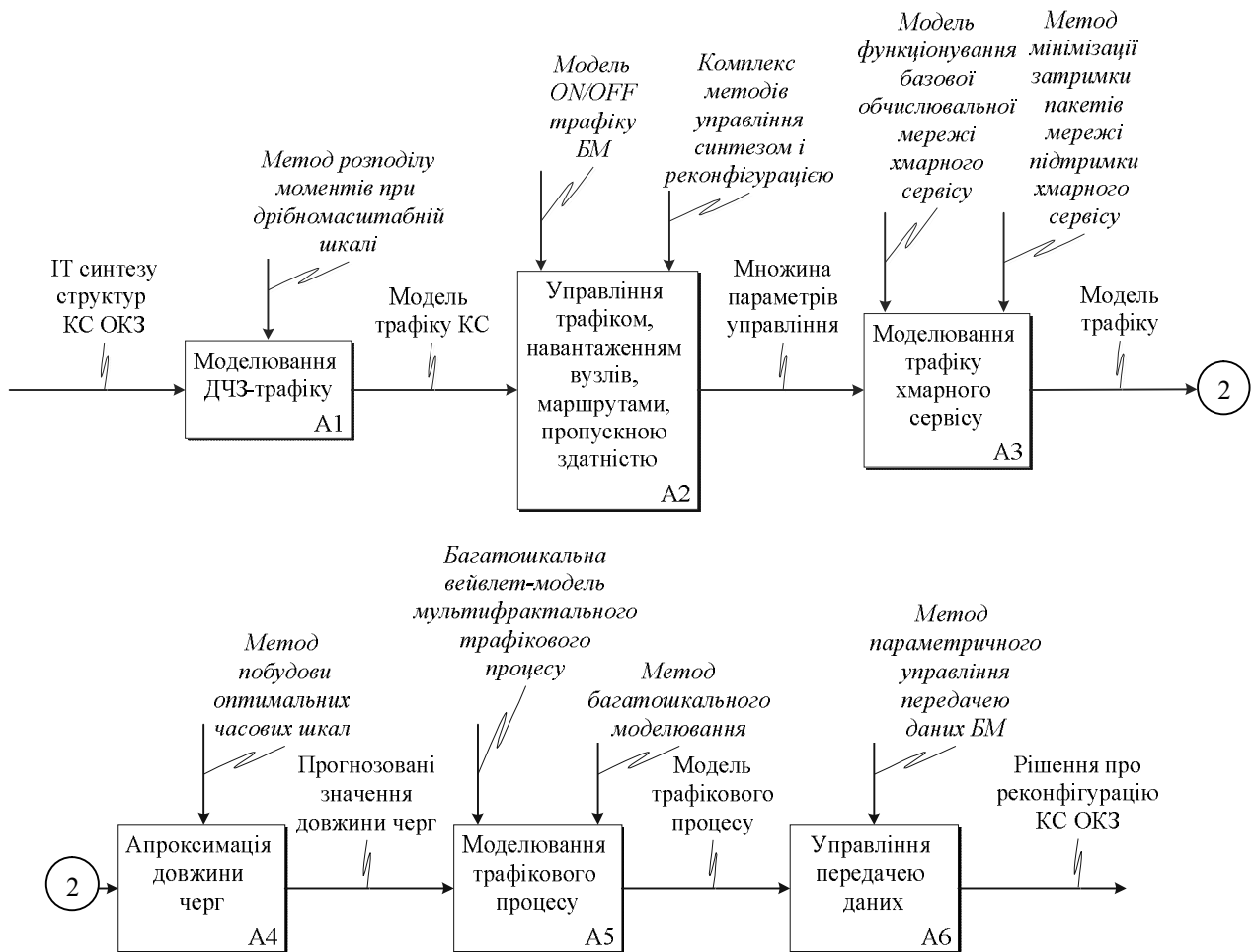


Рис. 2. Інформаційна технологія реконфігурації структур КС ОКЗ

На виході маємо формальний опис структур КС ОКЗ.

Інформаційна технологія реконфігурації структур складається, у свою чергу, з таких етапів, та має відношення до логіки функціонування КС ОКЗ без зміни кількісного та якісного складу її структури.

Початковим є етап моделювання трафіку, що має довготривалу часову залежність. Він опрацьовує формальний опис структур КС ОКЗ (результат застосування інформаційної технології синтезу структур КС ОКЗ) за допомогою методу розподілу моментів при дрібномасштабній шкалі, та дозволяє отримати модель трафіку КС.

Завдяки такій моделі можливо реалізувати наступний етап – етап управління трафіком, навантаженням вузлів, маршрутами, пропускнуою здатністю. В рамках етапу застосовуються модель ON/OFF трафіку бездротових мереж (БМ) та комплекс методів управління синтезом і реконфігурацією. Виходом етапу є множина параметрів управління – тобто вхід етапу моделювання трафіку хмарного сервісу. Його виконання є можливим завдяки моделі функціонування базової обчислювальної мережі хмарного сервісу та методу мінімізації затримки пакетів мережі підтримки хмарного сервісу. Отримана в

результаті модель трафіку дозволяє запуск наступного етапу – апроксимації довжини черг за допомогою методу побудови оптимальних часових шкал. Розраховані прогнозовані значення довжини черг є водночас виходом цього і входом наступного етапу – моделювання трафікового процесу. Такий етап реалізується завдяки використанню багатошкільної вейвлет-моделі мультифрактального трафікового процесу та відповідного методу багатошкільного моделювання.

Отриману в результаті модель трафікового процесу використовує наступний етап – етап управління передачею даних, який реалізується з використанням методу параметричного управління передачею даних БМ.

Таким чином, для реалізації інформаційної технології реконфігурації структур КС ОКЗ необхідно мати результати застосування інформаційної технології синтезу структур КС ОКЗ. В якості вихідних даних отримуємо рішення про відсутність необхідності реконфігурації або план реконфігурації КС ОКЗ.

Для кожного з наведених вище етапів запропонованих інформаційних технологій розроблено відповідні моделі та методи.

Застосування розроблених інформаційних технологій дозволяє виконувати початковий синтез оптимальної структури КС ОКЗ, отримати його формальний опис та виконати її подальшу реконфігурацію в залежності від якісних та кількісних вимог до задач управління ОКЗ, що реалізуються засобами такої КС.

Висновки

В статті наведено розгорнуті результати розробки інформаційних технологій синтезу і реконфігурації структур комп'ютерних систем сучасних об'єктів критичного застосування.

Проведено детальний аналіз та опис етапів, типів та характеру інформації, що передається між етапами в рамках кожної технології.

Окремо розглянуті умови для застосування та особливості реалізації кожного етапу.

Напрямок подальших досліджень – проведення порівняльного аналізу запропонованих інформаційних технологій з існуючими.

Список літератури

1. Коваленко, А.А. Подходы к синтезу информационной структуры системы управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Системы обработки информации: сборник научных трудов. – Х.: ХУ ВС, 2014. – Вып. 1 (117). – С. 180 – 184.
2. Коваленко, А.А. Подходы к синтезу технической структуры компьютерной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Сборник научных трудов Харьковского университета Воздушных Сил. – Х.: ХУ ВС, 2014. – Вып. 1(38). – С. 116 – 119.
3. Коваленко, А.А. Подходы к оптимизации распределения задач управления по компонентам компью-

терной системы, образующей систему управления объектом критического применения / А.А. Коваленко // Наука и техника Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: ХУ ПС, 2014. – Вып. 2(15). – С. 158 – 160.

4. Кучук, Г.А. Модель процесса эволюции топологической структуры компьютерной сети системы управления объектом критического применения / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, А.А. Янковский // Системы обработки информации: сборник научных трудов. – Х.: ХУ ВС, 2014. – Вып. 7 (123). – С. 93 – 96.

5. Кучук, Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення / Г.А. Кучук. – Х.: ХУПС, 2013. – 264 с.

6. Кучук, Г.А. Синтез структуры вычислительной сети для иерархической системы управления / Г.А. Кучук, А.В. Королев, О.В. Муравьев, О.Ю. Набока // Сб. научн. трудов. Информационные системы. Вып.2. – Х.: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1994. – С.90 – 93.

7. Кучук, Г.А. Концептуальный подход до синтезу структуры інформаційно-телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук, І.В. Рубан, О.П. Давікоза // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: ХУ ПС, 2013. – Вып. 7 (114). – С. 106 – 112.

8. Кучук, Г.А. Синтез стратифікованої інформаційної структури інтеграційної компоненти гетерогенної складової Єдиної АСУ Збройними Силами України / Г.А. Кучук, О.П. Давікоза // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України: науково-технічний журнал. – Х.: ХУ ПС, 2013. – № 3(12). – С. 154-158.

9. Мамиконов, А.Г. Математическая модель и алгоритм выбора оптимальной структуры типового контура управления ЛА / А.Г. Мамиконов, А.Д. Цвиркун, В.Н. Новиков, В.К. Атинфиев // Сб. трудов ИПУ. – М.: ИПУ, 1975. – Вып. 6. – С. 80 – 84.

Надійшла до редколегії 1.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Г. Удовенко, Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця, Харків.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА И РЕКОНФИГУРАЦИИ СТРУКТУР КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ ОБЪЕКТОВ КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

А.А. Коваленко, Г.А. Кучук, С.Н. Нечаусов

В статье приведены результаты разработки информационных технологий синтеза и реконфигурации структур компьютерных систем объектов критического применения. Проанализированы все типы требований к таким системам. Представлено детальное описание разработанных информационных технологий, их составляющих, условий использования, промежуточных и финальных результатов их применения. Применение разработанных информационных технологий позволяет выполнять начальный синтез оптимальной структуры компьютерных систем объектов критического применения, получить его формальное описание и выполнить дальнейшую реконфигурацию в зависимости от качественных и количественных требований к задачам управления объектом критического применения, реализуемых средствами такой компьютерной системы.

Ключевые слова: синтез, реконфигурация, компонент, система, технология.

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR SYNTHESIS AND RECONFIGURATION OF FACILITIES OF CRITICAL APPLICATION'S COMPUTER SYSTEMS STRUCTURES

A.A. Kovalenko, G.A. Kuchuk, S.M. Nechausov

The paper presents the results of the development of information technologies for synthesis and reconfiguration of facilities of critical application's computer systems structures. All types of requirements for such systems are analyzed. A detailed description of the developed information technologies, their components, conditions of use, intermediate and final results of their application is presented. Application of developed information technologies allows performing the initial synthesis of computer system's optimal structure intended for application at facilities of critical application, derive its formal description and perform further reconfiguration based on qualitative and quantitative requirements for the facility management tasks implemented by means of such computer system.

Keywords: synthesis, reconfiguration, component, system, technology.

Н.В. Лукова-Чуйко, А.П. Мусієнко, М.О. Коваль

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖ ПЕТРІ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ ВІЯВЛЕННЯ ЗОВНІШНІХ ВПЛИВІВ НА ІНФОРМАЦІЙНУ СИСТЕМУ

В роботі показано, що інформаційна система має, як правило, складну динамічну структуру, тому можливе використання мереж Петрі з метою створення моделей виявлення та блокування зовнішніх впливів (DDoS-атак). Дані моделі засновані на описі структури інформаційної системи, на яку здійснюється вплив даною атакою, та процесів зміни станів цієї системи. Створені моделі виявлення та блокування DDoS-атак, які описують за допомогою мереж Петрі процес аналізу вхідного трафіку на предмет наявності даного типу атак, процес виявлення джерел шкідливого трафіку та їх подальшого блокування, що надає можливість для створення відповідних алгоритмів. Побудовані моделі дозволяють підвищити рівень функціональної стійкості інформаційних систем. Під функціональною стійкістю інформаційної системи розуміється властивість системи перебувати в стані працездатності, тобто виконувати необхідні функції протягом заданого інтервалу часу або наробітки в умовах відмов складових частин через зовнішні і внутрішні фактори.

Ключові слова: функціональна стійкість, інформаційна система, мережі Петрі, DDoS-атака.

Вступ

Під інформаційною системою будемо розуміти систему передачі даних спеціального призначення для передачі комп'ютерного, голосового та відеотрафіку. Усі інші вимоги, що висувуються до інформаційної системи – продуктивність, надійність, сумісність, керованість, живучість, тощо – пов'язані з якістю передачі даних [1, 2]. Дана мережа належить до класу складних організаційних систем і побудована на основі технологій корпоративних обчислювальних мереж. Інформаційна мережа складається з вузлів комутації і ліній зв'язку між ними. У сучасних умовах на інформаційні системи впливають зовнішні фактори (активний або пасивний вплив зовнішнього середовища). В роботі в ролі зовнішніх факторів розуміються DDoS-атаки. За обставин зростання вартості втраченої інформації при сучасному збільшенні інформаційних потоків між філіями підприємства, в умовах обмеженого фінансування і низького рівня захищеності комутаційного устаткування, актуальною є задача побудови функціонально стійкої інформаційної мережі [3-7].

Взаємодія подій в інформаційній системі має, як правило, складну динамічну структуру [8-10]. При цьому глобальні ситуації в системі формуються за допомогою локальних операцій, що називаються умовами реалізації подій. Умова може мати таку ємність: умова не виконана (ємність дорівнює 0), умова виконана (ємність дорівнює 1), умова виконана з n -кратним запасом (ємність дорівнює n , де n – ціле додатне число). Певні поєднання умов дозволяють реалізовуватися деякій події (передумови подій), а реалізація подій змінює деякі умови (післяумови подій), тобто події взаємодіють з умовами, а умови з подіями. Тому для вирішення вказаного

завдання достатньо представити інформаційну систему як структуру.

Мета роботи побудувати моделі виявлення та блокування зовнішніх впливів (DDoS-атак), які описують за допомогою мереж Петрі процес аналізу вхідного трафіку на предмет наявності даного типу атак, процес виявлення джерел шкідливого трафіку та їх подальшого блокування, що надає можливість для створення відповідних алгоритмів.

Основна частина. Першим кроком для побудови моделей функціонування інформаційних систем з використанням мереж Петрі є абстрагування від конкретних фізичних та функціональних особливостей її компонентів [11]. Сукупність дій, що виникає як реалізації подій при функціонуванні інформаційної системи, утворюють процес, що породжується цією системою.

В мережах Петрі умови та події представлені абстрактними символами з двох алфавітів, що не перетинаються [12]. Процес зміни станів інформаційної системи, що описаний мережею Петрі, представлений на рис. 1. Умови-місця та події-переходи пов'язані відношенням безпосередньої залежності (безпосереднім причинно-наслідковим зв'язком), що зображується за допомогою дуг, які ведуть з місць в переходи, а з переходів в місця. Місця, з яких ведуть дуги на даний перехід, називаються його вхідними місцями. Місця, на які ведуть дуги з даного переходу, називаються його вихідними місцями.

В мережі, зображеній на рис. 1 показані стани інформаційної системи, що мають місце в процесі її функціонування. Місця p_1 та p_2 являються вхідними для переходу t_1 , а місця p_3 та p_4 – вихідними. В даному випадку подія-перехід t_1 безпосередньо залежить від місць-умов p_1 та p_2 , а місця p_3 та p_4 безпосередньо залежать від t_1 .

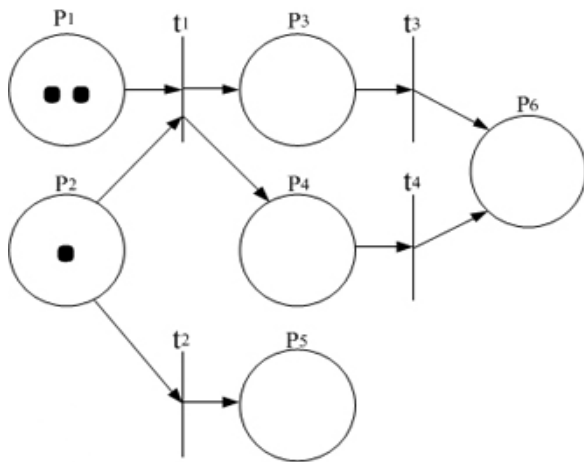


Рис. 1. Процес зміни станів інформаційної системи, що описаний мережею Петрі

В цій же мережі місце p_2 є вхідним одночасно для двох переходів t_1 та t_2 , місце p_6 є вихідним одночасно для двох переходів t_3 та t_4 .

Перейдемо до побудови моделі виявлення та класифікації DDoS-атак, що представлена на рис. 2.

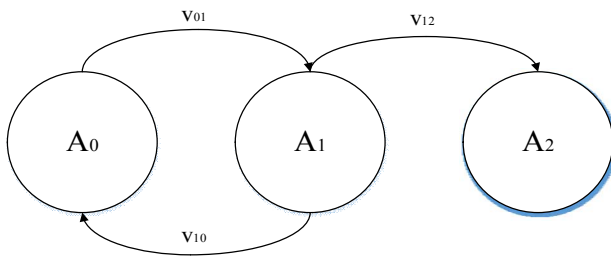


Рис. 2. Графова модель виявлення та класифікації зовнішніх впливів (DDoS-атак) на інформаційну систему

Стан A_0 – обмін пакетами з користувачами, нормальне функціонування інформаційної системи.

Стан A_1 – фіксація перевищень граничного рівня завантаженості каналу зв'язку інформаційної системи.

Стан A_2 – вивід повідомлення про наявність DDoS-атаки та її типу, запуск процесу виявлення джерел шкідливого трафіку.

Перехід v_{01} – перевищення граничного рівня завантаженості каналу зв'язку інформаційної системи або наявність одного піку трафіку.

Перехід v_{10} – перевищення граничного рівня завантаженості каналу зв'язку було менше, ніж три секунди, або не надійшов другий пік трафіку.

Перехід v_{12} – перевищення граничного рівня завантаженості каналу зв'язку було три секунди та більше, або надійшов другий пік трафіку.

Розглянута вище графова модель виявлення та класифікації DDoS-атак віддзеркалює принцип аналізу вхідного трафіку на предмет наявності даного класу атак, але не відображає деталей цього процесу. Тому перейдемо до розгляду детальної моделі

виявлення DDoS-атак, що представлена мережею Петрі, зображеною на рис. 3.

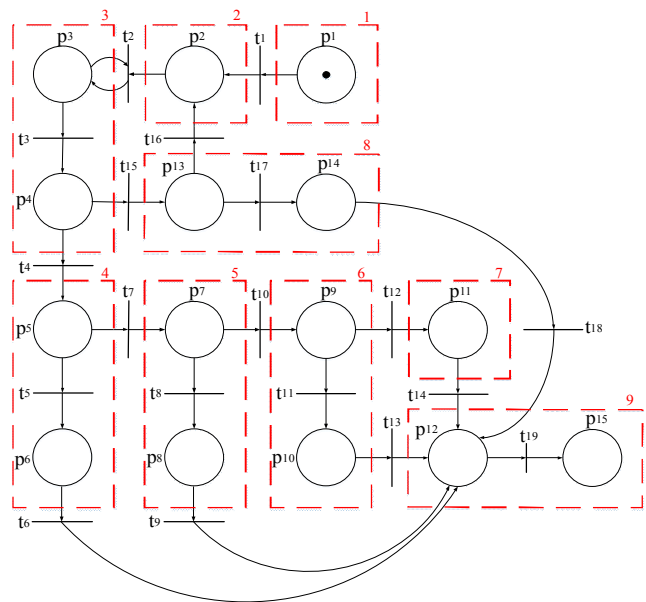


Рис. 3. Модель виявлення та класифікації DDoS-атак

На початку аналізу вхідного трафіку на предмет наявності DDoS-атаки токен знаходиться у місці p_1 . Після спрацювання переходу t_1 токен переміщується у місце p_2 , і починається обмін пакетами з користувачами інформаційної системи. Далі спрацьовує перехід t_2 , токен переміщується в місце p_3 , і виконується перевірка рівня завантаженості каналу зв'язку. Якщо перевищення граничного рівня завантаженості не зафіксовано, спрацьовує перехід t_2 , і токен залишається в місці p_3 . Таким чином, при відсутності перевищення граничного рівня завантаженості токен знаходиться в місці p_3 . Якщо фіксується перевищення впродовж однієї секунди, то спрацьовує перехід t_3 , і токен переміщується в місце p_4 . На даному кроці знову перевіряється завантаженість каналу зв'язку. Якщо вона не перевищує граничний рівень протягом однієї секунди, то спрацьовує перехід t_5 , і токен переміщується в місце p_{13} . Якщо протягом наступної секунди перевищення не було зафіксовано, то спрацьовує перехід t_{16} , і токен переходить у місце p_2 . Якщо перевищення зафіксовано, спрацьовує перехід t_{17} , токен перейде до місця p_{14} , що призведе до виводу повідомлення про наявність повільної DDoS-атаки. Після чого спрацьовує перехід t_{18} , токен перейде до місця p_{12} . Якщо при знаходженні токена в місці p_4 , спрацьовує перехід t_4 , токен опиниться в місці p_5 , та буде перевірено чи мають вхідні сегменти порт призначення 80 (протокол HTTP). Якщо так, то спрацьовує перехід t_5 , буде виведено повідомлення про наявність HTTP-флуда,

після чого спрацює перехід t_6 , і токен перейде до місця p_{12} . Якщо ні, то спрацює перехід t_7 , токен перейде до місця p_7 , і буде перевірено чи протоколом транспортного рівня вхідних сегментів є ICMP. Якщо так, то спрацює перехід t_8 , токен перейде до місця p_8 , і буде виведено повідомлення про наявність ICMP-флуда, після чого спрацює перехід t_9 , та токен опиниться в місці p_{12} . Якщо ні, то спрацює перехід t_{10} , токен перейде до місця p_9 , і буде перевірено чи протоколом транспортного рівня вхідних сегментів є UDP. Якщо так, то спрацює перехід t_{11} , токен перейде до місця p_{10} , і буде виведено повідомлення про наявність UDP-флуда, після чого спрацює перехід t_{13} , і токен опиниться в місці p_{12} . Якщо ні, то спрацює перехід t_{12} , токен перейде до місця p_{11} , та буде виведено повідомлення про наявність SYN-флуду. Після чого спрацює перехід t_{14} , і токен переходить до місця p_{12} . Після потрапляння токена у місце p_{12} запускається механізм виявлення джерел шкідливого трафіку, після чого виконується

перехід t_{19} та завершення механізму виявлення та класифікації DDoS-атак.

Для опису взаємозв'язків місць та переходів даної мережі Петрі розглянемо її функцію інцидентності:

$$\Phi(p, t) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Для аналізу динаміки можливих змін розмітки представленої мережі Петрі розглянемо її граф досяжності, що приведений на рис. 4.

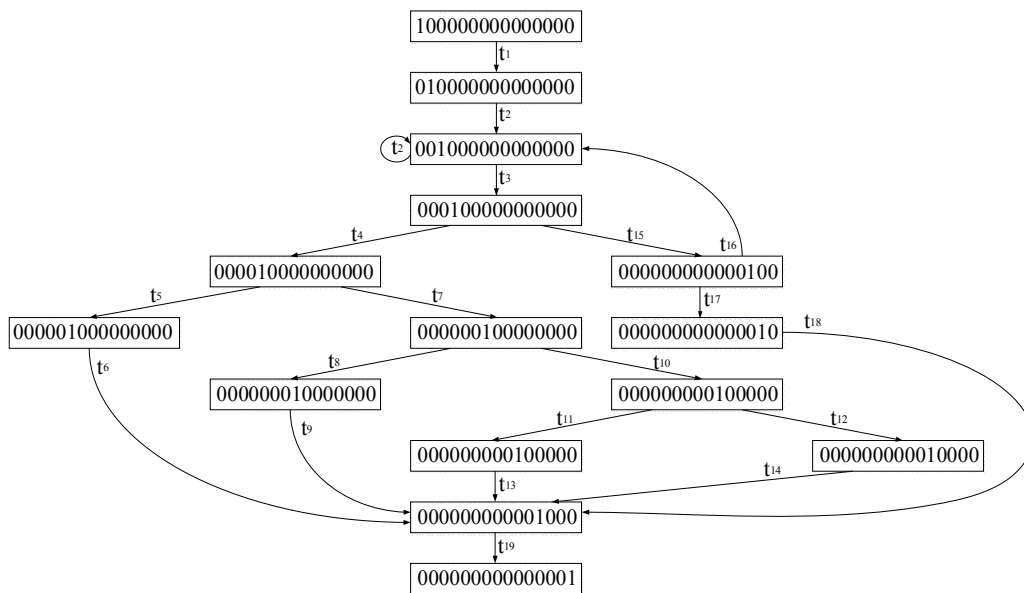


Рис. 4. Граф розміток мережі Петрі, що описує механізм аналізу вхідного трафіку

Сутність даної моделі додатково розкривається функціональною схемою її роботи. Дана схема зображена пунктирною лінією. Блок 1 показує початок аналізу вхідного трафіку на предмет наявності DDoS-атаки. Це початок роботи мережі Петрі. Блок 2 відображає обмін даними з легітимними користувачами мережі. При відсутності атаки постійно спрацює перехід t_2 , і виконується перевірка завантаженості каналу зв'язку. Якщо вона не перевищує граничний рівень, то робота мережі продовжується в блоці 2, що є показником нормального функціонування ITM. В протилежному випадку в блоці 3 визначається характер перевищення. Якщо воно має суцільний характер протягом інтервалу очікування,

виконується перехід до блоку 4, в якому перевіряється наявність на прикладному рівні протоколу HTTP. Якщо даний протокол виявлений, робиться висновок про наявність HTTP-флуду і виконується перехід до блоку 9, де запускається процес блокування атаки. Якщо HTTP не виявлений робиться перехід до блоку 5, в якому перевіряється наявність на транспортному рівні протоколу ICMP. У разі його виявлення робиться висновок про наявність ICMP-флуду і виконується перехід до блоку 9. В протилежному випадку – перехід до блоку 6, в якому перевіряється наявність на транспортному рівні протоколу UDP. Якщо він виявлений робиться висновок про наявність UDP-флуду і виконується пе-

рехід до блоку 9. В протилежному випадку робиться перехід до блоку 7, де робиться висновок про наявність SYN-флуду, після чого виконується перехід до блоку 9. Якщо в блоці 3 виявлені піки трафіку, виконується перехід до блоку 8, де робиться висновок про наявність повільної DDoS-атаки, після чого виконується перехід до блоку 9.

Розглянемо графову модель виявлення джерел шкідливого трафіку, що представлена на рис. 5.

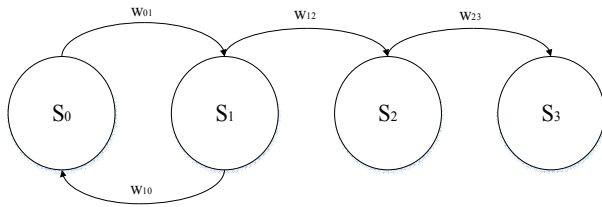


Рис. 5. Графова модель блокування DDoS-атак

Стан S_0 – виділення в базі даних вхідних сегментів, що прибули впродовж трьох секунд від початку атаки.

Стан S_1 – сортування виділених сегментів по вихідному програмному порту.

Стан S_2 – визначення програмного порту, з якого прибула найбільша кількість сегментів.

Стан S_3 – запуск процесу блокування шкідливого трафіку.

Перехід w_{01} – знайдені сегменти, що прибули впродовж трьох секунд від початку атаки.

Перехід w_{10} – сегменти, що прибули впродовж трьох секунд від початку атаки, не знайдені.

Перехід w_{12} – сортування сегментів по вихідному програмному порту завершено, перехід до визначення порту, з якого прибула найбільша кількість сегментів.

Перехід w_{23} – порт, з якого прибула найбільша кількість сегментів, визначений, перехід до блокування шкідливого трафіку.

Розглянута вище графова модель виявлення джерел шкідливого трафіку не відображає деталей цього процесу. Тому перейдемо до розгляду детальної моделі виявлення DDoS-атак, що представлена мережею Петрі, зображеною на рис. 6.

При запуску механізму блокування DDoS-атаки токен знаходиться в місці p_1 , спрацьовує перехід t_1 , і токен опиняється в місці p_2 , де перевіряється тип атаки. Після цього спрацьовує перехід t_2 , токен переходить в місце p_3 , і виконується підключення до бази даних. Далі якщо спрацьовує перехід t_3 , токен переміщується в місце p_4 , що означає наявність повільної DDoS-атаки. Якщо має місце флуд, то спрацьовує перехід t_4 , і токен переходить до місця p_5 . Після цього токен шляхом спрацювання переходу t_5 або t_6 потрапляє до місця p_6 , в якому визначається джерело шкідливого трафіку (зовнішнє або внутрішнє). Якщо джерело внутрішнє, то спрацьовує перехід t_7 , і токен пе-

реходить до місця p_7 , де виконується сортування вихідних IP-адрес джерел шкідливого трафіку за кількістю пакетів від більшого до меншого.

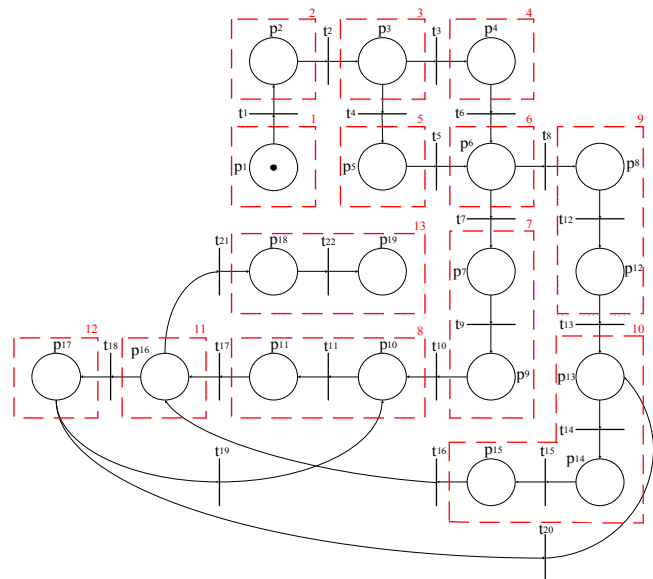


Рис. 6. Модель блокування DDoS-атак

Після цього спрацьовує перехід t_9 , і токен опиняється в місці p_9 , де виконується запис відсортованого списку у відповідну таблицю бази даних. Далі спрацьовує перехід t_{10} , токен потрапляє в місце p_{10} , де виконується відключення порту комутатора, з якого надходять пакети з IP-адреси, першої в списку. Після цього спрацьовує перехід t_{11} , токен потрапляє в місце p_{11} , де виконується видалення зі списку IP-адрес першої. Якщо джерело зовнішнє, спрацьовує перехід t_8 , токен потрапляє в місце p_8 , де виконується обробка зчитаної з бази даних інформації, а саме сортування вихідних програмних портів джерел шкідливого трафіку за кількістю сегментів від більшого до меншого. Далі спрацьовує перехід t_{12} , токен потрапляє в місце p_{12} , де виконується запис відсортованого списку у відповідну таблицю бази даних. Після цього спрацьовує перехід t_{13} , токен потрапляє в місце p_{13} , де виконується відправлення сегментів-відповідей на перший в списку порт по резервному каналу зв'язку. Далі спрацьовує перехід t_{14} , токен потрапляє в місце p_{14} , де виконується підміна вихідної IP-адреси вихідних пакетів сервера адресою програмного шлюзу. Після цього спрацьовує перехід t_{15} , токен потрапляє в місце p_{15} , і виконується видалення першого в списку порта. Далі внаслідок спрацювання переходу t_{15} або t_{16} токен потрапляє в місце p_{16} , де перевіряється завантаженість каналу зв'язку. Якщо вона перевищує граничну, то спрацьовує перехід t_{18} , токен потрапляє в місце p_{17} , де перевіряється джерело атаки. В залежності від типу атаки спрацьовує або перехід t_{19} , або t_{20} , токен потрапляє або в місце p_{10} , або в p_{13} відповідно. Якщо завантаженість менше граничної, спрацьовує перехід t_{21} , і токен переходить в місце p_{18} , в якому

даного типу атак, процес виявлення джерел шкідливого трафіку та їх подальшого блокування, що надає можливість для створення відповідних алгоритмів.

Побудовані моделі дозволяють підвищити рівень функціональної стійкості інформаційних систем. Під функціональною стійкістю інформаційної системи розуміється властивість системи перебувати в стані працездатності, тобто виконувати необхідні функції протягом заданого інтервалу часу або нарабтки в умовах відмов складових частин через зовнішні і внутрішні фактори.

Список літератури

1. Додонов А.Г. Введение в теорию живучести вычислительных систем / А.Г. Додонов, М.Г. Кузнецова, Е.С. Горбачик; Отв. ред. Гуляев В.А.; АН УССР. Ин-т пробл. регистрации информации. – К.: Наукова думка, 1990. – 184 с.
2. Кравченко Ю.В. Функциональная стійкість – властивість складних технічних систем / Ю.В. Кравченко О.В. Барабаш // Збірник наукових праць. – К.: НАОУ, 2002. – Бюл. № 40. – С. 225-229.
3. Саланда І.П. Математична модель структури розгалуженої інформаційної мережі 5 покоління (5G) на основі випадкових графів / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, Н.В. Лукова-Чуйко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2017. – Вип. 6 (46). – С. 118 – 121.
4. Саланда І.П. Система показників та критеріїв формалізації процесів забезпечення локальної функціональної стійкості розгалужених інформаційних мереж / І.П. Саланда, О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко // Наукове періодичне видання «Системи управління, навігації та зв'язку». – Полтава: ПНТУ, 2017. – Вип. 1 (41). – С. 122 – 126.
5. V.A. Mashkov, O.V. Barabash Self-checking and Self-diagnosis of Module Systems on the Principle of Walking 6. Diagnostic Kernel Engineering Simulation. – Amsterdam: OPA, 1998. Vol. 15. pp. 43-51.
7. Барабаш О.В. Методика накопичення діагностичної інформації в системах інтелектуального відеоконтролю / О.В. Барабаш, С.В. Бодров, А.П. Мусієнко Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2015. – Вип. 1 (33). – С. 118 – 121.
8. Барабаш О.В. Алгоритм самодіагностування технічного стану вузлів комутації інформаційних систем / О.В. Барабаш, Д.М. Обідін, А.П. Мусієнко // Сучасний захист інформації. – К.: № 2 – 2014. – С. 114- 121.
9. Лукова-Чуйко Н.В. Математична модель взаємовідносин загроз та комплексних систем захисту інформації / Н.В. Лукова-Чуйко // Вісник інженерної академії України. – № 3. – 2015 р. – С. 131-135.
10. Лукова-Чуйко Н.В. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку – № 2(42) – 2017. – С. 117 – 120.
11. Лукова-Чуйко Н.В. Метод прихованої передачі даних в інформаційних системах із застосуванням стегаграфії / О.В. Барабаш, Н.В. Лукова-Чуйко, А.П. Мусієнко, А.О. Смірнов // Сучасний захист інформації: науково-технічний журнал. – К.: ДУТ, 2017. – № 4. – С. 43 – 49.
12. Котов В.Е. Сети Петри / В.Е. Котов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 158 с.
13. Лукова-Чуйко Н.В. Ефективність управління ресурсами e-learning в гіперконвергентному середовищі / Н.Г. Кучук, Н.В. Лукова-Чуйко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2018. – Вип. 1 (47). – С. 123 – 126.

Надійшла до редколегії 21.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Можасв, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕТЕЙ ПЕТРИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ВЫЯВЛЕНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ

Н.В. Лукова-Чуйко, А.П. Мусієнко, М.А. Коваль

В работе показано, что информационная система, имеет, как правило, сложную динамическую структуру, поэтому возможно использованием сетей Петри с целью создания моделей выявления и блокирования внешних воздействий (DDoS-атак). Данные модели основаны на описании структуры информационной системы, на которую оказывается воздействие данной атак, и процессов изменения состояний этой системы. Созданные модели выявления и блокирования DDoS-атак, которые описывают с помощью сетей Петри процесс анализа входящего трафика на предмет наличия данного типа атак, процесс выявления источников вредоносного трафика и их дальнейшего блокирования, что дает возможность для создания соответствующих алгоритмов. Построенные модели позволяют повысить уровень функциональной устойчивости информационных систем. Под функциональной устойчивостью информационной системы понимается свойство системы находиться в состоянии работоспособности, то есть выполнять необходимые функции в течение заданного интервала времени или нарабтки в условиях отказов составных частей через внешние и внутренние факторы.

Ключевые слова: функциональная устойчивость, информационная система, сети Петри, DDoS-атака.

USE OF PETRI NETWORK FOR CONSTRUCTION FOR EXTERNAL EFFECTS DETECTION ON THE INFORMATION SYSTEM

N.V. Lukova-Chuiko, A.P. Musienko, M.O. Koval

In this paper it is shown that, the information system has, as a rule, a complex dynamic structure, so it is possible to use Petri Networks to create models for detecting and blocking external influences (DDoS attacks). These models are based on the description of the structure of the information system, which is influenced by this attack and processes of changing the states of this system. Models for detecting and blocking DDoS attacks, which describes the process of analyzing incoming traffic for the presence of this type of attack using the Petri Networks, the process of detecting sources of malicious traffic and their subsequent blocking, which provides the ability to create appropriate algorithms are created. The built models allow to increase the level of functional stability of information systems. Under the functional stability of the information system is understood the property of the system to be in a state of efficiency, that is, to perform the necessary functions within the given interval of time or works in the conditions of refusals of component parts through external and internal factors.

Keywords: functional stability, information system, Petri Networks, DDoS-attack.

И.В. Лысенко, Р.С. Нос

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

МОДЕЛЬ КРИПТОПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДАННЫХ ПО СХЕМЕ ЗАДАЧИ О РЮКЗАКЕ НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА ДИВЕРСНОСТИ

Рассматривается модель криптопреобразований, базирующихся на схеме задачи о рюкзаке на основе принципа диверсности. Для повышения криптостойкости предложено модифицировать рюкзачную криптосистему путем введения большего количества рюкзаков и произвольного шифрования блоков текста с их помощью. Предложенный на основе принципа диверсности подход позволяет снизить риски непарируемых ситуаций, связанных с возможностями со стороны производителей криптопродукции (несимметричных алгоритмов шифрования) встраивать потайные лазейки в схемы генерации ключей криптоалгоритмов.

Ключевые слова: диверсность, криптоалгоритмы, криптостойкость, задача о рюкзаке

Введение

Постановка задачи. Несмотря на многие достижения современной криптографии задача обеспечения конфиденциальности данных, передаваемых по незащищенным каналам, не потеряла своей актуальности. Традиционно эта задача решается путём разработки новых и совершенствования существующих криптографических алгоритмов, преимущественно относящихся к классу несимметричных. Что касается несимметричных алгоритмов шифрования, то, как известно, наибольшую популярность приобрели RSA-подобные криптоалгоритмы, стойкость которых основана на трудоёмкости решения задачи факторизации большого числа, а также El Gamal-подобные криптоалгоритмы, стойкость которых определяется трудоёмкостью решения задачи дискретного логарифмирования в простом и расширенном конечном поле (в том числе и в группе точек эллиптической кривой). В то же время, начиная с конца 1970-х годов, для обеспечения конфиденциальности данных были предложены различные варианты криптоалгоритмов, в основу стойкости которых положена труднорешаемая задача о рюкзаке – так называемые рюкзачные криптоалгоритмы.

Первый такой криптоалгоритм в 1978 году был предложен американскими криптографами Мерклом и Хеллманом. Для проверки своего алгоритма на стойкость разработчики назначили награду за его компрометацию, и уже в 1982 году математик Ади Шамир успешно его «взломал». Однако, несмотря на компрометацию оригинальной схемы, вплоть до наших дней не прекращаются попытки улучшить и доработать алгоритм. Так, в 1980 году без помощи друг друга Рон Грэм и Ади Шамир нашли способ улучшить защищенность схемы Меркла-Хеллмана, но уже в 1983 году схема была скомпрометирована. В 1985 году был представлен алгоритм, базирующийся на модульных рюкзаках с использованием китайской теоремы об остатках. Позднее, в 1986 году Харальд Нидеррайтер предложил рюкзачную криптосистему

на базе алгебраической теории кодирования, а затем в 1988 году мир увидела система с использованием принципа мультипликативного рюкзака, криптостойкость которой была дополнительно повышена в 2001 за счет использования алгоритма Пита Шальквейка. Удачной на длительное время оказалась и разработанная в 1991 идея многостадийной криптосистемы на основе задачи о рюкзаке. Суть схемы заключается в фиксировании рюкзачного вектора для каждого этапа, причем выходные данные после каждого цикла алгоритма используются в качестве исходного текста для следующего. В 1995 году был предложен новый подход к схеме Меркла-Хеллмана на основе диофантовых уравнений, но вскоре после этого несколько математиков независимо друг от друга показали, что эта криптосистема не является криптостойкой. Затем в 1996 году Куникацу Кобаяси и Масаки Кимура представили модернизированную рюкзачную криптосистему, базирующуюся на возможности отправителя выбирать ключ шифрования из целого набора. И наконец, в 2015 году Нэйтан Хэмлин и Уильям Уэбб из Вашингтонского государственного университета создали рюкзачный алгоритм, базирующийся на альтернативных способах представления чисел с использованием повторяющихся последовательностей. Данный алгоритм по сей день не был скомпрометирован в отличие от вышеприведенных модификаций, включающих модификации с использованием конечных групп; на основе прямого произведения циклических групп; на основе сплетения групп; с использованием мультипликативных рюкзаков и пр. Результаты исследований приведенных алгоритмов представлены в работах [1–4]. На наш взгляд, для обеспечения лучшей криптостойкости может быть также эффективно использован многоверсионный подход (принцип диверсности), который традиционно используется для успешного решения задачи обеспечения заданного уровня надёжности и гарантоспособности компьютерных и компьютеризированных систем. Некоторые результаты, полученные в рамках этого подхода, описаны в работах [5, 6].

Ещё одним аргументом в пользу применения принципа диверсности для построения криптосистем является то, что реализации некоторых криптоалгоритмов предполагают использование некоторых фиксированных (определяемых разработчиком) параметров, что, в принципе, может служить намёком на возможность использования потайных лазеек. При этом под потайной лазейкой (потайным входом) понимается наличие некоторого секрета, преднамеренно внедрённого разработчиком программной или аппаратной реализации криптоалгоритма с целью раскрытия содержимого зашифрованных данных без знания секретного ключа пользователей либо раскрытия секретного ключа [7].

Кроме того, что касается несимметричной криптографии, в частности, несимметричных алгоритмов шифрования, имеет место принципиальная возможность встраивания лазеек в схемы генерации ключей этих алгоритмов со стороны компаний-разработчиков криптопродукции, что потенциально даёт им возможность раскрыть секретный ключ пользователя-потребителя этой продукции [7].

В данном случае речь идёт о так называемом SETUP-механизме (SETUP – Secretly Embedded Trapdoor with Universal Protection – секретно встроенная лазейка с универсальной защитой), который видоизменяет криптоалгоритм таким образом, что позволяет производителю криптосистемы получать секретную информацию пользователя (чаще всего информацию о его секретных ключах). В то же время, для любого наблюдателя, отличного от разработчика, функционирование модифицированного крипто-алгоритма неотличима от работы исходного.

Цель данной работы: описание подхода, основанного на принципе диверсности, позволяющего повысить криптостойкость и свести к минимуму описанную выше угрозу на примере криптоалгоритма на базе классической схемы задачи о рюкзаке.

Основная часть

Принцип встраивания лазейки в криптоалгоритмы. Так, например, криптоалгоритм RSA модифицируется следующим образом. Производитель криптоалгоритма выбирает некоторое несимметричное криптопреобразование $NST = \{E(\cdot), D(\cdot)\}$, где $E(\cdot)$, $D(\cdot)$ – прямое (шифрующее) и обратное (дешифрующее) преобразования соответственно, которым соответствует пара ключей (открытый и секретный). В процессе генерации ключей SETUP-механизмом первоначально выбираются простые числа p и q , после чего вычисляется открытый ключ пользователя как функция от $E(\cdot)$, т.е. $K_o = E(p)$. Если выполняется условие взаимной простоты чисел $E(p)$ и $\varphi(N)$, где $N = p \cdot q$, то K_o объявляется открытым ключом пользователя. В противном случае выбирается другое значение p и вычисляется значение секретного ключа K_c как величина K_o , обратная по модулю $\varphi(N)$. По открытому ключу пользо-

вателя производитель программной или аппаратной реализации криптоалгоритма может рассчитать секретный параметр $p: p = D(K_o)$, после чего определить другой секретный параметр $q = N/p$, а затем, вычислив функцию Эйлера $\varphi(N) = (p-1)(q-1)$, определить секретный ключ за полиномиальное время [5].

Далее опишем принцип встраивания лазейки в рюкзачный криптоалгоритм. Рюкзачным вектором называется $A = (a_1, \dots, a_n)$ – набор из n отличающихся упорядоченных натуральных чисел a_i . При этом $n \geq 3$. Начальными данными рюкзачной задачи называем пару (A, α) . В данном случае в качестве A выступает рюкзачный вектор, а α – натуральное число. Решением для описанного выше входа (A, α) станет некоторое подмножество из A , в котором α будет суммой элементов. Так как речь идет о подмножестве, следует учитывать, что a_i не должны повторяться в сумме. Иногда рюкзачную задачу также называют «задачей о сумме размеров». Традиционно суть задачи о рюкзаке сводится к выяснению, обладает исходный набор данных (A, α) конкретным решением или нет. В случае с криптографией, необходимо для заданного входа (A, α) найти решение, зная точно при этом, что данное решение существует. И первый и второй варианты задачи являются NP-полными. Также известны варианты задачи, которые лежат за рамками класса NP [8].

Вектор A используется для шифрования блока C из n бинарных символов. Осуществляется это суммированием тех элементов A , для которых в соответствующих позициях C стоит единица. Если мы работаем с криптосистемой с открытым ключом, то обозначив эту сумму через α , расшифрование сводится к нахождению C по α или по A и α . Второй вариант как раз и является криптографическим вариантом рюкзачной задачи. Вектор C справедливо можно рассматривать как двоичный вектор-столбец. В таком случае α будет равно произведению AC . Продемонстрируем следующим образом: положим $n = 6$ и $A = (4, 42, 6, 1, 22, 11)$. В таком случае двоичные блоки $(1, 1, 0, 0, 1, 0)$ и $(1, 0, 1, 1, 0, 1)$ будут шифроваться как 68 и 22 соответственно. Для конкретного вектора A все шифртексты будут числами, не превосходящими 86, и каждому шифртексту при этом будет соответствовать не более одного исходного текста. В случае $A = (14, 28, 56, 82, 90, 132, 197, 284, 341, 455)$, $\alpha = 515$ будет соответствовать нескольким исходным текстам $(1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0)$, $(0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0)$, $(1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0)$. Это становится понятным, если начинать читать A справа налево. Для примера, 455 не может входить в решение, так как 60 (515–455) нельзя выразить в виде суммы. Продолжая рассуждение, можно продемонстрировать, что для шифртекста $\alpha = 516$ не существует верного исходного текста. Также становится очевидным, что в сумму не может входить ни одно из четырех последних чисел из рюкзачного вектора, тогда как сумма всех предыдущих чисел будет слишком маленькой. Для шиф-

ртекста $\alpha = 517$ единственным исходным текстом является $(1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 0)$. Подобные примеры демонстрируют тот факт, что криптоанализ для некоторых исходных данных рюкзачной задачи может быть достаточно легким. В случае, когда необходимо добиться однозначности расшифрования, для каждого α , все входы (A, α) должны иметь единственное решение. Будем называть подобные векторы A инъективными. Следовательно, и порожденная вектором A функция тоже является инъективной. В приведенных выше примерах первый вектор является инъективным, второй же — нет. Существуют векторы A , для которых все входы (A, α) легко решаемы. Работая с подобными векторами, не сложно построить двухстороннюю систему: и отправитель сообщения, и получатель будут знать исходный вектор A . Однако, если вектор B раскрыт как ключ шифрования, то непосредственный получатель должен обладать определенной секретной информацией. Необходима она для преобразования и ключа B , и шифртекста в легкорешаемый вход рюкзачной задачи. Этого можно достигнуть с помощью сверхвозрастающих векторов. Рюкзачный вектор $A = (a_1, \dots, a_n)$ называется сверхвозрастающим, если и только если $a_j > a_{j-1}$ справедливо для всех $j = 2, \dots, n$. Определим для вектора A : $\max A = \max(a_j | 1 \leq j \leq n)$.

Пусть x — неотрицательное число. Целую часть числа x обозначим через $[x]$, т. е. наибольшее целое, меньшее или равное x . Для целых x и $m \geq 2$ обозначим через $(x, \text{mod } m)$ наименьший неотрицательный остаток от деления x на m . Очевидно, что $(x, \text{mod } m) = x - [x/m] \cdot m$. Далее необходимо определить 2 варианта понятия модульного умножения. Возьмем вектор A , целое число $m > \max A$ и натуральное число $t < m$, взаимно-простое с m . Если $B = (b_1, \dots, b_n)$ такой вектор, что $b_i = (ta_i, \text{mod } m)$ для $i = 1, \dots, n$, то можно сказать, что вектор B получен из A с помощью модульного умножения относительно модуля m и множителя t . То, что числа взаимно-простые, гарантирует, что существует число $t^{-1} = u$, такое, что $tu \equiv 1 \pmod{m}$ и $1 \leq u < m$. Следовательно, A так же получается из B модульным умножением относительно m и u . В случае если предыдущее условие $m > \max A$ заменить более сильным $m > \sum_{i=1}^n a_i$, то справедливо говорить, что B получается из A сильным модульным умножением относительно m и t . Стоит отметить, что сейчас нельзя также сказать, что A получается из B сильным модульным умножением относительно m и u . Так как условие $m > \sum_{i=1}^n b_i$, не всегда выполняется. При этом, A получается из B модульным умножением относительно m и u . Разработчик криптосистемы выбирает A, t, m, B так, что вектор A является сверхвозрастающим, а вектор B образуется из A сильным модульным умножением относительно m и t . Вектор B используется как ключ шифрования и бинарные блоки (длинной n) посылаются к проектировщику

как числа β , которые получены с помощью вектора B (как описано выше). Криптоаналитик должен решать задачу о рюкзаке для исходных данных (B, β) . Создатель же вычисляет $\alpha = (u\beta, \text{mod } m)$ и решает задачу для данных (A, α) [8].

Модель реализации рюкзачной криптосистемы системы на основе принципа диверсности. В самом общем виде идея предлагаемого подхода заключается в том, чтобы производитель криптосистемы предоставлял возможность пользователю, во-первых, генерировать некоторое множество M_p сверхвозрастающих рюкзаков $A_i, j = 1, \dots, p$, которые могли бы использоваться для шифрования и расшифрования разных блоков одного сообщения неизвестным ни для кого образом (неопределённость в том, какому блоку шифруемого сообщения какой ключ A_i из множества M_p соответствует), и, во-вторых, чтобы пользователь имел возможность генерировать некоторый секретный параметр SP (например, на основе парольной фразы), благодаря чему возможно обеспечить упомянутую выше неопределённость (для злоумышленника) в шифровании блоков сообщения, а также обеспечить получателю зашифрованного сообщения возможность однозначного понимания того, какой блок зашифрованных данных каким рюкзаком A_j из множества M_p должен быть расшифрован.

На рис. 1 изображён пример, иллюстрирующий описанную идею для случая, когда сообщение N состоит из 10 блоков данных $N_i (i = 1, \dots, n)$ и $|M_p| = 3$.

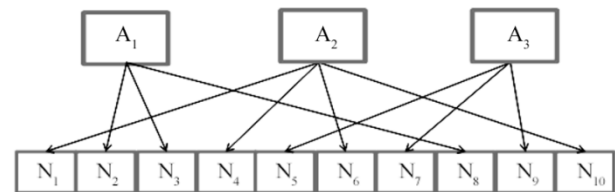


Рис. 1. Иллюстрация реализации принципа диверсности

Согласно данному рисунку, первый рюкзачный вектор используется для шифрования/расшифрования 2, 3 и 8 блоков данных, второй — 1, 4, 6, 10 блоков данных, а третий — 5, 7, 9 блоков данных. Очевидно, что число вариантов распределения «рюкзаков» по блокам данных равно $3^{10} = 59049$, а в общем случае для n блоков данных и $|M_p| = h$ это число равно h^n .

Очевидно, что для реализации данного подхода необходимо обеспечить однозначность (для отправителя и получателя зашифрованного сообщения) соответствия между блоками данных и используемыми ключами из множества M_p . Это может быть достигнуто, например, с помощью алгоритма:

0. $SP_{(2)} \rightarrow SP_{(10)}$.
1. $SP_{(10)} \pmod{h} = t_{1(10)}$.
2. $t_{1(10)} \rightarrow t_{1(2)} ; SP_{(2)} \oplus t_{1(2)} = S_{1(2)} ; S_{1(2)} \rightarrow S_{1(10)} ; S_{1(10)} \pmod{h} = t_{2(10)}$.
- for $i = 3 \dots n$ do
- $t_{i-1(10)} \rightarrow t_{i-1(2)} ; S_{i-2(2)} \oplus t_{i-1(2)} = S_{i-1(2)} ; S_{i-1(2)} \rightarrow S_{i-1(10)} ; S_{i-1(10)} \pmod{h} = t_{i(10)}$.

В алгоритмі прийняті наступні позначення: $SP_{(2)}$, $SP_{(10)}$ – двоичне і десятичне представлення секретного параметра SP ; $S_{i(2)}$, $S_{i(10)}$ – двоичне і десятичне представлення проміжного параметра S , відповідне i -му блоку даних; $t_{i(2)}$, $t_{i(10)}$ – двоичне і десятичне представлення параметра t_i , установлюючого відповідність між i -м блоком шифруємих/дешифруємих даних і використовуваним рюкзаком вектором A_j , $j = 1, \dots, h$ (наприклад, якщо $t_7 = 5$, то це означає, що для шифрування і дешифрування сьомого блоку даних використовується п'ятий «рюкзак»); \oplus – оператор сумування по модулю 2. Як видно з алгоритму, внаслідок двоичного значення секретного параметра перетворюється в десятичне і на першому етапі встановлюється те, який «рюкзак» з множини M_p буде використаний для шифрування/дешифрування першого блоку даних. Далі (на другому етапі) на основі раніше отриманих даних визначається, який рюкзакний вектор буде використаний для шифрування/дешифрування другого блоку даних. По аналогії виробляються розрахунки для решти блоків даних. В результаті розрахунків за даним алгоритмом буде отримано відповідність між блоками даних і рюкзаками векторами.

Заключення

Таким чином, можна підсумувати, що запропонований підхід на основі принципу диверсності дозволяє знизити ризики неконтрольованих ситуацій, пов'язаних з можливостями з боку розробників криптопродукції встраювати секретні лазейки в схему генерації ключів криптоалгоритмів. Недоліком цього підходу є збільшення обсягу матеріалу і, відповідно, деяке збільшення часу криптоперетворення в порівнянні з реалізацією класичної схеми рюкзакової криптосистеми.

Враховуючи останнє обставину потрібно зауважити, що розмова може йти про визначення того, для повідомлень якого розміру цілорозумно використо-

увати даний підхід з точки зору співвідношення між заданим рівнем криптостійкості і часом криптоперетворення (т.к. криптостійкість в цьому випадку буде, очевидно, тим вище, чим більше блоків даних в повідомленні). Крім того, умовою реалізації даного підходу є знання відправителем і отримувачем повідомлення деякого загального секретного параметра, який може бути сформований, наприклад, за протоколом Диффі-Хеллмана. В такому випадку, очевидно, можна говорити про те, що запропонований підхід можна назвати гібридним.

Список літератури

1. Животова А.Е. Модифікація криптосистеми з відкритим ключем на основі «задачі о рюкзаку» / А.Е. Животова, Н. Д. Зюляркина, Ю. О. Косыгина // Вестник УрФО. – 2014. – Вип. 1(11). – С. 16–20.
2. Сурина А. А. Рюкзаковий криптокод на основі прямого добутку циклических груп / А. А. Сурина // ОППМ. – 2015. – Вип. 2(22). – С. 95–97
3. Hamlin N. A Knapsack-like Code Using Recurrence Sequence Representations / N. Hamlin, B. Krishnamoorthy, W. Webb // The Fibonacci Quarterly. – 2015. – 1(53). – 24–34
4. Шнайер Б. Прикладна криптографія: протоколи, алгоритми, вихідні тексти на мові Си: пер. з англ. / Б. Шнайер – М.: «Триумф», 2002. – 820 с.
5. Лысенко И. В. Модели реализации принципа диверсности в несимметричной криптографии / И. В. Лысенко // Системи управління, навігації і зв'язку. – К.: ЦНДІ НГУ, 2012. – Вип. 1(21). Том 2. – С. 206–208..
6. Лысенко И. В. Модели обеспечения конфиденциальности сообщений средствами криптографии на основе принципа диверсности / И. В. Лысенко, Д. А. Филиппов // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС. – 2006. – Вип. 2(51). – С. 76–80.
7. Жуков А. Криптосистемы со встроенными лазейками / А. Жуков // ВУТЕ. – 2007. – №2. – С.45–51
8. Саломаа А. Криптография с открытым ключом: пер. с англ. / А. Саломаа – М.: Мир, 1995. – 318 с.

Надійшла до редколегії 21.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків.

МОДЕЛЬ КРИПТОПЕРЕТВОРЕННЯ ДАНИХ ЗА СХЕМОЮ ЗАДАЧІ ПРО РЮКЗАК НА ОСНОВІ ПРИНЦИПУ ДИВЕРСНОСТІ

І.В. Лисенко, Р.С. Нос

Розглядається модель криптоперетворення, що базується на схемі завдання про рюкзак на основі принципу диверсності. Для підвищення криптостійкості запропоновано модифікувати рюкзаковий криптокод шляхом введення більшої кількості рюкзаків і довільного шифрування блоків тексту з їх допомогою. Запропонований на основі принципу диверсності підхід дозволяє знизити ризики неконтрольованих ситуацій, пов'язаних з можливостями з боку виробників криптопродукції (несиметричних алгоритмів шифрування) вбудувати потаємні лазейки в схему генерації ключів криптоалгоритмів.

Ключові слова: диверсність, криптоалгоритми, криптостійкість, задача про рюкзак.

MODEL OF DATA CRYPTOTRANSFORMATION BY THE SCHEME OF KNAPSACK PROBLEM BASED ON THE DIVERSITY PRINCIPLE

I.V. Lysenko, R.S. Nos

The article considers the model of crypto-transformations, which are based on the knapsack problem scheme based on the principle of the diversity. To increase the cryptographic stability, it was proposed to modify the knapsack cryptosystem by increasing knapsacks number and randomly encrypting blocks of text with their help. The approach proposed on the basis of the principle of diversity allows us to reduce the risks of uncontrolled situations related to the opportunities on the possibilities of crypto products producers (asymmetric encryption algorithms) to build secret loopholes into crypto-algorithms key generation schemes.

Key words: derversity, cryptographic algorithms, cryptoscope, knapsack problem.

А.С. Свиридов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОЗНАК ПРОГРАМНИХ РЕАЛІЗАЦІЙ АЛГОРИТМІВ НА ОСНОВІ СИНТАКСИЧНОГО АНАЛІЗУ

Розглянуто існуючі підходи та методи виявлення ознак. Запропоновано використання синтаксичного аналізу в парі з семантикою. Проведено аналіз особливостей, що виникають при об'єднанні алгоритмів, описано можливість приналежності алгоритмів різних груп та призначень. Запропонований метод дозволяє визначати ознаки програмної реалізації алгоритмів. Використання отриманих ознак дозволяє групувати схожі за ознаками алгоритми.

Ключові слова: метод, ознака, синтаксичний аналізатор, семантика, програмний код.

Вступ

До існуючих видів запису алгоритмів можна віднести такі як словесний, формульно-словесний, графічний і описаний на формальній алгоритмічній мові. За такої необхідності, такі способи записів, як словесний, формульно-словесний і графічний перетворюються в спосіб, описаний на формальній алгоритмічній мові. Незалежно від способу запису алгоритмів їх можна представити у вигляді наступних основних схем: лінійні, розгалужувальні, а також циклічні алгоритми. Лінійні алгоритми являють собою пряму послідовність операцій або дій. Розгалужувальні алгоритми не мають прямої послідовності дій, через те, що на одному або декількох етапах необхідно провести операцію вибору, оскільки для кожного вибору існує своє продовження алгоритму. Циклічний алгоритм є ускладненою версією розгалужувального і лінійного алгоритмів, оскільки, наприклад, при невиконанні деякої умови необхідно повернутися на кілька операцій вище (в початок циклу).

В даний час всі алгоритми, які в подальшому будуть реалізовані за допомогою комп'ютерної техніки, описуються за допомогою мов програмування. При описі алгоритму на мові програмування використовуються, так звані, функції. Функція, як і сам алгоритм, виконується послідовно, що, в свою чергу, дозволяє провести деяку аналогію з описом лінійних алгоритмів, виконання яких проводиться послідовно. Мови програмування для реалізації деяких дій використовують цикли та розгалуження. Застосування послідовного виконання команд-дій, використання циклів і елементів розгалуження дозволяє зробити висновок про те, що, функція, яка описана на мові програмування, є алгоритмом представленим до цього в словесному або графічному вигляді.

Існує величезна кількість різних способів подання алгоритмів. Залежно від уявлення таких алгоритмів вони можуть використовуватися за допомогою різних засобів. В даній статті розглядаються алгоритми, реалізацію яких можна представити у вигляді програмного коду [1]. Оскільки в сучасному світі більшість підприємств, заводів та виробництв

використовують сучасну техніку, на даний момент подання алгоритмів у вигляді програмного коду є самим поширеному в світі [2]. Таке широке розподілення реалізацій призвело до того, що існує величезна кількість аналогічних алгоритмів, при цьому іноді розробникам простіше реалізувати алгоритм «з нуля» ніж шукати його реалізацію. Навіть за умови, що розробник знайшов схожий на необхідний алгоритм, дуже часто у нього не вистачає інформації для підтвердження своєї думки про цей алгоритм. Відсутність деякої стандартизації і єдиної системи з пошуку алгоритму зводиться до того що глобальна мережа все далі і далі наповнюється не завжди коректними і правильними алгоритмами [3].

Постановка задачі

Існуючі алгоритми найчастіше представлені у вигляді наборів, які представляють собою збірку алгоритмів, націлених найчастіше на вирішення задач в одній області. Такі збірки алгоритмів, наприклад, представлені у вигляді бібліотек програмних реалізацій алгоритмів, не використовують автоматизований процес наповнення таких наборів. Відсутність автоматизації наповнення таких збірок може призводити до появи копій алгоритмів, а також мати реалізацію одного і того ж самого алгоритму з різним ступенем синтаксичної наповненості. Відсутність додаткової інформації про алгоритми може призвести до того, що, коли потрібно буде обрати один алгоритм із набору схожих за призначенням алгоритмів, відсутність аргументованого вибору серед цих алгоритмів може привести до реалізації більш трудомісткого алгоритму замість менш трудомісткого, за умови того що результати застосування алгоритмів будуть однаковими.

Реалізація синтаксичного аналізатора дозволяє отримувати структуровані дані (структурувати дані), шляхом аналізу тексту/коду/даних. При застосуванні структурного аналізатора для алгоритмів або файлу, що містить набори алгоритмів у вигляді результату, можна отримати структуру алгоритму. За допомогою цієї структури даних можна виявити додаткові параметри, обчислити складність алгоритмів, а також пе-

ревірити на наявність копій серед наборів алгоритмів. Таким чином, завдання автоматичного виявлення наборів ознак в даний час є актуальним.

Мета статті - розробка методу, заснованого на синтаксичному аналізі програмної реалізації алгоритму, який дозволить виявляти ознаки алгоритмів.

Метод визначення ознак

Метод, що пропонується, включає в себе три основні блоки: аналіз вхідних алгоритмів; синтаксичний аналіз коду; виділення ознак. Перший блок є вхідним блоком до методу, та основна його задача полягає в перевірці кількості алгоритмів на вході, а також аналіз мови програмування. Другим блоком є блок синтаксичного аналізу коду; в ньому вперше використано синтаксичний аналізатор, задачею якого є представити данні алгоритму у вигляді структурної інформації. На наступному блоку, завдяки семантиці, структурні данні аналізуються та шукаються ознаки цього алгоритму. Блок-схема методу представлена на рис. 1.

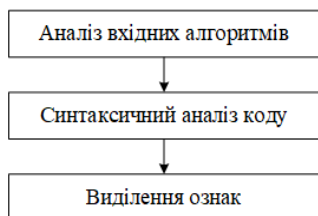


Рис. 1. Схема методу визначення ознак програмних реалізацій алгоритмів на основі синтаксичного аналізу

Нижче наведено детальний опис кожного з блоків запропонованого методу.

Аналіз вхідних алгоритмів. Програмна реалізація алгоритму є кодом, написаним на мові програмування, що реалізує поставлену задачу.

Інформація, що надходить на вхід системи аналізу алгоритмів, може представлятися у вигляді одного алгоритму або у вигляді набору алгоритмів, наприклад, у вигляді бібліотеки, яка підключається для використання функцій (алгоритмів).

Програмні реалізації алгоритмів найчастіше бувають двох типів. Перший тип представляється у вигляді, алгоритму, що не має на даний момент свого аналога або такий алгоритм, який є модифікованою (поліпшеною) версією (частиною) класичного алгоритму. Відмінною особливістю такого типу алгоритмів є те, що програмний код може мати недоліки:

- бути не оптимізованим;
- не завжди реалізовувати поставлену задачу;
- бути не алгоритмом цілком, а частковою реалізацією класичного алгоритму [4].

При цьому структурною особливістю таких алгоритмів є представлення таких алгоритмів не у вигляді готової реалізованої бібліотеки (набору функцій), а окремою версією алгоритму в єдиному екземплярі. Варто також відзначити, що, навіть за умови наявності деяких недоліків, такі реалізації, з точки

зору складності алгоритму, можуть виявитися простішими за класичні алгоритми, модифікованою (поліпшеною) версією яких вони є.

Другий тип – це алгоритми, які знаходяться в деяких базах, найчастіше представлених у вигляді готових бібліотек. Такі бібліотеки є збіркою (набором) класичних алгоритмів. Такий тип характеризується наявністю опису, також найчастіше відповідністю конкретній тематиці. Наприклад, математична бібліотека може містити алгебраїчні або геометричні реалізації функцій, а бібліотека для попередньої обробки зображень включає набір алгоритмів, за допомогою яких в залежності від вхідного зображення можна буде використовувати її різні функції.

На вхід методу можна подавати як перший тип алгоритмів, так і другий, представлений у вигляді бібліотеки. Алгоритм, що подається на вхід системи, найчастіше написаний на одній з найпопулярніших мов програмування в залежності від призначення даного алгоритму. При цьому деякі алгоритми можуть бути написані на різних мовах, хоча по суті можуть робити одні і ті ж операції. Наприклад, як згадувалося вище, однією з таких може бути бібліотека математичних функцій. Така бібліотека представлена на різних мовах програмування, оскільки математичні функції можуть використовуватися, як, наприклад, в задачах аналізу відеофайлу, так й при реалізації тих чи інших додатків. Таким чином, наступним кроком є визначення мови програмування, на якій було написано код, що реалізує цей алгоритм або набір алгоритмів.

Після визначення мови програмування, далі необхідно провести синтаксичний аналіз цього коду для виявлення ознак алгоритму. Однак, на даному етапі, за умови, що на вхід методу подавалася нова бібліотека, необхідно аналізувати кожен алгоритм окремо, що знаходиться всередині бібліотеки.

Відповідно, необхідно провести додатковий синтаксичний аналіз, заснований на пошуку ключових слів мови, на якій було написано бібліотеку. Ключові слова в мові програмування є зарезервованими словами, за допомогою яких компілятор може знайти початок і кінець функцій, змінних і т.д. Грунтуючись на роботі компілятора, за допомогою додаткового синтаксичного аналізу можна здійснити поділ бібліотеки на окремі функції (алгоритми). За умови, що на вхід методу подавалася не бібліотека, а один алгоритм, то немає необхідності проводити додатковий синтаксичний аналіз, який використовується для бібліотеки. Відповідно, на першому етапі відбувається аналіз введеної інформації. У вигляді результату додаткового синтаксичного аналізу отримуються структуровані дані алгоритмів бібліотек.

Синтаксичний аналіз коду. Синтаксичний аналізатор повинен розпізнати структуру поданого на вхід методу алгоритму, а саме синтаксичні залежності ключових слів. В результаті має бути або побудовано синтаксичне дерево, або виявлені складові. Зазвичай граматику будується так, щоб на виході будувалося синтаксичне дерево, що дозволяє виконувати

різноманітні трансформації лексичного змісту з перепогодження залежних ключових слів, а також легко виділяти семантику, зокрема – застосовувати алгоритм зважування альтернативних варіантів побудови дерева [5]. Пропозиція може допускати кілька альтернативних варіантів зв'язування ключових слів. В цьому випадку аналізатор намагається застосовувати деякі евристики і базу знань, але може в кінці повернути кілька варіантів синтаксичного дерева. До такої поведінки відноситься синтаксичний аналіз знизу, оскільки він сильно обмежений в ресурсах по припиненню експоненціального зростання числа варіантів [6]. Наявність декількох підсумкових варіантів розбору може означати не тільки недостатній набір правил у мовній моделі мов програмування, але і властиву даній пропозиції неоднозначність, яка усувається тільки з урахуванням більш широкого контексту.

Аналізовані блоки коду можуть мати різну складність, включати невідому типізацію даних або відступ від нормативного синтаксису. Щоб ефективно справлятися з різними задачами, синтаксичний аналізатор застосовує кілька різних алгоритмів, включаючи низхідний синтаксичний аналіз і синтаксичний аналіз знизу, а також він застосовує семантичний аналіз для уточнення результатів у випадку коли програмний код має недоліки, що ускладнюють читання. Низхідний синтаксичний аналіз є досить точним. Синтаксичний аналіз знизу працює досить швидко і здатний проаналізувати навіть дуже довгі блоки коду та ігнорувати незрозумілі фрагменти коду.

Низхідний синтаксичний аналіз, або аналіз через синтез, починається з припущення про структуру блоку коду, а потім уточнює і деталізує цей код, опускаючись на рівень конкретних ключових слів/змінних. Іншими словами, цей алгоритм ініціює розбір з початкового нетерміналу S – тобто усі слова в блоці коду виявляються пов'язані в єдину структуру.

Синтаксичний аналіз знизу починає розбір з конкретних ключових слів, пов'язуючи до них спочатку пари тип-змінна, потім приєднує до цих пар нові доповнення або інші пов'язані пари. Поступово процес зв'язування доходить до початкового нетерміналу S – тобто усі слова в пропозиції виявляються пов'язані в єдину структуру. З одного боку, завдання структурного синтаксичного аналізатора – визначити синтаксичну структуру алгоритму. Інакше кажучи, він розпізнає синтаксично коректні (або майже коректні) блоки коду. Результатом розпізнавання є не тільки факт визнання коректності блоків коду з точки зору синтаксису мови програмування. Синтаксичний аналізатор також видає інформацію щодо синтаксичних взаємин ключових слів/змінних і визначає деякі ознаки. З іншого боку, алгоритм розпізнавання синтаксису спроектований так, що він породжує по набору заданих правил можливі блоки і, зіставляючи їх з наявними, підтверджує одне зі своїх припущень, розуміючи синтаксис та значення коду.

Такий аналіз проводиться з метою створення структури даних на основі алгоритму, що дозволить

в подальшому використовувати отримані дані для виділення ознак даного алгоритму.

Виділення ознак. Інформація, що отримана після етапу синтаксичного аналізу програмного коду, представляється у вигляді деякої структури даних, яку необхідно обробити для виділення ознак. Виділення ознак буде відбуватися шляхом використання семантики. Семантика уявляє з себе формалізацію значень конструкцій мов програмування за допомогою побудови їх формальних математичних моделей. За допомогою семантики будуть розглядатися основні структурні елементи функцій. Такими елементами є: змінні (локальні і глобальні); цикли; розгалуження. Необхідність використання семантики, а також основне призначення даного процесу полягає в тому, що мови програмування дозволяють описувати однакові за змістом операції різними способами. Наприклад, на рис. 2 представлено дві реалізації програмного коду.

```
i=0; while(i<5){i++;}      i=0; do{i++;}while(i<=4);
```

Рис. 2. Програмні реалізації частки коду завдяки ключовому слову while та парі слів do-while

Зрозуміло, що ці два фрагменти коду виконують одне і те ж, результати їх роботи ідентичні.

Це може призводити, по-перше, до підвищення складності реалізації функції, якщо розглядати з точки зору оптимізації часу виконання алгоритмів, по-друге до появи більш складних конструкцій, які є аналогами вже існуючих функцій, наприклад, в бібліотеці. При цьому, в залежності від мови програмування на якій буде описано алгоритм, різні способи реалізації однієї і тієї ж частини коду можуть займати різний час виконання. В залежності від мови, на якій описано алгоритм, будуть застосовуватися різні семантичні підходи. Основними підходами є такі семантики: аксіоматична; денотаційна; інтерпретаційна; трансляційна; трансформаційна [7 – 9].

Реалізація семантичного підходу виглядає наступним чином (однак, в залежності від складності алгоритму, реалізація може змінюватись). Спочатку відбувається обчислення кількості послідовних дій, кількість внутрішніх процедур і умов (розгалужень).

Першим кроком на етапі виділення ознак є пошук аналогічних алгоритмів з бази або бібліотеки. Цей крок необхідний для того, щоб виявити семантичні збіги на основі яких можна буде виділити ознаки, в базі знаходиться алгоритм, який за конструкцією схожий з алгоритмом, що було подано на вхід методу. Після цього здійснюється перевірка на однотипність коду. Якщо інформація про алгоритм, який поступив на вхід метода, є досить схожою на інформацію алгоритму з бази, на основі відмінностей та схожості семантичних конструкцій робиться висновок чи необхідно додавати до групи ознак з бази ознаку отриману з нового алгоритму. Якщо знайдена ознака структурно схожа з вже наявною в базі групою з описом, то відбувається додавання цієї ознаки до знайденої групи ознак. Ознаки збираються в групи ознак.

На етапі порівняння схожого по структурі алгоритму, що знаходиться в базі та алгоритму, поданого на вхід методу, відбувається наступне. Здійснюється тотожне порівняння локальних і глобальних змінних, порівняння операторів розгалуження, циклів на основі семантичного підходу, що, в свою чергу, дозволяє визначити чи є поданий на вхід методу алгоритм (для початку) аналогом алгоритму з бази, за умови, що кількість послідовних дій, циклів і розгалужень є ідентичною, але при цьому локальні змінні та/або глобальні змінні не відповідають один одному то відбувається порівняння типів даних цих змінних. За умови, якщо, наприклад, в функцію передається значення з плаваючою комою, а в іншу функцію передається цілочисельні значення, а не значення, що може приймати лише «true» або «false», то можна зробити висновок про те, що перша функція є модифікованою/покращеною версією другої функції. Такий аналіз функції дозволяє не тільки порівнювати функції, а також перетворювати часто повторювані елементи функцій до деяких блоків даних, на основі яких можна робити модифікації існуючих функцій, замінюючи складні блоки коду простішими еквівалентами, які виконують ті ж самі дії. Такі блоки кодів, залежно від їх складності, можуть бути показником або відмінною рисою функцій/алгоритмів, які, у свою чергу, є відмінною рисою алгоритму, який можна виділити.

Висновки

Запропоновано метод, який дозволяє виявляти ознаки програмних реалізацій алгоритмів. Виявлення ознак програмної реалізації алгоритмів в значній мірі дозволяє автоматизувати процес створення баз алгоритмів. В даний час такий процес не є повністю автоматизованим, що призводить до того, що алгоритми, які використовуються для реалізації завдань можуть бути некоректними або час, витрачений на створення такого нового алгоритму є виправданим. Автоматичний процес виявлення ознак з алгоритму в майбутньому може дозволити реалізувати концепцію автоматичного підбору алгоритмів під конкретну задачу, що дозволить скоротити час, витрачений на

реалізацію таких алгоритмів до мінімуму. А застосування синтаксичного аналізу може дозволити знаходити аналогічні алгоритми, що в перспективі дозволить позбутися некоректних копій алгоритмів.

Напрямки подальших досліджень буде направлено на модернізацію даного методу з метою можливості додавання класифікації алгоритмів на основі розуміння ознаки самого алгоритму і групи ознак, що мають спільні характерні особливості. Така класифікація у вигляді наявності стандартизованих і згрупованих алгоритмів дозволить підбирати оптимальні алгоритми на основі існуючих даних для певних завдань.

Список літератури

1. A. Sharif Razavian, H. Azizpour, J. Sullivan, and S. Carlsson, "Cnn features off-the-shelf: an astounding baseline for recognition," in *Proc. of the IEEE Conf. on Comp. Vision and Pattern Recognition Workshops*, 2014, pp. 806–813
2. Альфред В. Ахо, *Теорія синтаксического аналізу, переклада і компіляції*. Т. 2, 2012, 487 с.
3. Томас Х. Кормен, Чарльз И. Лейзерсон, Рональд Л. Ривест, Клиффорд Штайн, *Алгоритмы. Построение и анализ*, Книга по требованию, 2016, стр 1328
4. A. Kumar and so on "Ask me anything: Dynamic memory networks for natural language processing," *CoRR*, abs/1506.07285, 2015
5. Джеесси Рассел, *Синтаксический анализ*, Книга по требованию, 2013, 250 с.
6. K. Cho, B. Van Merriënboer, C. Gulcehre, D. Bahdanau, F. Bougares, H. Schwenk, and Y. Bengio, "Learning phrase representations using rnn encoder-decoder for statistical machine translation," *arXiv preprint arXiv:1406.1078*, 2014.
7. J. Pennington, R. Socher, and C. D. Manning, "Glove: Global vectors for word representation." in *EMNLP*, vol. 14, 2014, pp. 1532–1543.
8. M. Denil, A. Demiraj, N. Kalchbrenner, P. Blunsom, and N. de Freitas, "Modelling, visualizing and summarising documents with a single convolutional neural network," *26th Int. Conf. on Computational Linguistics*, pp. 1601–1612, 2014
9. P. D. Turney and P. Pantel, "From frequency to meaning: Vector space models of semantics," *Journal of artificial intelligence research*, vol. 37, pp. 141–188, 2010

Надійшла до редколегії 22.02.2017

Рецензент: д-р техн. наук, доц. М.А. Павленко, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ПРОГРАММНЫХ РЕАЛИЗАЦИИ АЛГОРИТМОВ НА ОСНОВЕ СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

А.С. Свиридов

Рассмотрены существующие подходы и методы выявления признаков. Предложено использование синтаксического анализа в паре с семантикой. Проведен анализ особенностей, возникающих при объединении алгоритмов, описана возможность принадлежности алгоритмов различных групп и назначений. Предложенный метод позволяет определять признаки программной реализации алгоритмов. Использование полученных признаков позволяет группировать схожие по признакам алгоритмы.

Ключевые слова: метод, признак, синтаксический анализатор, семантика, программный код.

METHOD OF SYMBOLS DETERMINING BY PARSER FOR SOFTWARE-BASED ALGORITHMS

A.S. Svyrydov

Existing approaches and methods of detecting signs are considered. The use of syntactic analysis in conjunction with semantics is proposed. The analysis of the features that arise when combining algorithms is carried out, the possibility of belonging to the algorithms of different groups and appointments is described. The proposed method allows to determine the signs of program algorithms realization. The use of the obtained features allows grouping similar algorithms.

Keywords: method, sign, parser, semantics, program code.

І.А. Хижняк¹, О.М. Маковейчук², Р.Г. Худов³, В.О. Подліпаєв⁴, Г.В. Горбань⁵, Г.В. Худов¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

² Національний університет «Львівська політехніка», Львів

³ Харківський національний університет імені В.Каразіна, Харків

⁴ Військова частина А0515, Київ

⁵ Північно-Східне територіальне управління внутрішнього аудиту, Чернігів

МЕТОД РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ (ШТУЧНОЇ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ (АВС)) ТЕМАТИЧНОГО СЕГМЕНТУВАННЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО ЗОБРАЖЕННЯ

Проведено аналіз недоліків відомих методів сегментування оптико-електронного зображення. Запропоновано для тематичного сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, використання ройового методу (методу штучної бджолиної колонії). Проаналізовані основні види фітнес-функцій, що використовуються при АВС методі, та встановлена їх непридатність до тематичного сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження. Введена фітнес-функція, що враховує внутрішні дисперсії розподілу яскравості тематичних сегментів оптико-електронного зображення, сформульована оптимізаційна задача, що полягає в мінімізації фітнес-функції. Оптимізаційна задача вирішується методом ітераційних розрахунків. Наведено результат тематичного сегментування оптико-електронного зображення для випадку двох тематичних сегментів, на якому виділені можливі об'єкти інтересу – літаки, сховища з нафтою, споруди та інші.

Ключові слова: оптико-електронне зображення, тематичне сегментування, метод ройового інтелекту, АВС метод, бортова система, фітнес-функція.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. У сучасних війнах високих технологій центр бойових дій перемістився у повітряний простір, а забезпечення бойових дій – у космічний простір [1, 2]. Використання інформації бортових систем розвідки і спостереження значною мірою дозволяє підвищити рівень оперативності та достовірності оцінки обстановки в реальному масштабі часу та ефективно застосовувати війська (сили) в цілому [3, 4].

Результат обробки та дешифрування оптико-електронних зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження, залежить від якості сегментування зображення [5, 6].

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Відомим методам сегментування оптико-електронних зображень притаманні такі основні недоліки [7, 8]:

– більшість методів не визначають границь об'єктів та не проводять сегментування, а лише підкреслюють границі об'єктів;

– проведення сегментування лише по критерію рівня яскравості точки зображення, що не дає можливості визначати критерії гомогенності сегментів.

Для вирішення різних завдань, що виникають при обробці зображень, в тому числі і для сегментування зображень, використовуються генетичні методи, наприклад [9, 10]. Генетичні методи застосовуються для вирішення оптимізаційних завдань комбінаторики, біоінформатики, теорії ігор, обробки і розпізнавання образів. З використанням генетич-

них методів ефективно проводиться сегментування медичних зображень [10].

Для вирішення завдання сегментування оптико-електронних зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження можуть бути використані ройові методи [11–13], до яких відносяться: метод рою частинок, мурашиний метод, метод штучної бджолиної колонії (АВС (artificial bee colony)), штучна імунна система, метод капель води, метод зозулі, метод альтруїзму, метод гравітаційного пошуку. Ройові методи показали свою спроможність щодо сегментування оптико-електронних зображень при рішенні NP-повних комбінаторних задач у порівнянні з генетичними методами [13]. Порівняльна таблиця ройових методів (мурашиного та АВС методу) наведена в табл. 1 [12]. Сегментування оптико-електронного зображення, що отримано з бортової системи спостереження мурашиним методом розглянуто в роботах [6, 14]. В [6, 14] викладена сутність простішого мурашиного методу сегментування оптико-електронного зображення, проведено удосконалення простішого мурашиного методу сегментування зображення, проведена перевірка працездатності простішого та удосконаленого мурашиних методів сегментування на контрольному прикладі, проведені експериментальні дослідження щодо сегментування мурашиним методом зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, проведена оцінка якості сегментування оптико-електронного зображення шляхом оцінки комплексних показників та відстані Кульбака-Лейбнера.

Таблиця 1

Порівняльна таблиця мурашиного методу та ABC-методу

Параметр порівняння	Мурашиний метод	Метод штучної бджолоїної колонії
Переваги	– ефективний для TSP (Traveling Salesman Problem) з невеликою кількістю вузлів; – використовується у додатках, що можуть адаптуватися до змін; – завдяки пам'яті всієї колонії та випадковому вибору шляху не залежить від невдалих початкових рішень.	– можливість ефективного розділення на паралельні процеси; – висока швидкість роботи.
Використання	– розрахунки комп'ютерних та телекомунікаційних систем; – задачі комівояжера; – задачі розкраски графа; – задачі оптимізації мережевого трафіку.	– оптимізація управління; – оптимізація класифікаторів.
Розвиток	– гібридизація з генетичними методами; – використання бази нечітких правил.	– зниження залежності від встановлених параметрів; – об'єднання з генетичними методами.

У відомих роботах [15–17], де використовується ABC метод, у якості фітнес-функції найчастіше використовуються наступні функції.

1. Функція сфери:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2, \quad (1)$$

де x_i – координати пікселів на зображенні; n - мірність простору.

Глобальний та єдиний мінімум функції сфери $f(x) = 0$ розташований у точці $x_i = 0$ для $i = (1..n)$. Вигляд функції сфери для $n = 1$ наведений на рис. 1. Вигляд функції сфери та лінії рівня для $n = 2$ показані на рис. 2.

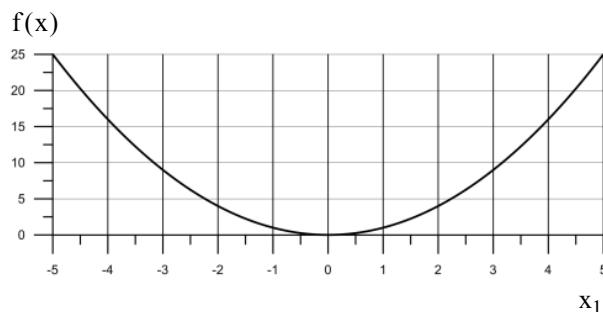
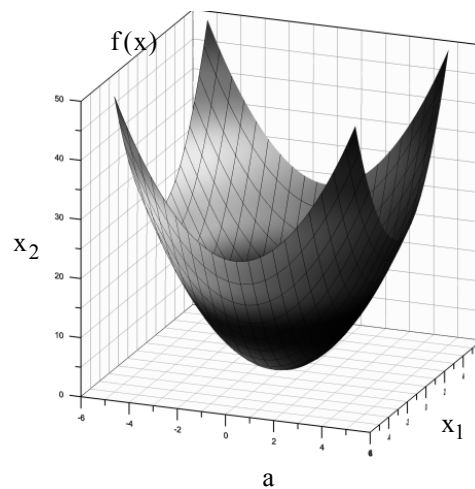


Рис. 1. Вигляд функції сфери для $n = 1$

2. Функція Расстригіна (вираз (2)):

$$f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)]. \quad (2)$$

Мінімум функції Расстригіна $f(x) = 0$ розташований на інтервалі $(5,12 \leq x_i \leq 5,12)$ для $i = (1..n)$.

Вигляд функції Расстригіна для $n = 1$ наведений на рис. 3. Вигляд функції Расстригіна та лінії рівня для $n = 2$ показані на рис. 4.

3. Функція Швевфеля (вираз (3)):

$$f(x) = \sum_{i=1}^n [-x_i \sin(\sqrt{|x_i|})]. \quad (3)$$

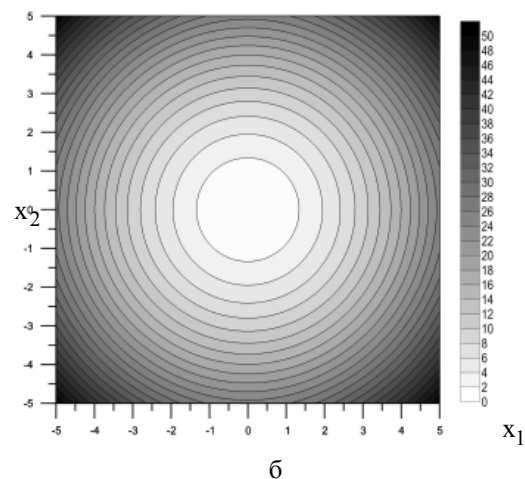


Рис. 2. Вигляд функції сфери (а) та лінії рівня (б) для $n = 2$

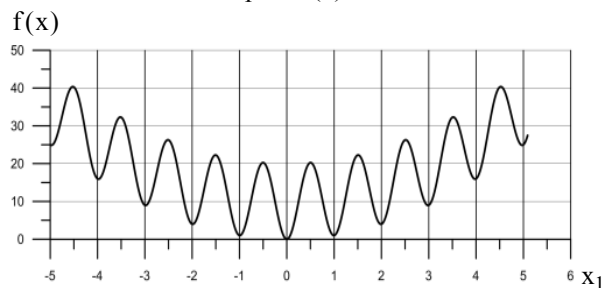


Рис. 3. Вигляд функції Расстригіна для $n = 1$

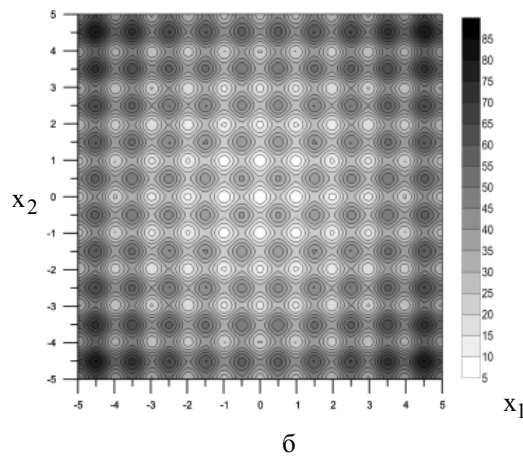
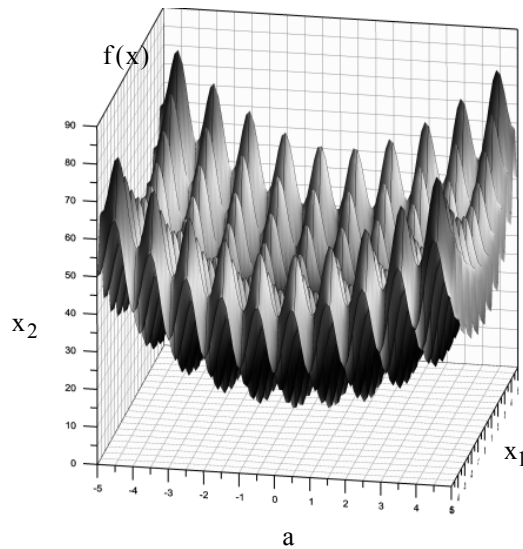


Рис. 4. Вигляд функції Расстригіна (а) та лінії рівня (б) для $n = 2$

Мінімум функції Швевфеля $f(x) = -418,9829n$ розташований на інтервалі $(500 \leq x_i \leq 500)$ для $i = (1..n)$. Вигляд функції Швевфеля для $n=1$ наведений на рис. 5.

Вигляд функції Швевфеля та лінії рівня для $n = 2$ показані на рис. 6.

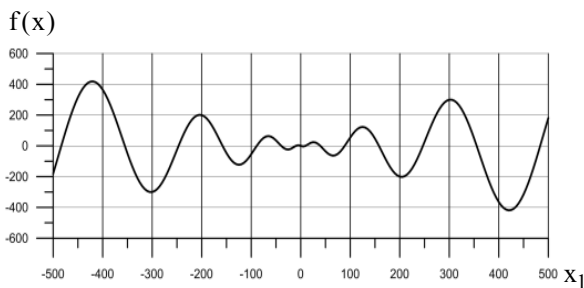


Рис. 5. Вигляд функції Швевфеля для $n = 1$

Наведені вище фітнес-функції не враховують особливості формування зображення, що отримано з бортових систем оптико-електронного спостереження, та не можуть бути використані при тематичному сегментуванні таких зображень.

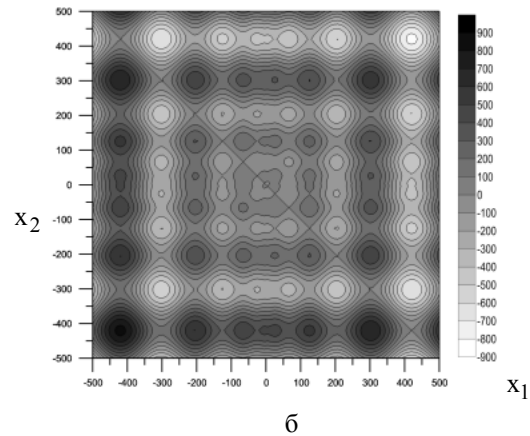
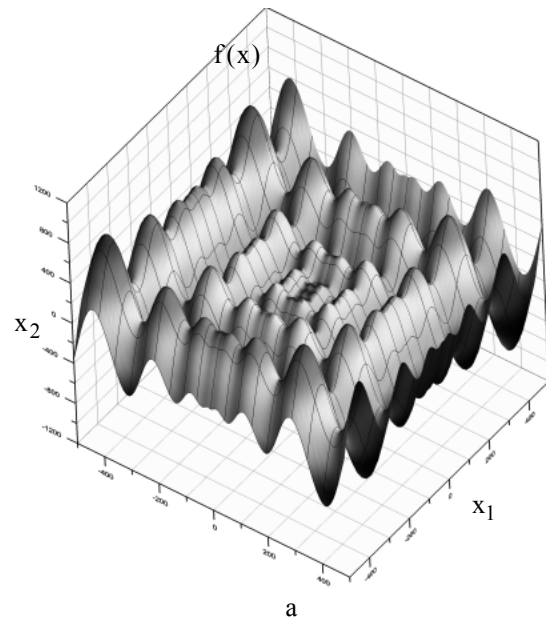


Рис. 6. Вигляд функції Швевфеля (а) та лінії рівня (б) для $n = 2$

Мета статті – розробити метод ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії (АВС)) тематичного сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

У якості вихідного будемо розглядати зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження (рис. 7 [18]).

Зображення представлено в RGB моделі кольорового простору. Побудуємо гістограми розподілу яскравості по кожному каналу яскравості. Такі гістограми наведені на рис. 8–10 і представляють залежність яскравості U від кількості пікселів N для каналів R, G, B відповідно.

З аналізу наведені на рис. 7–9 гістограм видно, що є певні проблеми з вибором порога тематичного сегментування зображення (рис. 7). Тому у якості фітнес-функції будемо використовувати таку функцію:

$$f(x) = 1 / \sum_{j=1}^K D_j, \quad (4)$$



Рис. 7. Вихідне зображення [18]

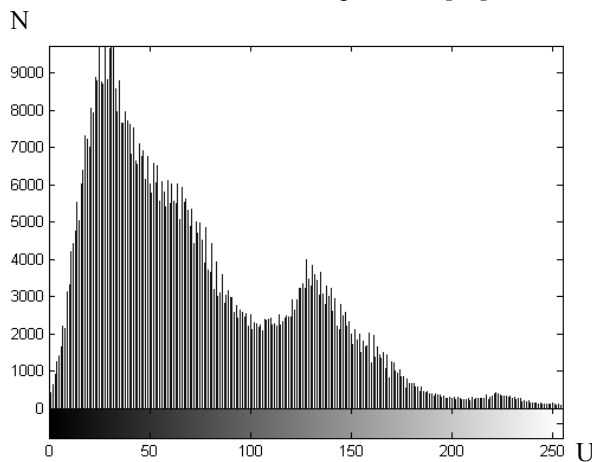


Рис. 7. Гістограма розподілу яскравості для каналу Red

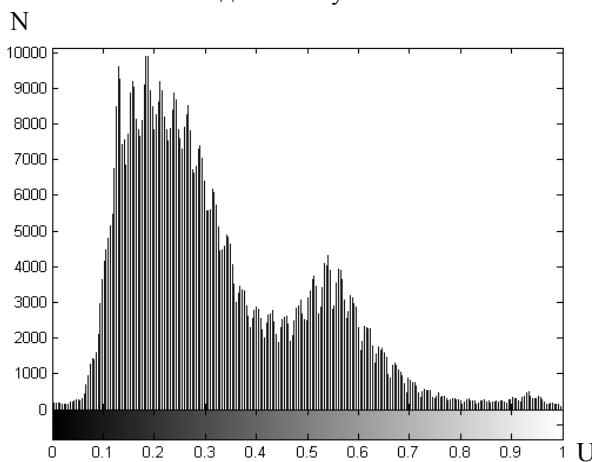


Рис. 8. Гістограма розподілу яскравості для каналу Green

де K – кількість тематичних сегментів на зображенні; D_j – внутрішня дисперсія j -го тематичного сегменту, що розраховується як

$$D_j = \frac{1}{N_j - 1} \sum_{i=1}^{N_j} |U_i - \bar{U}_j|^2, \quad (5)$$

де U_i – яскравість i -го пікселя; N_j – кількість пікселів в j -му тематичному сегменті; \bar{U}_j – математич-

не сподівання яскравості пікселів в j -му тематичному сегменті:

$$\bar{U}_j = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} U_i. \quad (6)$$

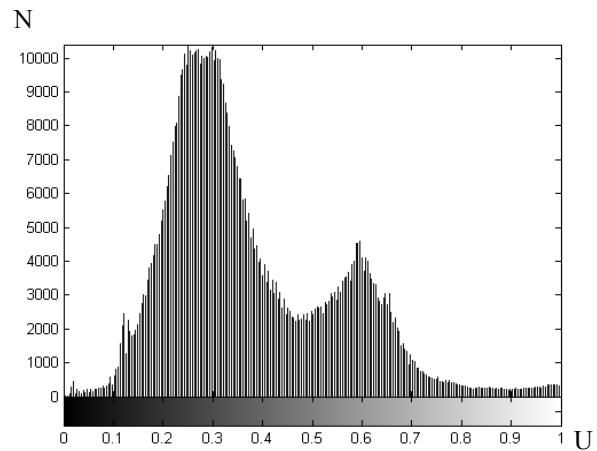


Рис. 9. Гістограма розподілу яскравості для каналу Blue

Таким чином, оптимізаційна задача тематичного сегментування оптико-електронного зображення АВС методом полягає у мінімізації фітнес-функції (4). Задача вирішується методом ітераційних розрахунків за методикою, що викладена в роботах [13, 19]. Розрахунки проводилися з використанням мови програмування високого рівня та інтерактивного середовища для програмування, чисельних розрахунків та візуалізації результатів MATLAB R2017b. Приклади ітераційного процесу на ітераційних етапах наведені на рис. 10–13. На рис. 10–13 показано розташування локальних та глобального мінімумів фітнес-функції (4). Результат тематичного сегментування вихідного зображення (рис. 7) для випадку двох тематичних сегментів наведений на рис. 14.

З аналізу результатів сегментування (рис. 14) шляхом візуальної оцінки якості видно, що вдалося провести тематичне сегментування зображення, що отримане з бортової системи оптико-електронного спостереження.

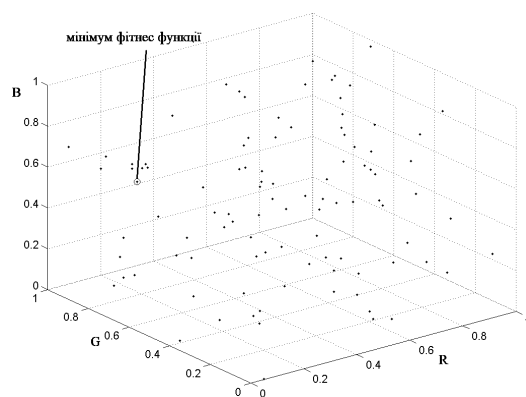


Рис. 10. Ітераційний процес АВС методу на першому ітераційному етапі

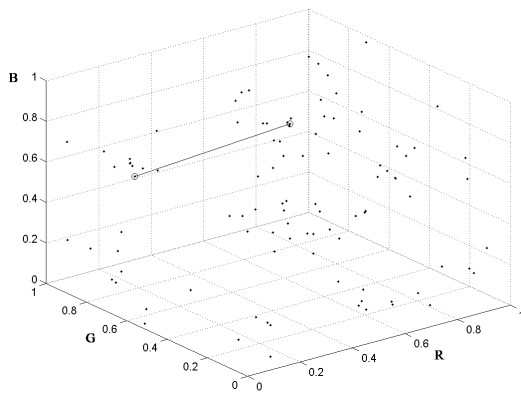


Рис. 11. Ітераційний процес ABC методу на п'ятому ітераційному етапі

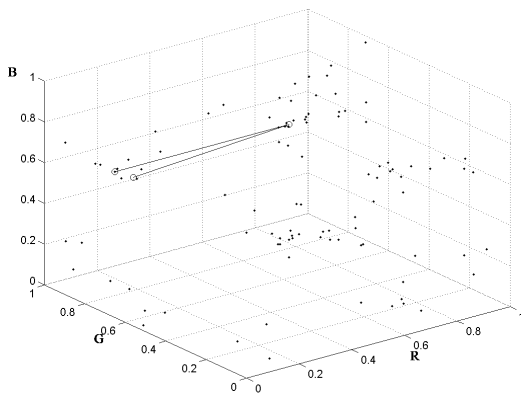


Рис. 12. Ітераційний процес ABC методу на десятому ітераційному етапі

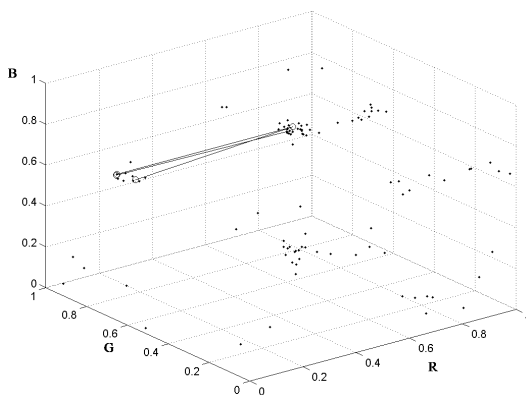


Рис. 13. Ітераційний процес ABC методу на двадцятому ітераційному етапі

На зображенні (рис. 14) виділені можливі об'єкти інтересу – літаки, сховища з нафтою, споруди та інші.

Висновки і напрями подальших досліджень

Таким чином, в роботі:

- проаналізовано основні недоліки відомих методів сегментування оптико-електронного зображення;
- для тематичного сегментування оптико-електронного зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, запропоновано використання ройового методу (методу штучної бджолиної колонії);

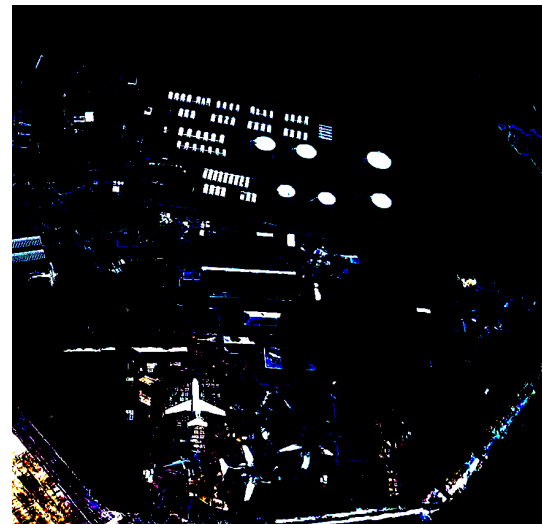


Рис. 14. Результат тематичного сегментування вихідного зображення (рис. 7) для випадку двох тематичних сегментів ABC методом

– проаналізовані основні види фітнес-функцій, що використовуються при ABC методі, та встановлена їх непридатність до тематичного сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження;

– введена фітнес-функція, що враховує внутрішні дисперсії розподілу яскравості тематичних сегментів оптико-електронного зображення;

– сформульована оптимізаційна задача, що полягає в мінімізації фітнес-функції. Оптимізаційна задача вирішується методом ітераційних розрахунків;

– наведено результат тематичного сегментування оптико-електронного зображення для випадку двох тематичних сегментів, на якому виділені можливі об'єкти інтересу – літаки, сховища з нафтою, споруди та інші.

Напрямок подальших досліджень є порівняння результатів тематичного сегментування оптико-електронного зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, ABC методом з іншими відомими методами тематичного сегментування.

Список літератури

1. Горбулін В.П. Світова гібридна війна: український фронт: монографія / В.П. Горбулін. – Київ: НІСД, 2017. – 496 с.
2. Ярош С.П. Аналіз ведення бойових дій, тактики застосування ЗПН і використання нових інформаційних технологій у ході воєнного конфлікту в Лівії в 2011 році / С.П. Ярош // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2011. – № 2. – С. 19–25.
3. Меньшаков Ю.К. Техническая разведка из космоса / Ю.К. Меньшаков. – Москва: Academia, 2013. – 656 с.
4. Ким Н.В. Алгоритм управления группой беспилотных летательных аппаратов / Н.В. Ким, И.Г. Крылов // Робототехника и техническая кибернетика, 2014. – № 4. – С. 40–43.
5. Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-

електронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77–80.

6. Ruban I. Segmentation of the images obtained from onboard optoelectronic surveillance systems by the evolutionary method / I. Ruban, H. Khudov, V. Khudov, I. Khizhnyak, O. Makoveichuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2017. – № 5/9 (89). – P. 49–57.

7. Farooque M.Y. Latest trends on image segmentation schemes / M.Y. Farooque, M.S. Raean // International journal of advanced research in computer science and software engineering, 2014. – Vol. 4, № 10. – P. 792–795.

8. Choudhary R. Recent trends and techniques in image enhancement using differential evolution – a survey / R. Choudhary, R. Gupta // International journal of advanced research in computer science and software engineering. – 2017, Vol. 7, № 4. – P. 106–112.

9. Badiger S. Medical imaging techniques in clinical medicine / S. Badiger, P.T. Akkasaligar // International journal of medical, health, pharmaceutical and biomedical engineering, 2014. – Vol. 8, № 11. – P. 797–800.

10. Махно Т.А. Автоматизированная система обработки ультразвуковых изображений сонных артерий на основе эволюционных алгоритмов / Т.А.Махно // Электротехнические и компьютерные системы, 2015. – № 18(94). – С. 92–99.

11. Эль-Хатиб С.А. Сегментация изображений с помощью смешанного и экспоненциального роя частиц / С.А. Эль-Хатиб // Информатика и кибернетика, 2015. – № 1. – С. 126–133.

12. Водолазский И.А. Роевой интеллект и его наиболее распространенные методы реализации / И.А. Водолазский, А.С. Егоров, А.В. Краснов // Молодой ученый, 2017. – № 4 (138). – С. 147–153.

13. Хижняк І.А. Тематичне сегментування зашумленого оптико-електронного зображення ройовим методом /

І.А. Хижняк, О.М. Маковейчук, В.Г. Худов, І.В. Рубан, Г.В. Худов // Системи управління, навігації та зв'язку, 2018 – Вип. 1 (47). – С. 146–152.

14. Худов В.Г. Оцінка якості сегментування оптико-електронного зображення шляхом оцінки комплексних показників та відстані Кульбака-Лейбнера / В.Г. Худов, О.М. Маковейчук, І.А. Хижняк // Системи обробки інформації, 2017. – Вип. 4 (150). – С. 27–30.

15. Kennedy J. Particle Swarm Optimization / J. Kennedy, R. Eberhart // Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995. – Vol. IV. – P. 1942–1948.

16. Yigitbasi E.D. Edge detection using artificial bee colony algorithm (ABC) / E.D. Yigitbasi, N.A. Baykan // International Journal of Information and Electronics Engineering, 2013. – Vol. 3. – № 6. – P. 634–638.

17. Kong X. An improved artificial bee colony algorithm and its application / X. Kong, S. Liu, Z. Wang // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition, 2013. – Vol. 6. – № 6. – P. 259–274.

18. IKONOS Satellite Images Gallery, Satellite Map [Electronic resource] / Satellite Imaging Corporation. – Access mode: URL: <http://www.satimagingcorp.com/gallery/ikonos> – 20.01.2017 year.

19. Хижняк І.А. Сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, ройовим методом / І.А. Хижняк // Системи озброєння та військова техніка. Науковий журнал, 2017. – № 2 (50). – С. 140–143.

Надійшла до редколегії 31.03.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Морозов, Національна академія Національної гвардії України, Харків.

МЕТОД РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА (ИСКУССТВЕННОЙ ПЧЕЛИНОЙ КОЛОНИИ (АВС)) ТЕМАТИЧЕСКОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

І.А. Хижняк, А.Н. Маковейчук, Р.Г. Худов, Г.В. Худов, В.А. Подліпаєв, Г.В. Горбань

Проведен анализ недостатков известных методов сегментации оптико-электронного изображения. Предложено для тематической сегментации изображения, полученного с бортовой аппаратуры оптико-электронного наблюдения, использование роевого метода (метода искусственной пчелиной колонии). Проанализированы основные виды фитнес-функций, которые используются при АВС методе, та установлена их непригодность к тематической сегментации изображения, полученного с бортовой аппаратуры оптико-электронного наблюдения. Введена фитнес-функция, которая учитывает дисперсии распределения яркости тематических сегментов оптико-электронного изображения, сформулирована оптимизационная задача, которая состоит в минимизации фитнес-функции. Оптимизационная задача решается методом итерационных расчетов. Приведен результат тематической сегментации оптико-электронного изображения для случая двух тематических сегментов, на котором выделены возможные объекты интереса – самолеты, хранилища с нефтью, сооружения и другие.

Ключевые слова: оптико-электронное изображение, тематическая сегментация, метод роевого интеллекта, АВС метод, бортовая система, фитнес-функция.

METHOD OF ROUTINE INTELLIGENCE (ARTIFICIAL BEE COLONY (ABC)) OF THE THEMATIC SEGMENTATION OF THE OPTICAL-ELECTRONIC IMAGE

I.A. Khizhnyak, A.N. Makoveychuk, R.G. Khudov, H.V. Khudov, V.A. Podlipaev, H.V. Horban

An analysis is made of the shortcomings of the known methods for segmentation of an optical-oelectronic image. It was proposed for the thematic segmentation of the image, obtained from on-board optical-electronic observation equipment, the use of the swarm method (artificial bee colony method). The main types of fitness functions that are used in the ABC method are analyzed. Their inappropriateness to the thematic segmentation of the image obtained from on-board optical-electronic surveillance equipment was established. A fitness function has been introduced that takes into account the dispersion of the brightness distribution of the thematic segments of the optical-electronic image. The optimization problem is formulated. The optimization problem consists in minimizing the fitness function. The optimization problem is solved by the iterative calculation method. The result of thematic segmentation of the optical-electronic image is presented for the case of two thematic segments. The possible objects of interest are identified - airplanes, oil tanks, structures and others.

Keywords: optic-electronic image, thematic segmentation, , method of swarm intelligence, ABC method, on-board system, fitness function.

С.І. Шматков, Н.Г. Кучук, В.В. Донець

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків

МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ ГІПЕРКОНВЕРГЕНТНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ЕЛЕКТРОННИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ УНІВЕРСИТЕТСЬКОЇ E-LEARNING

В статті наведено результати розробки математичної моделі інформаційної структури гіперконвергентної системи підтримки електронних обчислювальних ресурсів університетської e-learning. Модель враховує особливості університетської e-learning, дозволяє встановити інформаційні взаємозв'язки між складовими системи та провести аналіз гіперконвергентної базової мережі. На базі розробленої моделі можна провести моделювання процесу функціонування e-learning, результатами якого повинні стати чисельні значення пропускну здатності мережі: навантаження на канали зв'язку і структуроутворююче обладнання, інтенсивності потоків даних і запитів, що надходять на вузли мережі.

Ключові слова: e-learning, гіперконвергентність, електронні обчислювальні ресурси.

Вступ

У сучасному інформаційному світі з'являються нові освітні орієнтири: персоналізація освіти, інтеграція педагогічних та інформаційних технологій, перехід до відкритого змісту освіти в зв'язку з розвитком Інтернет-технологій та мережевих ресурсів. Ці орієнтири забезпечуються втіленням концепції e-learning, котра припускає широкий набір застосунків і процесів, що забезпечують навчання, побудоване на використанні web-технологій, та включає в себе доставку навчального контенту засобами віддаленого або локального зв'язку.

Базою e-learning є електронні освітні ресурси (ЕОР). Під ЕОР в загальному випадку розуміють сукупність засобів програмного, інформаційного, технічного та організаційного забезпечення, електронних видань, що розміщуються на електронних носіях. ЕОР складаються з великої кількості допоміжних програм, різноманітних інформаційних блоків, що містять інформацію про студентів, викладачів і матеріали, котрі необхідні для навчання [1, 2].

Створення, розвиток та подальша експлуатація університетських ЕОР вимагає вкладення коштів, в повному обсязі непідйомих для більшості університетів України. Тому при створенні ЕОР увага приділяється платформі, що дозволила хоча б частково скоротити витрати.

В даний час на ринку IT-технологій розподілені хмарні платформи поступово витісняються конвергентними і гіперконвергентними [3]. Інфраструктура, створювана на конвергентній платформі, передбачає об'єднання пам'яті, обчислювальних і мережевих ресурсів в пул, заздалегідь сконфігурованих для роботи в дата-центрі [4], а при гіперконвергентній інфраструктурі обчислювальні потужності, сховища, сервери, мережі об'єднуються в одне ціле за допомогою програмних засобів, а управління ними

відбувається через загальну консоль адміністрування [8]. При гіперконвергентній інфраструктурі для управління ЕОР часом досить одного системного адміністратора. Це істотно знижує витрати на обслуговування системи. Тому дана платформа є кращою для університетського e-learning.

Структура гіперконвергентної базової мережі (ГБМ) підтримки e-learning є основним фактором, що впливає на якість обміну даними між застосунками системи, і, відповідно, на якість виконання запитів системи. Тому аналіз структури є необхідною умовою при виборі варіантів побудови ГБМ та управління нею [5]. Основною метою аналізу структури є визначення параметрів потоків даних, що проходять по каналах зв'язку мережі і надходять на вузли мережі. Ці дані дають можливість оцінити завантаження каналів зв'язку і обладнання мережі. Однак, потоки даних формуються завданнями e-learning, котрі використовують застосунки, які запускаються на вузлах мережі і обмінюються між собою даними. Отже, для аналізу мережі необхідно відомості про структуру доповнити відомостями про транзакції та застосунки e-learning, їх взаємодії і розміщення на вузлах ГБМ [6], що, відповідно, потребує розробки відповідної математичної моделі.

Отже, **метою даної статі** є розроблення моделі функціонування системи e-learning на гіперконвергентній основі, котра врахує її особливості, дозволить встановити інформаційні взаємозв'язки між складовими системи та провести аналіз гіперконвергентної базової мережі.

1. Обґрунтування необхідності моделювання інформаційної структури

Основні проблеми, що виникають при аналізі структури ГБМ: відсутній єдиний підхід до формування структури; є явна залежність характеристик

структури мережі від параметрів ЕОР; відсутні відпрацьовані математичні методи формального опису структури мережі, які можна використовувати при проведенні розрахунків [2]. Все це вимагає розробки загальних принципів аналізу структури мережі, інваріантних щодо технології створення ГБМ. Досить часто для розрахунку параметрів потоків даних, а також завантаження вузлів обчислювальної мережі, застосовують математичні моделі у вигляді мереж масового обслуговування (ММО) [4]. Однак, застосування для аналізу ГБМ пов'язано з такими особливостями [4]: при використанні ММО потрібно розрізняти потоки запитів і потоки даних; завантаження кожного каналу зв'язку мережі визначається інтенсивністю потоків даних всіх типів, що передаються по каналу, а не тільки потоком запитів; застосунок під час виконання може багаторазово обмінюватися даними з іншими застосунками, розміщеними на інших вузлах мережі, що різко ускладнює процес аналізу; по каналах зв'язку і через вузли мережі можуть передаватися транзитні потоки даних; багато результатів аналізу ММО, таких, наприклад, як затримки в запитів в чергах на обслуговування, не завжди потрібні адміністратору мережі, а їх обчислення пов'язане зі значними витратами ресурсів і часу. Наявність зазначених особливостей роботи мережі часто призводить до необхідності нехтувати деякими з них при використанні ММО в якості моделей, що призводить до втрати точності результатів моделювання [4]. Отже, основні принципи аналізу структури ГБМ полягають в такому:

- головною метою аналізу є дослідження потоків даних в мережі, що є основними факторами, що впливають на всі її характеристики;

- основою аналізу і формування структури мережі є виконувани і взаємодіючі застосунки;

- при аналізі необхідно узгоджувати вимоги до роботи застосунків з можливостями мережевого обладнання.

У зв'язку з цим доцільно застосувати підхід до аналізу структури ГБМ, заснований на дослідженні взаємодії застосунків як незалежних джерел і приймачів даних в мережі. В цьому випадку, можливо визначити параметри потоків даних між застосунками при виконанні всього комплексу завдань, тобто побудувати інформаційну модель системи, а потім, в залежності від розміщення додатків по вузлах мережі, визначити параметри потоків даних між вузлами мережі, тобто побудувати технічну модель мережі. При цьому повністю враховуються всі взаємодії між застосунками. Крім того, перевагою такого підходу є можливість проведення аналізу складних мережевих структур шляхом декомпозиції на підмережі. Для аналізу структури і розрахунку характеристик ГБМ необхідно визначити правила її опису, що дозволяють будувати моделі для розра-

хунку завантаження обладнання вузлів і каналів зв'язку мережі. Оскільки мережа створюється для підтримки інформаційного забезпечення e-learning то основними факторами, що впливають на рішення, що приймаються при створенні мережі, є прикладні завдання ЕОР, які вирішуються в мережевому середовищі. Тому для побудови мережі необхідно знати інформаційну структуру мережі, яка визначає інформаційні потоки між вузлами, на яких встановлено програмне забезпечення e-learning. Під інформаційною структурою мережі будемо розуміти сукупність інформаційних ресурсів системи (джерела і приймачі інформації), розміщених на вузлах мережі, і інформаційні потоки між вузлами, що виникають при транзакціях ЕОР. Маючи дані про інформаційну структуру мережі можна приймати рішення про організацію каналів зв'язку між вузлами мережі, визначати необхідні параметри каналів зв'язку і мережевого устаткування, тобто формувати її технічну структуру.

Таким чином, для повноцінного аналізу структури ГБМ необхідно провести аналіз складових її інформаційної та технічної структур і зв'язати результати аналізу. Це обумовлено тим, що інформаційна структура визначає структуру і параметри потоків даних між застосунками, ініційованими транзакціями ЕОР, а технічна структура, використовуючи результати аналізу інформаційної структури, визначає конкретні маршрути передачі даних і характеристики мережі, способи реалізації вузлів інформаційної структури і створення мережевих вузлів для формування технічної структури.

Моделювання інформаційних взаємозв'язків

Узагальнена схема основних інформаційних взаємозв'язків у середовищі e-learning наведена на рис. 1.

Основним управляючим вузлом, що відповідає за координацію всіх задач, є гіпервізор ГБМ. Він приймає транзакції користувачів системи та запускає відповідні системні та користувацькі застосунки. В свою чергу застосунки умовно можна поділити на 2 групи: ті, що працюють безпосередньо з інформаційними вузлами системи (група ZA) та ті, що безпосередньо здійснюють обмін з розподіленим сховищем даних (група ZB).

Зазначимо основні множини, котрі будуть задіяні в процесі моделювання інформаційних взаємозв'язків у середовищі e-learning: M_U – множина користувачів e-learning, $\dim M_U = U$; M_N – множина вузлів ГБМ, $\dim M_N = N$; M_A – множина застосунків e-learning, $\dim M_A = A$; M_E – множина транзакцій b e-learning, $\dim M_E = E$; M_D – множина фрагментів сховища даних, $\dim M_D = D$.

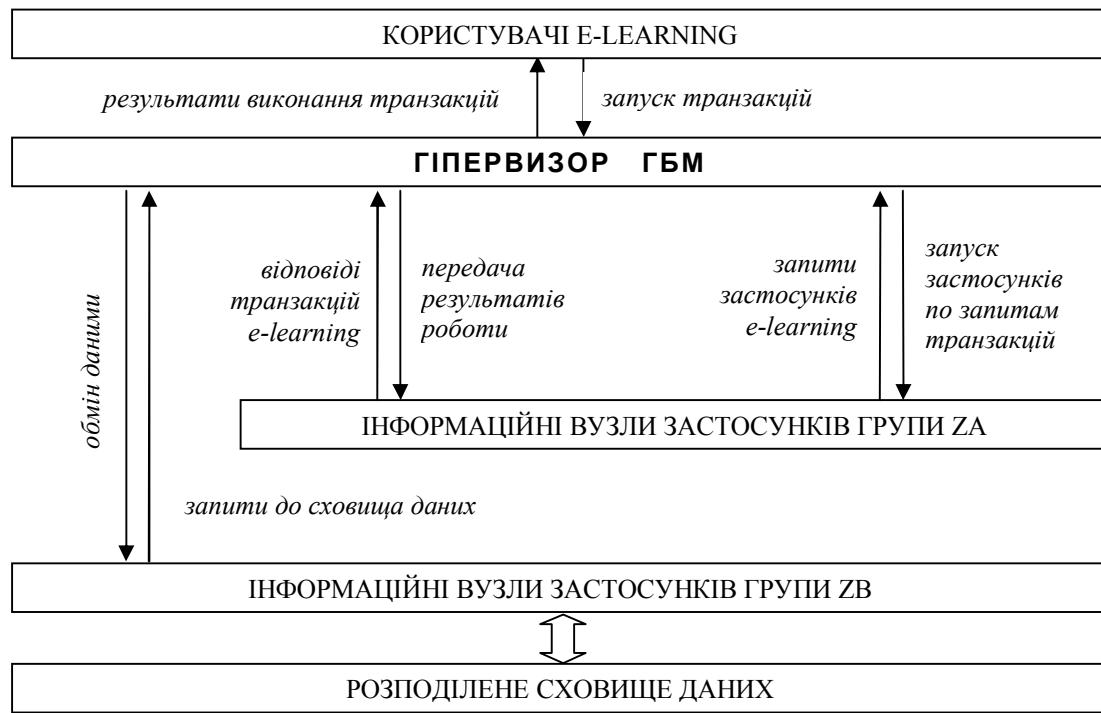


Рис. 1. Узагальнена схема основних інформаційних взаємозв'язків у середовищі e-learning

Параметри кожної транзакції $e \in M_E$ ($e = \overline{1, E}$) задає такий кортеж:

$$E_e = \langle \overline{a_e}, \overline{d_e}, \overline{u_e}, \overline{w_e} \rangle, \quad (1)$$

де $\overline{a_e} = (a_{e1}, \dots, a_{eA})$ – булев вектор необхідних застосунків e-learning, $A_e = (a_{ea})$; $\overline{d_e} = (d_{e1}, \dots, d_{eD})$ – булев вектор необхідних фрагментів сховища $D_e = (d_{ed})$; $\overline{u_e} = (u_{e1}, \dots, u_{eU})$ – булев вектор користувачів, що запускають транзакцію; $\overline{w_e} = (w_{ij})$ – булева матриця послідовності запуску застосунків, $i, j = 1, A$.

Параметри застосунку а транзакції e задаються кортежем

$$A_{ae} = \langle \overline{\lambda_{ae}}, \overline{\beta_{ae}} \rangle, \quad (2)$$

де $\overline{\lambda_{ae}} = (\lambda_{ae1}, \dots, \lambda_{aeD})$ – обсяги даних для застосунку а транзакції e , котрі знаходяться у відповідному фрагменті сховища; $\beta_{ae} = (\beta_{ae1}, \dots, \beta_{aeA})$ – обсяги даних для обміну з іншими застосунками при виконанні транзакції e .

Розміщення застосунків e-learning по вузлах ГБМ задає булева матриця

$$G = (g_{an}). \quad (3)$$

Розміщення користувачів задає булева матриця

$$H = (h_{un}). \quad (4)$$

Розміщення фрагментів сховища по вузлах ГБМ визначається такою матрицею:

$$S = (s_{dn}). \quad (5)$$

Отже, модель може бути сформована таким кортежем множин та матриць:

$$\mathfrak{Z} = \langle M_U, M_N, M_E, M_D, \{E_e\}, \{A_{ae}\}, G, H, S \rangle \quad (6)$$

При цьому слід враховувати нижчеперелічені обмеження на елементи кортежу (6):

будь-яка транзакція використовує хоча б один застосунок e-learning, тобто

$$\sum_{i=1}^A a_{ei} \geq 1 \quad \forall e \in \overline{1, E}; \quad (7)$$

транзакція не обов'язково повинна звертатися до сховища даних, тобто

$$\sum_{i=1}^D d_{ei} \geq 1 \quad \forall e \in \overline{1, E}; \quad (8)$$

кожна транзакція необхідна хоча б одному користувачеві :

$$\sum_{i=1}^U u_{ei} \geq 1 \quad \forall e \in \overline{1, E}; \quad (9)$$

кожен активний користувач повинен запустити хоча б одну транзакцію, тобто

$$\sum_{e=1}^E u_{eu} \geq 1 \quad \forall u \in \overline{1, U}; \quad (11)$$

кожен застосунок повинен бути встановленим:

$$\sum_{i=1}^N g_{ai} \geq 1 \quad \forall a \in \overline{1, A}; \quad (12)$$

кожен вузол має н менш одного активного застосунку:

$$\sum_{i=1}^A g_{in} \geq 1 \quad \forall n \in \overline{1, N}; \quad (13)$$

всі застосунки повинні бути встановлені, тобто

$$\sum_{i=1}^A \sum_{j=1}^N g_{ij} = A; \quad (14)$$

всі користувачі повинні бути розподілені по інформаційних вузлах, тобто

$$\sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^N h_{ij} = N; \quad (15)$$

кожен користувач повинен бути закріпленим до одного інформаційного вузла, тобто

$$\sum_{i=1}^N h_{ui} = 1 \quad \forall u \in \overline{1, U}; \quad (16)$$

закріплення користувачів по інформаційних вузлах є довільним, тобто

$$\sum_{i=1}^U h_{in} \in [0, U]; \quad (17)$$

усі фрагменти сховища даних розподілені по вузлах мережі, тобто

$$\sum_{i=1}^U \sum_{j=1}^N s_{ij} = D; \quad (18)$$

можлива реплікація даних, тобто один фрагмент може розташовуватися на декількох вузлах:

$$\sum_{i=1}^N s_{di} \geq 1; \quad (19)$$

розміщення фрагментів сховища даних по вузлах ГБМ є довільним, тобто

$$\sum_{i=1}^D s_{in} \in [0, D] \quad \forall i \in \overline{1, N}. \quad (20)$$

Отже, кортеж (6) у сукупності із умовами (7) – (20) складають математичну модель інформаційної структури гіперконвергентної системи підтримки електронних обчислювальних ресурсів e-learning.

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель інформаційної структури гіперконвергентної системи підтримки електронних обчислювальних ресурсів університетської e-learning. Модель враховує особливості університетської e-learning, дозволяє встановити інформаційні взаємозв'язки між складовими системи та провести аналіз гіперконвергентної базової мережі. Розроблена модель визначає множину допустимих варіантів інформаційної структури системи, на базі

якої можна вибрати оптимальний варіант технічної структури базової мережі.

Напрямок подальших досліджень – проведення подальшого аналізу ГБМ, результатами якого повинні стати чисельні значення пропускної здатності мережі: навантаження на канали зв'язку і структуроутворююче обладнання, інтенсивності потоків даних і запитів, що надходять на вузли мережі.

Список літератури

1. Шматков С.І. Аналіз інформаційних технологій у системах мобільного навчання / С.І. Шматков, Н.Г. Кучук, Ж.О. Коломієць // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава : ПНТУ, 2017. – Вип. 4(44). – С. 143-149.
2. “Welsh, E, Wanberg, C, Brown, K and Simmering, M (2003), “E-Learning: emerging issues, empirical results and future directions”, *International Journal of Training and Development*, 8 (4), pp. 245-258.
3. *White Paper: Riverbed Hyper-converged Edge*, available at: <https://www.riverbed.com/document-repository/white-paper--riverbed-hyper-converged-edge.html> (accessed 23 April 2017).
4. Кучук, Г.А. Модель процесса эволюции топологической структуры компьютерной сети системы управления объектом критического применения / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, А.А. Янковский // Системы обработки информации: сборник научных трудов. – Х.: ХУ ВС, 2014. – Вып. 7 (123). – С. 93 – 96.
5. Кучук, Г.А. Інформаційні технології управління інтегральними потоками даних в інформаційно-телекомунікаційних мережах систем критичного призначення / Г.А. Кучук. – Х.: ХУПС, 2013. – 264 с.
6. Кучук, Г.А. Концептуальний підхід до синтезу структури інформаційно-телекомунікаційної мережі / Г.А. Кучук, І.В. Рубан, О.П. Давікоза // Системи обробки інформації: збірник наукових праць. – Х.: ХУ ПС, 2013. – Вип. 7 (114). – С. 106 – 112.

Надійшла до редколегії 15.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.В. Рубан, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ГИПЕРКОНВЕРГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ЭЛЕКТРОННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ РЕСУРСОВ УНИВЕРСИТЕТСКИХ E-LEARNING

С.И. Шматков, Н.Г. Кучук, В.В. Донец

В статье приведены результаты разработки математической модели информационной структуры гиперконвергентной системы поддержки электронных вычислительных ресурсов университетской e-learning. Модель учитывает особенности университетской e-learning, позволяет установить информационные взаимосвязи между составляющими системы и провести анализ гиперконвергентной базовой сети. На базе разработанной модели можно провести моделирование процесса функционирования e-learning, результатами которого должны стать численные значения пропускной способности сети, нагрузка на каналы связи и структурообразующее оборудование, интенсивности потоков данных и запросов, поступающих на узлы сети.

Ключевые слова: e-learning, гиперконвергентность, электронные вычислительные ресурсы.

MODEL OF THE INFORMATION STRUCTURE OF THE HYPERCONVERGENT SYSTEM OF UNIVERSITY E-LEARNING ELECTRONIC COMPUTATIONAL RESOURCES SUPPORT

S.I. Shmatkov, N.G. Kuchuk, V.V. Donets

The article presents the results of the development of a mathematical model of the information structure of the hyperconvergent system of university e-learning electronic computational resources support. The model takes into account the peculiarities of university e-learning, allows us to establish information interconnections between the components of the system and to analyze the hyperconvergent basic network. On the basis of the developed model, it is possible to simulate the process of functioning of e-learning, the results of which should be numerical values of network bandwidth: the load on communication channels and structuring equipment, the intensity of data streams and requests arriving at network nodes.

Keywords: e-learning, hyperconvergence, electronic computing resources.

О.А. Янковський¹, Д.О. Янковська¹, Д.І. Маракушин²

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

² Харківський національний медичний університет, Харків

МИКРОКОНТРОЛЛЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕНСО-МОТОРНЫХ РЕАКЦИЙ

В статье рассмотрена микроконтроллерная система для контроля координации движения рук пациента при различных заболеваниях нервной системы, приводящих к нарушениям моторики рук. Данная система может использоваться как при диагностике, так и на различных этапах лечения таких болезней, как апраксия, болезнь Паркинсона и т.п. Предлагаемая система имеет невысокую сложность и возможности для расширения ее функциональных возможностей.

Ключевые слова: микроконтроллер, сигнал, реакция, координация, диагностика.

Вступ

Одним из перспективных направлений в изучении функционального состояния организма является исследование характеристик сенсомоторных реакций [1,3-5]. В этой связи представляется актуальным определение изменений сенсомоторной деятельности у пациентов с различными заболеваниями нервной системы. Многие психофизиологические характеристики, используемые для профессионального отбора сотрудников для выполнения работ различного вида сложности, могут быть использованы для ранней доклинической диагностики неврологических расстройств [2].

К числу методов, позволяющих оперативно оценить многие психофизиологические характеристики человека, относятся исследование времени сенсомоторной реакции (простой и сложной),

Простая сенсомоторная реакция проявляется наиболее быстрым заранее известным простым одиночным движением (например, нажатие кнопки по сигналу). Время от момента появления раздражителя до начала движения называется латентным временем реакции. Скоростью простой реакции является типичное (среднее) для данного человека в данных условиях латентное время его реакций. Она зависит от направленности (установки) внимания на восприятие сигнала (сенсорная реакция) или на движение (моторная реакция).

Сложная сенсомоторная реакция. Пациенту надо из нескольких кнопок выбрать только одну, которую следует нажать на определенный сигнал. Сложные реакции протекают медленнее простых, так как здесь существенно влияние состояния внимания, памяти и эмоционального состояния испытуемого.

Процессы сенсомоторной координации являются наиболее сложными и типичными для трудовой деятельности человека. В различных професси-

ях человеку часто одновременно требуется следить за различными приборами (сенсорное поле рабочего места) и воздействовать трудовыми движениями на орудие производства, т.е. ту часть рабочего места, где располагаются рычаги машины, кнопки (моторное поле рабочего места).

Сенсомоторная координация является двигательным навыком. На первых этапах обучения сенсомоторная координация заменяется цепью отдельных сенсорных реакций, каждая из которых имеет свое начало и конец. В дальнейшем отдельные реакции объединяются в гибкую пластичную систему сенсорных коррекций выполняемого движения.

Время реакции состоит из латентного и моторного периодов. Латентный период (ЛП), в свою очередь имеет несколько составляющих: время возбуждения рецептора, передачи сигнала от периферии к центру по афферентным путям, переработки информации в центральной нервной системе (ЦНС), принятия решения о реагировании, посылки команды к исполнительным органам (эффекторам) и развития возбуждения в эффекторах. Полученный в результате усреднения ЛП показатель сенсорной быстроты оценивает быстроту нервно-психических процессов и является косвенным показателем лабильности нервной системы.

Моторный период (МП) – время выполнения движения, складывающееся из времени возбуждения мышц, преодоления инерционных сил покоя тела и руки, времени пространственной реакции в ЦНС (времени переноса руки со «стартовой» клавиши на «финишную»). Полученный в результате усреднения МП показатель моторной быстроты оценивает скорость сокращения мышц (работы эффекторов и мышечных волокон). Это время складывается из времени согласования силовых, скоростных и пространственных (в соответствии с расстоянием между «стартовой» и «финишной» кнопками и их размерами) параметров движения.

При измерении сложной сенсомоторной реакции (ССР) также регистрируются: ВР, ЛП и МП. В реакции выбора (ССР) в сравнении с простой сенсомоторной реакцией (ПСП) испытуемый должен не только определить наличие или отсутствие сигнала, но и оценить, какой из трёх возможных сигналов поступил, и выбрать один их вариантов двигательного ответа.

Связь представлений о движении с его выполнением происходит через идиомоторные процессы. Идеомоторные акты иногда понимаются только как произвольные движения, автоматически возникающие вслед за представлением о нем. Однако, в практике более важное значение имеет более широкое понимание проблемы идеомоторики. В физиологическом плане — это проблема связи второй сигнальной системы с двигательным анализатором; в психологическом плане — это проблемы сознательности овладения двигательными навыками и самоконтроля над движениями. Электрофизиологическими исследованиями было доказано, что двигательные представления также всегда сопровождаются микросокращениями соответствующих мышц.

Исследование скорости сенсомоторной реакции является наиболее предпочтительным как наиболее информативное и не требующее применения дорогостоящих узкоспециализированных аппаратных систем [6,7].

Предлагаемая нами методика определения времени сложной зрительно-моторной реакции предназначена для оценки подвижности, силы и уравновешенности нервных процессов в ЦНС, что может быть использовано в качестве дополнительного критерия для ранней диагностики двигательных расстройств, характеризующихся возникновением нарушения произвольных целенаправленных движений (апраксия, болезнь Паркинсона и др.). Отсутствие этих научных данных и предопределило проведение нашего исследования, целью которого явилось определение времени сложной зрительно-моторной реакции на примере больных, страдающих апраксией.

Апраксия – это одно из патологических состояний в неврологии, которое проявляется нарушением произвольных целенаправленных действий, возникающее при поражении мозолистого тела и коры головного мозга.

Социальная значимость: апраксия приводит к снижению качества жизни пациента; невозможности самообслуживания; таким пациентам необходим постоянный уход;

При повторении одних и тех же реакций степень их скорости и точности может в одних случаях изменяться очень мало, а в других значительно сильнее. Это характеризует еще одно качество реакций — степень их постоянства или их вариативность.

Обычно больному с апраксией предъявляют ряд заданий по выполнению серий последовательных движений, воспроизведению позы рук исследователя. Далее исследуют способность подражать чужим движениям: погрозить пальцем или кулаком, коснуться тем или иным пальцем различных предметов.

Необходимо исследовать способность действовать не только одной рукой, но и обеими руками.

Оценка действий пациента при таких методиках является очень субъективной, зависит от квалификации врача. Особенно сложными являются такие методики для детей различного возраста.

Цель статьи – описание электронного устройства для определения времени сложной зрительно-моторной реакции, разработанного и изготовленного в рамках договора о сотрудничестве между Харьковским национальным медицинским университетом и кафедрой ЭВМ Харьковского национального университета радиозлектроники.

Практические результаты

Для улучшения процедур контроля состояния пациента как для диагностики, так и на различных этапах лечения, а также для сохранения результатов исследований предлагается микроконтроллерная система, структура которой показана на рис.1.

Система состоит из рабочей панели и компьютера – настольного или ноутбука.

Рабочая панель используется для контроля движений рук пациента. Она представляет собой корпус из пластика размером 40х30х5 см. На верхней стороне рабочей панели размещены кнопки с подсветкой (рис.2). Подсветка реализована при помощи трехцветных светодиодов, благодаря чему можно реализовать подсветку кнопок не менее чем 6 различными цветами.

Устройство управления включает подсветку различными цветами кнопок на рабочей панели и производит измерение интервала времени между включением светодиода и моментом нажатия на соответствующую кнопку. Очередность включения подсветки кнопок определяется несколькими способами: программным обеспечением, установленном на компьютере, шаблонами, записанными в память микроконтроллера.

Предполагается изменение частоты включения светодиодов в диапазоне от 0,1 Гц до 10 Гц (границы диапазона можно изменять). Также можно изменять количество включений светодиодов в одном цикле измерений.

Предусмотрена возможность выбора цвета излучения светодиода – цвет выбирается комбинацией кнопок трех цветов (если нажаты все три кнопки, то цвет может изменяться произвольно в процессе всего цикла исследования).

При правильном нажатии на кнопку раздается звуковой сигнал (который можно отключать).

Устройство управления реализовано на микроконтроллере ATmega16A-PU и небольшом количестве цифровых КМОП микросхем.

Рабочая панель имеет индикатор, на котором отображается информация перед началом работы, (например, ввод длительности цикла) и количество правильных нажатий.

Устройство управления подключается к USB порту компьютера через модуль FT232 USB UART Board (Type A).

Внутри корпуса рабочей панели находится и источник питания.

Рабочая панель может работать и без компьютера (выбор режима работы – автономный или управление от компьютера определяется переключателем на рабочей панели).

При автономном режиме работы порядок включения подсветки определенных кнопок определяется шаблонами, записанными в память микроконтроллера. Информация о количестве правильных нажатий отображается на индикаторе рабочей панели.

При выборе режима работы от компьютера, врачу предоставляются более широкие возможности по анализу сенсомоторных реакций пациентов.

Для этого рабочее окно компьютерной программы содержит изображение кнопок рабочей панели и врач может самостоятельно выбрать очередность включения подсветки кнопок, их цвет. Выбранная последовательность может быть сохранена для дальнейшего использования. Результаты исследований пациента, которые программное обеспече-

ние через модуль связи с компьютером получает от устройства управления, заносятся в его учетную запись, отображаются на экране компьютера и могут быть сохранены в виде файла.

Данные на каждого пациента можно просмотреть на компьютере в виде таблицы с датами и результатами исследований, а также в виде графика. Это позволяет оценивать процесс диагностики и лечения.

Информация о результатах исследований можно передавать через местную сеть или интернет на другие компьютеры.

Предлагаемая система обладает широкими возможностями по контролю состояния сенсомоторной реакции пациента, поскольку ему можно предложить нажимать на кнопки любым пальцем любой руки, или поочередно различными пальцами обеих рук.

Информация о результатах исследований можно передавать через местную сеть или интернет в компьютер врача.

Висновки

Предлагаемая система позволит облегчить оценку действий пациента путем измерения времени реакции и точности движений, при этом исключается фактор субъективности. Функциональные возможности системы можно расширить изменением размера и формы рабочей панели. Также можно сделать рабочую панель с изменяемым цветом участка, на котором расположены кнопки. Кроме этого, работа с данной системой возможна и без врача, при этом все результаты сохраняются в компьютере.



Рис. 1. Структура системы для определения времени сложной зрительно-моторной реакции

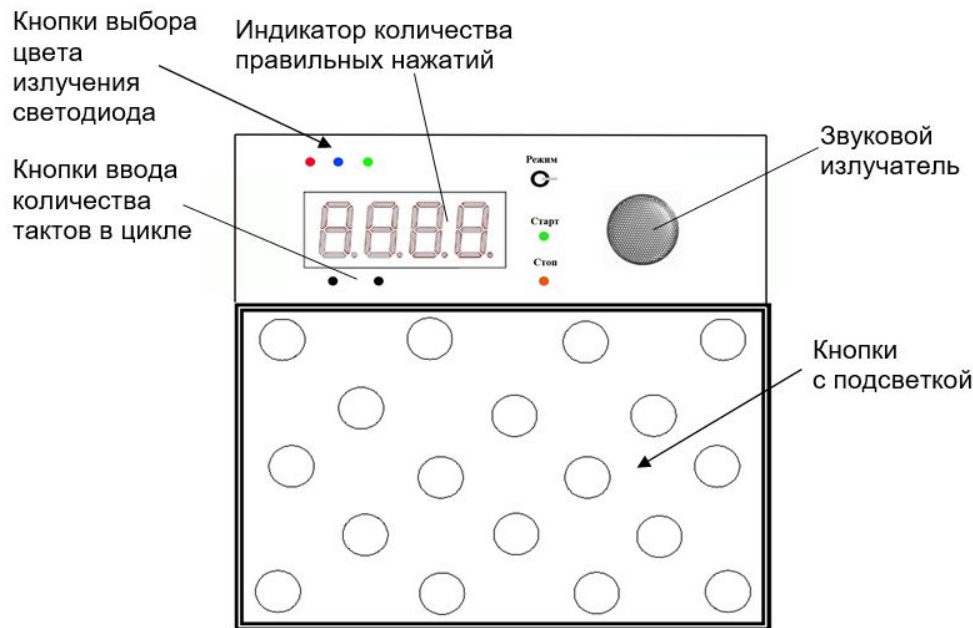


Рис. 2. Внешний вид Рабочей панели

Дальнейшая модернизация системы позволит отражать результаты исследований на планшет или смартфон.

Список літератури

1. Фаина, Г.В. Диагностика и коррекция задержки психического развития детей старшего дошкольного возраста: Учебно-методическое пособие / Г.В. Фаина. — Балашов: «Николаев», 2004. — 68 с.
2. Богданов В.Б., Горго Ю.П. Часова динаміка латентних періодів простої зорово-моторної реакції // Вісник Київського національного Університету імені Тараса Шевченка, серія Біологія. — 2004. — Випуск 41. — С. 135-137.
3. Давыдовский А.Г., Ел-Грейд М., Яшин К.Д. и др. Программный комплекс для клинического мониторинга неврологических расстройств // Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10-5. — С. 968-972.
4. Ендриховский С.Н., Шамишинова А.М., Соколов Е.Н. Время сенсомоторной реакции человека в современных психофизических исследованиях // Сенсор. сист. - 1996. - Т. 10, № 2. - С. 13.

5. Зайцев А.В. Возрастная динамика времени реакции на зрительные стимулы / А.В. Зайцев, В.И. Лупандин, О.Е. Сурнина // Физиология человека. — 1999. — Т. 25, № 6. — С. 34–36.

6. Ильин Е.П. Психомоторная организация человека. - СПб., 2003. - 384 с.
7. Кочина М.Л., Фирсов А.Г. Многофункциональный прибор для проведения психофизиологических исследований // Прикладная радиоэлектроника: науч.-техн. журнал. — 2010. Том 9, №2. — С. 260-265.
8. Фейгенберг И.М. Быстрота моторной реакции и вероятностное прогнозирование // Физиология человека. 2008. Т. 34, № 5. С. 51–62.
9. Трамперт В. Измерение, управление и регулирование с помощью AVR-микроконтроллеров: — К.: "МК-Пресс", 2006. — 208 с.

Надійшла до редколегії 15.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Смеляков, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

МІКРОКОНТРОЛЕРНА СИСТЕМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СЕНСО-МОТОРНИХ РЕАКЦІЙ

О.А. Янковський, Д.О. Янковська, Д.І. Маракушин

В статті розглянута мікроконтролерна система для контролю координації руху рук пацієнта при різних захворюваннях нервової системи, рук, що призводять до порушень моторики. Дана система може використовуватися як при діагностиці, так і на різних етапах лікування таких хвороб, як апраксія, хвороба Паркінсона і тому подібне. Пропонована система має невисоку складність і можливості для розширення її функціональних можливостей.

Ключові слова: мікроконтролер, сигнал, реакція, координація, діагностика.

MICROCONTROLLER SYSTEM FOR RESEARCH OF SENSO-MOTOR REACTIONS

O.A. Yankovsky, D.O. Yankovska, D.I. Marakushin

The article considers a microcontroller system for controlling the coordination of the patient's hands during various diseases of the nervous system, leading to violations of the motor skills of the hands. this system can be used both in diagnosis and at various stages of treatment of diseases such as paraxial, Parkinson's disease, and the like. the proposed system has a low complexity and scope for expanding its functionality.

Keywords: microcontroller, signal, reaction, coordination, diagnostics.

Запобігання та ліквідація надзвичайних ситуацій

УДК 504.064.36

doi: 10.26906/SUNZ.2018.2.101

С.М. Андреев, А.С. Нечаусов

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

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КЛАССА СТАБИЛЬНОСТИ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ТЕКУЩИХ МЕТЕОУСЛОВИЙ

Рассмотрен программный блок определения класса стабильности атмосферы, разработанный в качестве одной из функциональных составляющих геоинформационной системы, обеспечивающей мониторинг фактического состояния загрязнения атмосферного воздуха. Предложена программная реализация одной из задач снабжения существующих математических моделей для расчета концентрации загрязняющих веществ в атмосфере необходимыми метеорологическими данными с последующей их адаптацией в режиме реального времени. Предложен подход для сбора и хранения результатов работы программы на удаленных серверах в автоматическом режиме.

Ключевые слова: *информационные технологии, экологический мониторинг, определение класса стабильности атмосферы, загрязнение атмосферы.*

Введение

Для характеристики уровня загрязнения атмосферы той или иной территории за продолжительный период времени используют фоновую концентрацию отдельных загрязняющих веществ (ЗВ) и обобщенный показатель – индекс загрязнения атмосферы, рассчитываемый как сумма значений концентраций ведущих загрязнителей, нормированных на значения их предельно допустимых концентраций [1]. С целью обеспечения мониторинга фактического состояния загрязнения воздушного бассейна, прогноза уровня атмотехногенных выпадений ЗВ и разработки рекомендаций для улучшения состояния окружающей среды необходима информационная технология контроля загрязнения воздуха.

Она должна решать следующие задачи:

- расчет концентрации ЗВ от стационарных источников в приземном слое атмосферы для заданных пространственных координат;
- визуализация результатов расчетов в виде зон загрязнения по уровням концентрации веществ;
- представление зон загрязнения по уровням вредного воздействия с учетом суммарного влияния ряда химических веществ от различных источников;
- возможность получения результатов расчетов модели в режиме реального времени с учетом текущих метеорологических показателей, запрашиваемых из существующих web-ресурсов;
- реализация возможности учета рельефа местности для построения уточненной модели загрязнения атмосферы;
- возможность формирования банка статистических данных для выявления закономерностей и

принятия управленческих решений по улучшению экологической ситуации в конкретном регионе;

– осуществление как краткосрочных, так и долгосрочных прогнозов по экологической обстановке (на основе сформированного банка данных), а также моделирование возможных техногенных ситуаций с оценкой вероятных последствий (техногенных рисков) [2, 3].

Решение поставленных задач связано с оценкой концентрации ЗВ на основе моделей атмосферного переноса. Расчеты и картографирование приземных концентраций ЗВ позволят создавать оптимизационные эколого-экономические модели, в частности, для идентификации регионов, где атмотехногенные выпадения превышают величины критических нагрузок. Эта информация позволит определить регионы, в которых необходимо провести в той или иной степени сокращение выбросов ЗВ, чтобы обеспечить снижение региональных превышений критических нагрузок и уменьшить вероятность проявления экологического риска.

При расчете распространения выбросов необходимо учитывать расположение источников, их высоту и диаметр, а также объемы выбросов. В зависимости от специализации предприятия меняются высоты труб и химический состав выбрасываемой газо-воздушной смеси (ГВС), поэтому ареалы атмосферного загрязнения имеют сложную структуру.

Воздействие загрязняющих веществ (ЗВ) на окружающую среду зависит от их физических и химических свойств, свойств продуктов деструкции и концентрации тех и других в выбросах и окружающей среде. Время жизни загрязнителя в атмосфере – важнейший параметр, определяющий масштабы его

распространения Исходя из этого выбросы ЗВ или сами загрязнители делятся на три типа:

- выбросы веществ с большим временем жизни в атмосфере (годы или месяцы), способные распространяться в окружающей среде в глобальном масштабе независимо от места их выброса (углекислый газ, фреоны, радионуклиды с периодом полураспада от одного месяца и больше);

- выбросы веществ с ограниченным (обычно до нескольких суток) временем жизни в атмосфере, приводящие к загрязнению крупного региона, за пределами которого концентрация загрязнителя быстро падает, однако в следовых количествах может наблюдаться повсеместно (оксиды серы и азота, пестициды, тяжелые металлы);

- выбросы веществ с малым временем жизни в атмосфере (грубодисперсные аэрозоли, сероводород и др.), приводящие к загрязнению в локальном масштабе (на сравнительно небольшой территории).

Поведение ЗВ после попадания их в атмосферу, определяются многими факторами и, прежде всего, природными: метеорологической ситуацией, особенностями микрорельефа, наличием массивов зеленых насаждений. Ветры увеличивают скорость рассеяния и перемешивания, а воздушные потоки, направленные от земли, выносят загрязнения в верхние слои атмосферы. Однако могут возникнуть такие условия, при которых атмосферные слои остаются стабильными (инверсия температуры, антициклон). В результате ЗВ остаются вблизи поверхности земли, накапливаясь в больших количествах, опасных для человека и окружающей среды. Перечисленные факторы в значительной степени определяют распространение ЗВ вокруг источника загрязнения и перенос их на различные расстояния. Учет радиуса возможного распространения ЗВ особенно важен при определении размеров санитарно-защитной зоны предприятия, выборе места для строительства жилых кварталов и т. п. [4, 5].

Таким образом, в виду тенденций к развитию промышленности в больших городах, требуются системы контроля экологических рисков, сопутствующих техногенным производствам. Мониторинг выбросов и экологических рисков предусматривает работу с большими объемами данных, а их обработка вручную уже не представляется возможной и целесообразной, поэтому проблема создания автоматизированных технологий мониторинга состояния атмосферы в автоматическом режиме и сопутствующих им вспомогательных программных модулей сегодня является чрезвычайно актуальной и востребованной.

Целью работы является разработка программного модуля геоинформационной системы мониторинга воздуха для определения класса стабильности атмосферы по метеоданным в режиме реального времени.

1. Описание алгоритма программы

Данная программа предложена в качестве модуля информационной технологии мониторинга атмосферы в условиях экологической нестабильности техноэкосистем. Однако она может быть применена и к другим системам моделирования распространения ЗВ в атмосфере. Весь процесс эмиссии вредных веществ из источника выбросов может быть математически представлена видом распределений концентрации ЗВ вдоль трех координатных осей X, Y и Z (рис. 1). Программа «ОКСА-01» позволяет каждый час в автоматическом режиме определять входные параметры для математической модели, описывающей характер распределения по оси Z и по оси Y и сохранять их в архив данных для задач статистического анализа.

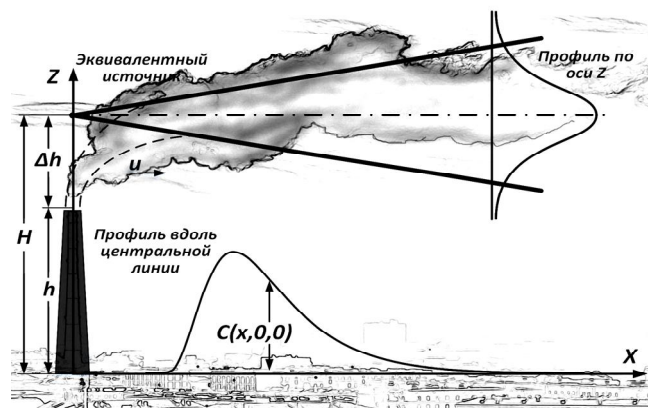


Рис. 1. Вид распределений концентрации ЗВ вдоль осей X и Z

Для оценки значений СКО σ_z , σ_y характеризующих рассеяние ЗВ в вертикальной плоскости и в направлении, перпендикулярном оси факела, как правило, используют эмпирические формулы:

$$\sigma_y(x, k_A) = a(k_A) \cdot x^{b(k_A)}, \quad (1)$$

$$\sigma_z(x, k_A) = c(k_A) \cdot x^{d(k_A)} \quad (2)$$

где $x \in [10^2 \dots 10^4]$, k_A – класс устойчивости атмосферы А...F (табл. 1).

Таблица 1
Классы устойчивости атмосферы

Скорость ветра, м/с	Классы устойчивости атмосферы				
	Дневное время. Уровень солнечного освещения			Ночное время. Облачность	
	Сильный	Средний	Слабый	>50%	<50%
< 2	A	A – B	B	E	F
2 – 3	A – B	B	C	E	F
3 – 5	B	B – C	C	D	E
> 5	C	C – D	D	D	D

Класс устойчивости атмосферы характеризует способность атмосферы рассеивать загрязнители. Обычно различают 6 классов стабильности атмосферы А...F [6].

Класс А соответствует наибольшей неустойчивости (очень конвективная атмосфера – ясное небо, высота солнца над горизонтом более 60°, слабый ветер).

Класс В соответствует умеренно нестабильным условиям.

Класс С соответствует незначительно нестабильным условиям.

Класс D соответствует нейтральным условиям.

Класс E соответствует незначительно стабильным условиям.

Класс F соответствует наибольшей устойчивости (большой отрицательный градиент температуры при слабой механической турбулентности – безветренные, ясные ночи, когда земля охлаждается, излучая тепло и возникает толстый инверсионный слой).

При определении класса устойчивости атмосферы k_A учитывают скорость ветра, время суток, солнечное освещение в местности и степень облачного покрытия [7, 8].

Значения коэффициентов $a(k_A)$, $b(k_A)$, $c(k_A)$, $d(k_A)$ (1), (2) определяют в зависимости от класса устойчивости атмосферы (табл. 2).

В литературных источниках они указаны для $z = 0,1$ м и $h < 20$ м.

Таким образом, была предложена следующая модель определения класса устойчивости атмосферы (рис. 2).

Таблица 2

Параметры расчета σ_y , σ_z

Класс устойчивости		a	b	c	d
Очень нестабильный	A	0,527	0,865	0,28	0,90
Нестабильный	B	0,371	0,866	0,23	0,85
Слабонестабильный	C	0,209	0,897	0,22	0,80
Нейтральный	D	0,128	0,905	0,20	0,76
Стабильный	E	0,098	0,902	0,15	0,73
Очень стабильный	F	0,065	0,902	0,12	0,67

Основой для разработки стала таблица классов устойчивости атмосферы по Пасквиллу и онлайн сервис «Google погода».

Скрипт программы каждый час формирует запрос в метеослужбу, на выходе формируется таблица с необходимыми данными о метеоусловиях (скорость ветра, направление ветра, температура, характеристика типа облачности/осадков, время восхода/заката солнца), а также дата, время и идентификационный номер замера. На основе этих данных проводится определение класса стабильности атмосферы и находятся численные значения коэффициентов a, b, c, d.

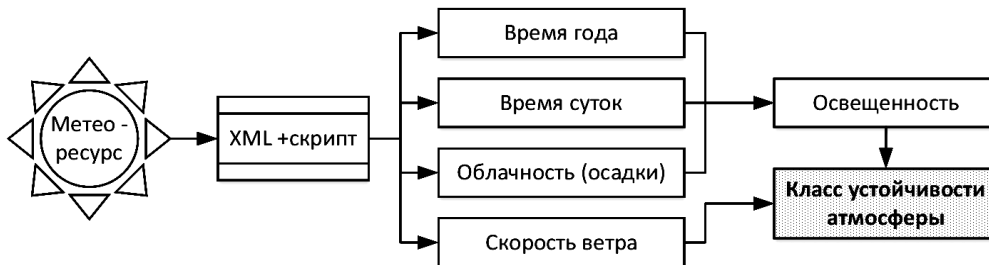


Рис. 2. Обобщенная модель определения класса устойчивости атмосферы

Полученные результаты записываются в базу данных в виде таблицы (рис. 3).

Процесс определения класса устойчивости атмосферы условно можно разбить на 2 этапа: этап группировки (рис. 4) и этап расчета классов устойчивости атмосферы (рис. 5).

2. Назначение и условия применения

Программа «ОКСА-01» предназначена для автоматической записи данных полученных из метеослужбы «Google» через заданные интервалы времени,

10724	3	nw	-3	пасмурно	05:36	17:48	2016-03-20	09:00:02	B-C	0.29	0.8815	0.225	0.825
10725	4	sw	-2	пасмурно	05:36	17:48	2016-03-20	10:00:02	B-C	0.29	0.8815	0.225	0.825
10726	8	sw	-2	снег	05:36	17:48	2016-03-20	11:00:02	C	0.209	0.897	0.22	0.8
10727	8	sw	-2	снег	05:36	17:48	2016-03-20	12:00:03	C	0.209	0.897	0.22	0.8
10728	4	sw	-2	пасмурно, небольшой снег	05:36	17:48	2016-03-20	15:00:02	B	0.371	0.866	0.23	0.85
10729	2	se	-3	ясно	05:34	17:50	2016-03-21	10:00:02	A-B	0.449	0.8655	0.255	0.875
10730	3	s	-1	ясно	05:34	17:50	2016-03-21	11:00:01	B	0.371	0.866	0.23	0.85

Рис. 3. Фрагмент результирующей таблицы программы «ОКСА-01»

а также для автоматического определения по этим данным класса стабильности атмосферы и количественных коэффициентов воздействия погодных условий на характер распространения примесей в атмосфере.

Программа является частью технологии мониторинга атмосферы и должна работать удаленно на web-сервере. Соответственно, для корректной работы программы необходим сервер с поддержкой PHP, MySQL и выходом в интернет. Программа способна работать в штатном режиме с момента размещения ее на сервере, формируя интерактивную таблицу данных с момента первого обращения (открытия в браузере).

С момента запуска программа будет собирать данные каждый час, обрабатывать их и сохранять полученные результаты в базе данных.

Запуск программы осуществляется переходом через браузер в директорию с исполняемым файлом на сервере в соответствии с доменным именем сайта `./Index.php`.

В открывшемся окне браузера будет отображена интерактивная таблица, которая продолжит накопление данных и после закрытия браузера, рабо-

тая непосредственно на сервере и сохраняя выборку статистических данных в базу данных (рис. 4).

Алгоритм этапа расчета классов устойчивости атмосферы в программе «ОКСА-01» представлен на рис. 5.

В соответствии с рис. 2 программа отображается в виде интерактивной таблицы, которая отражает информацию о метеоданных, временные характеристики, а также результаты определения класса устойчивости атмосферы в соответствии с табл. 1 и 2.

Столбцы результирующей таблицы (рис. 3) слева-направо:

- идентификатор измерения,
- скорость ветра (м/с),
- направление ветра (n – северный; s – южный; w – западный; e – восточный),
- температура воздуха,
- характеристика облачности/тип осадков,
- время восхода солнца,
- время заката солнца,
- время получения данных,
- класс стабильности атмосферы,
- значение коэффициентов a-d при текущих метеоусловиях.

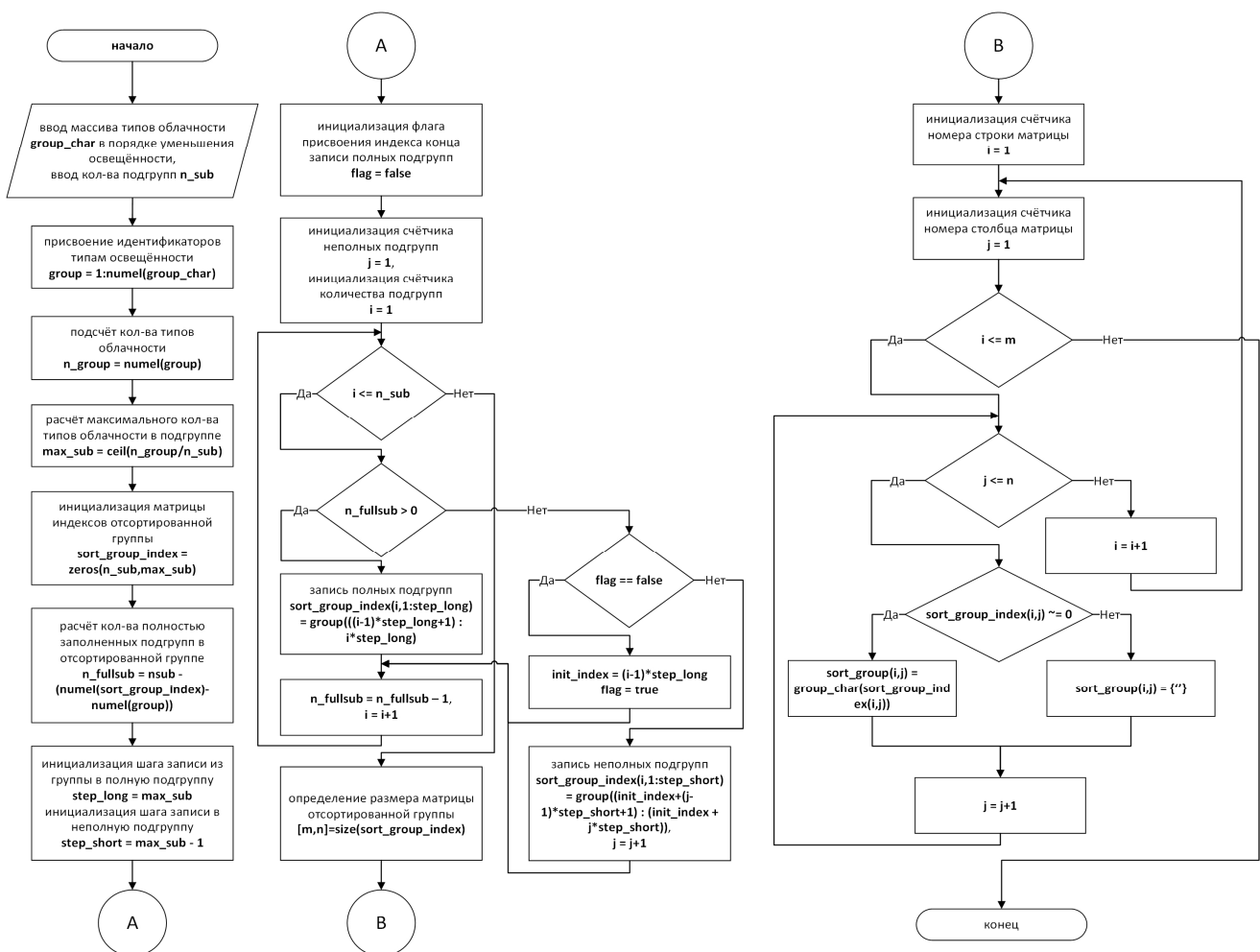


Рис. 4. Алгоритм этапа группировки в программе «ОКСА-01»

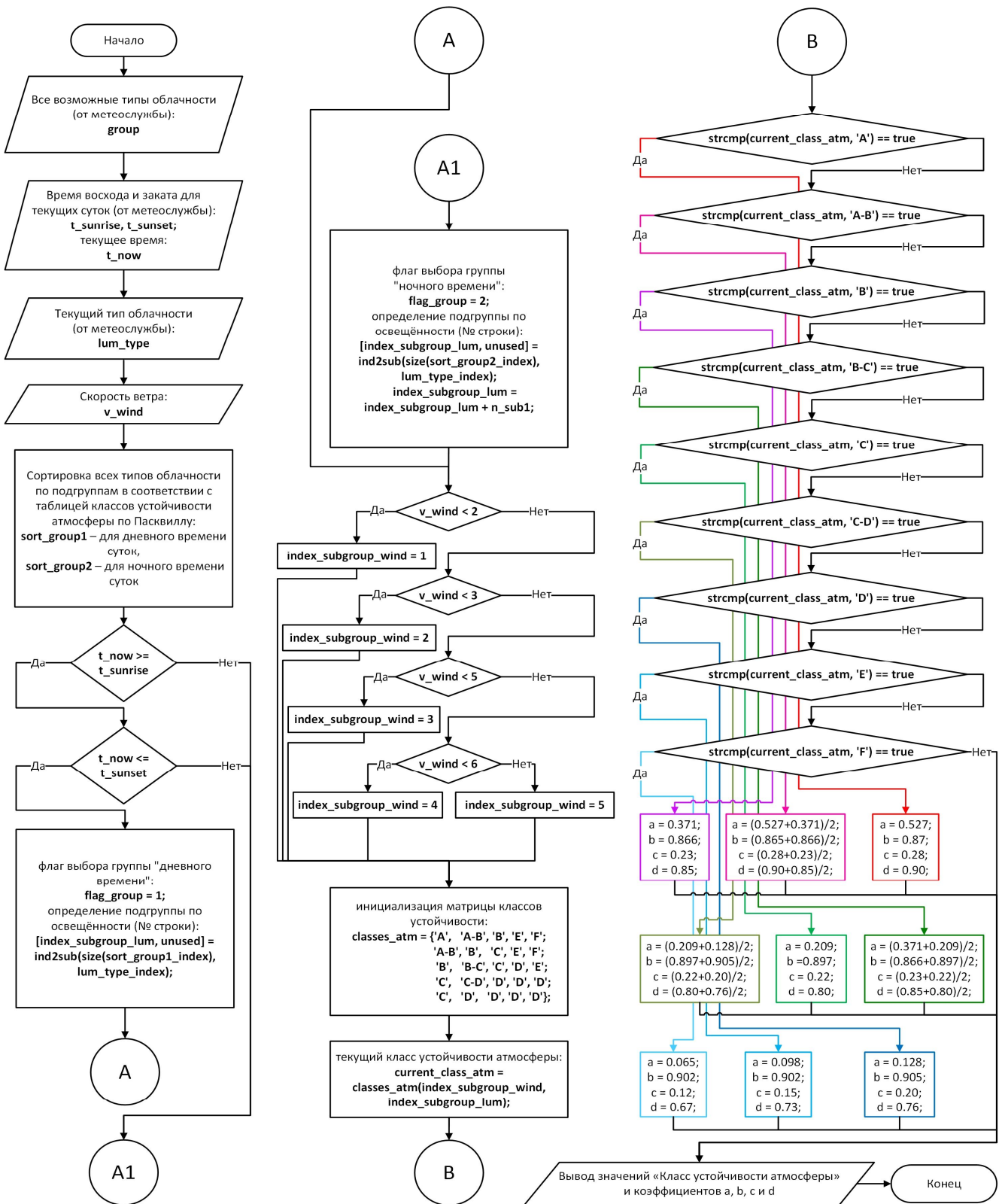


Рисунок 4 – Алгоритм этапа расчета классов устойчивости атмосферы в программе «ОКСА-01»

Выводы и направление дальнейших исследований

В статье был раскрыт принцип действия и основные особенности программы определения класса

стабильности атмосферы, которая была создана в качестве функциональной части технологии мониторинга загрязнения атмосферы.

Основная цель данной программы - снабжение существующих математических моделей, высту-

паючих в качестве аналитического ядра технологии мониторинга атмосферы для расчета концентрации загрязняющих веществ в атмосфере, необходимыми метеорологическими данными с последующей их адаптацией и пересчетом в необходимые коэффициенты в режиме реального времени, что открывает новые возможности при моделировании состояния атмосферного воздуха в режиме реального времени.

Ранее модели, основанные на таблице Пасквила были статичные и могли рассматривать ситуацию в единицу времени.

При использовании предложенной методики появляется возможность строить динамические модели основываясь на уже существующих данных и сервисах.

В дальнейшем планируется развивать автономность данной программы, расширяя ее спектр взаимодействия с другими методиками [9].

Кроме того, на основе существующих алгоритмов планируется получить выборку данных для выявления закономерностей изменения уровня загрязнения в зависимости от климатических особенностей.

Список литературы

1. Мониторинг и методы контроля окружающей среды [Текст] / Ю.А. Афанасьев, В.В. Меньшиков, С.А. Фомин, и др. – М.: Изд-во МНЭПУ, 2001. – 337 с.
2. Nechausov, A. S. The information model of the system for local atmospheric air pollution monitoring [Text] / A.S. Nechausov // Системи обробки інформації : зб. наук. пр. / Харк. ун-т повітр. сил ім. Івана Кожедуба. – 2016. – № 2(139). – С. 190-195.
3. Васильева, И.К. Метод моделирования нестационарных полей концентраций атмосферных примесей [Текст] / И.К. Васильева, А.С. Нечаусов // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – Харків : Національний аерокосмічний університет імені М.С. Жуковського «ХАІ», 2016.
4. Инженерная экология [Текст] / Под ред. В.Т. Медведева. – М.: Гардарики, 2002. – 687 с. – ISBN 5-8297-0090-5.
5. Скорер, Р. Аэрогидродинамика окружающей среды [Текст] / Р. Скорер; пер. с англ. – М.: Мир, 1980. – 549 с.
6. Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы [Текст] / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
7. Nechausov A. Synthesis of the air pollution level control system on the basis of hyperconvergent infrastructures [Текст] / A. Nechausov, I. Matysiuc, N. Kuchuk // Сучасні інформаційні системи : науково-технічний журнал. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 21 – 26.
8. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 94 с.
9. Условија, влијучице на дисперсију газова и парова в атмосфери: [Електронни ресурс] // Еколошка мрежа "ЕКОДЕЛО". 2015. URL: http://ecodelo.org/9586-522_usloviya_vliyayushchie_na_dispersiyu_gazov_i_parov_v_atmosfere-5_modelirovanie_i_progozy_v_ (дата обращения: 2.12.2015).

Надійшла до редколегії 15.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.С. Бутенко, Національний аерокосмічний університет імені М.С. Жуковського «ХАІ», Харків.

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЗНАЧЕННЯ КЛАСУ СТАБІЛЬНОСТІ АТМОСФЕРИ ДЛЯ ПОТОЧНИХ МЕТЕОУМОВ

С.М. Андреев, А.С. Нечаусов

Розглянуто програмний блок визначення класу стабільності атмосфери, розроблений в якості однієї з функціональних складових геоінформаційної системи, що забезпечує моніторинг фактичного стану забруднення атмосферного повітря. Запропоновано програмну реалізацію однієї з фактичних завдань постачання існуючих математичних моделей для розрахунку концентрації забруднюючих речовин в атмосфері необхідними метеорологічними даними з подальшою їх адаптацією в режимі реального часу. Запропоновано підхід для збору і зберігання результатів роботи програми на віддалених серверах в автоматичному режимі.

Ключові слова: інформаційні технології, екологічний моніторинг, визначення класу стабільності атмосфери, забруднення атмосфери.

ALGORITHM OF AUTOMATED DETERMINATION OF THE CLASS OF STABILITY OF THE ATMOSPHERE FOR CURRENT METEOROLOGICAL CONDITIONS

S.M. Andreev, A.S. Nechausov

The program block for determining the stability class of the atmosphere developed as one of the functional components of the geoinformation system, providing monitoring of the actual state of atmospheric air pollution, is considered. A software implementation of one of the actual tasks of supplying existing mathematical models for calculating the concentration of polluting substances in the atmosphere with the necessary meteorological data and their subsequent adaptation in real time mode is proposed. An approach is proposed for collecting and storing the results of the program on remote servers in an automatic mode.

Key words: environmental monitoring, atmospheric pollution, probabilistic model.

А.А. Антошкин¹, П.А. Качанов², В.И. Галица², А.Н. Литвяк¹

¹ *Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков*

² *Национальный технический университет «ХПИ», Харьков*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СКОРОСТЬ ОСАЖДЕНИЯ МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ

Проведены экспериментальные исследования влияния электростатического поля на скорость осаждения мелкодисперсной пыли, полученной при сжигании огнетушащего аэрозоля. Полученные результаты показывают, что для принятых условий эксперимента скорость осаждения аэрозолеобразующих составов увеличивается примерно в 1,7 раза, по сравнению с гравитационным способом. Выявлено, что наиболее интенсивно пыль оседает на электростатических пластинах в областях завихрений, образованными входной решеткой. Падение скорости осаждения огнетушащего аэрозоля на пластинах связано с загрязнением выходной решетки ГВ-1.

Ключевые слова: электростатическое поле, мелкодисперсная пыль, запыленная среда, огнетушащий аэрозоль, скорость осаждения аэрозоля.

Введение

Постановка проблемы. Вредное воздействие на здоровье человека промышленной пыли до сих пор является серьезной проблемой. Особенно сложной задачей является очистка воздуха от мелкодисперсной пыли, когда обыкновенная фильтрация воздуха оказывается недостаточно эффективной.

К современным средствам пожаротушения относятся генераторы огнетушащего аэрозоля ГОА при срабатывании которых выделяется мелкодисперсный аэрозоль, являющийся эффективным средством тушения пожаров любого класса. Однако после срабатывания генератора огнетушащего аэрозоля атмосфера в помещении долгое время остается непригодной для дыхания. Принимая во внимание жесткие требования [1] по степени негерметичности помещений, защищаемых аэрозольными установками пожаротушения, восстановление нормальных условий проветриванием занимает слишком много времени. Использование дымососов для удаления огнетушащего аэрозоля (ОА) потребует установки на них фильтров для предотвращения выброса мелкодисперсной взвеси в атмосферу и оседания ее на прилегающей территории.

Таким образом, существует проблема исследования способов увеличения скорости осаждения частиц аэрозоля в замкнутых объемах. Проблема становится еще более актуальной для случаев, когда проветривание объемов вообще невозможно.

Анализ последних исследований и публикаций. Для очистки воздуха от пыли на производственных предприятиях применяют, как правило, механические фильтры. При таком способе очистки наиболее опасные мелкодисперсные частицы остаются в воздухе. Для их осаждения необходимо применение других, более эффективных способов: аку-

стическое и ультразвуковое воздействие [2], воздействие электростатическим полем [3], распыление электростатических частиц [4].

При исследовании горения аэрозолеобразующих составов (АОС) основное внимание уделялось определению избыточного давления в помещении и решению проблемы высокой температуры сгорания АОС [5, 6]. Вопросы же осаждения ОА исследовались лишь с использованием гравитационного метода [6]. Исследований влияния электростатического поля на скорость осаждения ОА не проводилось. Таким образом исследование способов увеличения скорости осаждения ОА до сих пор остается проблемой.

Постановка задачи и ее решение

Задачей данной работы является исследование влияния электростатического поля на скорость осаждения ОА. В качестве объекта исследования был выбран замкнутый объем высотой 485 мм, шириной 460 мм и длиной 500 мм. В этом объеме сжигались аэрозолеобразующие заряды Е-1 разной массы и создавалась различная концентрация ОА.

Для исследования влияния электростатического поля на скорость осаждения ОА внутрь объекта был помещен разработанный электростатический прибор ГВ-1 (рис. 1) с электростатическими пластинами общей площадью 12032мм², на которые подавалось напряжение 20кV.



Рис. 1. Электростатический прибор ГВ-1

Через пластини прокачивалась газоздушная среда с начальной скоростью 2м/с, через выходное

отверстие площадью 500мм². Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

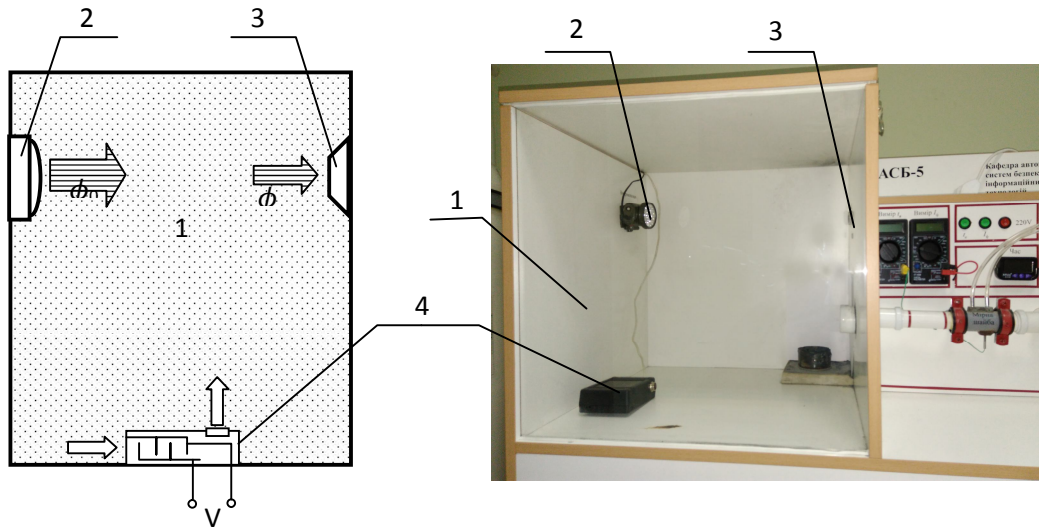


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – модель помещения; 2 – источник света; 3 – фотозлектрический приемник (Ленинград-4); 4 – электростатический воздухоочиститель ГВ-1

Изменение концентрации ОА исследовалось оптическим методом. Согласно закону Ламберта-Бера:

$$\phi = \phi_0 \cdot e^{-k c_a l}, \tag{1}$$

где $\phi_0 = 420, \text{ мВ}$ – эквивалент интенсивности светового потока излучателя в прозрачной среде; ϕ – эквивалент интенсивности светового потока в запыленной среде, мВ; k – коэффициент, учитывающий оптические свойства газоздушной среды; c_a – концентрация взвешенных частиц; l – расстояние между излучателем и приемником.

Как видно, концентрация аэрозоля однозначно связана с интенсивностью светового потока проникающего через запыленную среду.

Для удобства анализа результатов использовалось понятие относительной оптической плотности среды:

$$S_x = \frac{\phi_0 - \phi}{\phi_0}. \tag{2}$$

После сжигания АОС показания ФЭП фиксировались с шагом 1 минута. Первые 10 мин осаждение ОА происходило под действием гравитации, Последующие 10 мин осаждение ОА происходило с использованием электростатического прибора ГВ-1.

Было запланировано проведение 4-х экспериментов:

- Эксперимент 1: масса аэрозоля 2,5 г.
- Эксперимент 2 : масса аэрозоля 1,5 г.
- Эксперимент 3 : масса аэрозоля 2.0 г.
- Эксперимент 4 : масса аэрозоля 1.0 г.

Протокол эксперимента представлен в табл. 1.

Изменение оптической плотности газоздушной среды показано на рис. 3.

Таблица 1

Протокол эксперимента

t, мин	$\Phi_1, \text{ мВ}$	S_{x1}	$\Phi_2, \text{ мВ}$	S_{x2}	$\Phi_3, \text{ мВ}$	S_{x3}	$\Phi_4, \text{ мВ}$	S_{x4}
0	306	27,1	297	29,3	299	28,8	313	25,5
1	306	27,1	309	26,4	310	26,2	317	24,5
2	308	26,7	311	26,0	314	25,2	318	24,3
3	310	26,2	317	24,5	316	24,8	328	21,9
4	316	24,8	321	23,6	321	23,6	330	21,4
5	319	24,0	325	22,6	325	22,6	333	20,7
6	323	23,1	328	21,9	329	21,7	336	20,0
7	326	22,4	331	21,2	333	20,7	342	18,6
8	330	21,4	335	20,2	337	19,8	343	18,3
9	335	20,2	340	19,0	341	18,8	345	17,9
10	343	18,3	345	17,9	345	17,9	349	16,9
11	349	16,9	358	14,8	357	15,0	360	14,3
12	358	14,8	364	13,3	363	13,6	366	12,9
13	367	12,6	372	11,4	369	12,1	371	11,7
14	373	11,2	379	9,8	375	10,7	377	10,2
15	379	9,8	384	8,6	379	9,8	383	8,8
16	384	8,6	388	7,6	393	6,4	388	7,6
17	388	7,6	392	6,7	387	7,9	391	6,9
18	392	6,7	395	6,0	390	7,1	394	6,2
19	395	6,0	398	5,2	398	5,2	397	5,5
20	397	5,5	400	4,8	400	4,8	400	4,8

Выводы

Полученные результаты показывают, что для принятых условий эксперимента скорость осаждения АОС увеличивается примерно в 1,7 раза, по сравнению с гравитационным способом. Выявлено, что наиболее интенсивно пыль оседает на электростатических пластинах в областях завихрений, образованными входной решеткой. Падение скорости осаждения ОА на пластинах связано с загрязнением выходной решетки ГВ-1.

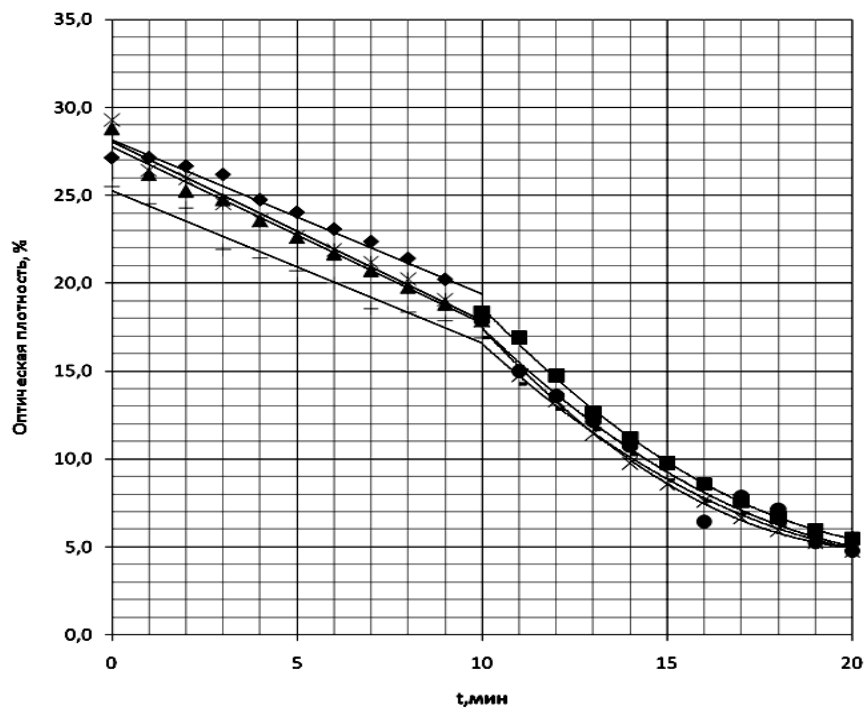


Рис. 3. Изменение оптической плотности среды

Список литературы

1. Пожежна техніка. Установки автоматичні аерозольного пожежогасіння. Проектування, монтажування та експлуатування: ДСТУ 4490:2005 – [Чинний від 2005-25-11]. – К. : Держспоживстандарт України. – 2005. – 16 с. – (Національний стандарт України).

2. Антонникова, А.А., Коровина Н.В., Кудряшова О.Б. Ультразвукове осаждение мелкодисперсного аэрозоля // Известия ТПУ. – 2014. – Т.324. – №2. – с.57-62.

3. Степкина М.Ю., Ахмадеев И.Р., Ворожцов Б.И. Экспериментальное исследование способа ускорения мелкодисперсного аэрозольного облака под действием электростатического поля // Ползуновский вестник. – 2014. – №3. – с. 134-138.

4. Olga Kudryashova and Maria Stepkina Electrostatic charge of power particles and their sorption capacity // Proc. HEMS 2016? 136-137, Tomsk (2016).

5. Бондаренко С.Н. Применение генераторов огнетушащего аэрозоля в составе автоматических установок пожаротушения, вопросы математического моделирования/ С.Н. Бондаренко // Проблемы пожарной безопасности. – 1999. – №3. – С. 25-28. – Режим доступа: <http://repositc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/1512>.

6. Литвяк А.Н. Экспериментальное определение температуры и избыточного давления при работе генераторов огнетушащего аэрозоля. / А.Н. Литвяк, М.Н. Мурин // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков, УГЗУ, – 2008. – Вып 24. – С.115-119. Режим доступа: <http://repositc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/492/1/08%20Litvyak%20Murin%20GOA.pdf>

Надійшла до редколегії 5.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ НА ШВИДКІСТЬ ОСАДЖЕННЯ ВОГНЕГАСНОГО АЕРОЗОЛЮ

О.А. Антошкін, П.О. Качанов, В.І. Галиця, О.М. Литвяк

Проведено експериментальні дослідження впливу електростатичного поля на швидкість осадження дрібнодисперсного пилу, отриманої при спалюванні вогнегасної аерозолі. Отримані результати показують, що для прийнятих умов експерименту швидкість осадження аерозолеутворюючого складів збільшується приблизно в 1,7 рази, в порівнянні з гравітаційним способом. Виявлено, що найбільш інтенсивно пил осідає на електростатичних пластинах в областях завихрень, освіченими входніми ґратами. Падіння швидкості осадження вогнегасної аерозолі на пластини пов'язано з забрудненням вихідної решітки ГВ-1.

Ключові слова: електростатичне поле, дрібнодисперсний пил, запылена среда, огнетушащий аерозоль, швидкість осадження аерозолі.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE ELECTROSTATIC FIELD ON THE DEPOSITION RATE OF FINE DUST

O.A. Antoshkin, P.A. Kachanov, V.I. Galitsa, A.N. Litvyak

Experimental studies of the influence of the electrostatic field on the deposition rate of fine dust obtained by burning a fire extinguishing aerosol. The obtained results show that, for the experimental conditions adopted, the sedimentation rate of the aerosol-forming compositions increases approximately by 1.7 times, in comparison with the gravitational method. It was found that the dust is most intensely deposited on electrostatic plates in the vortex regions formed by the input grating. The drop in the speed of deposition of the extinguishing aerosol on the plates is associated with the contamination of the output grating ГВ-1.

Keywords: electrostatic field, fine dust, dusty environment, fire extinguishing aerosol, aerosol deposition rate.

О.С. Бутенко¹, О.В. Барабаш², С.І. Горелик¹, А.А. Нікітін³

¹ Національний аерокосмічний університет імені М.С. Жуковського «ХАІ», Харків

² Державний університет телекомунікацій, Київ

³ Національний університет оборони імені Івана Черняховського, Київ

СИСТЕМА КОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЗА СМІТТЄЗВАЛИЩАМИ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

В статті представлені основні засади, щодо створення системи космічного моніторингу за сміттєзвалищами з метою оперативного виявлення несанкціонованих звалищ. Показаний техногенний вплив звалищ твердих побутових відходів (ТПВ) на підземні й поверхневі води, ґрунти та атмосферне повітря. Приведені можливі наслідки для здоров'я людини від забруднюючих речовин, що виділяються зі сміттєзвалищ та концентруються не тільки у повітрі, а й в ґрунтах та підземних водах. Проаналізовані останні дослідження в області ідентифікації та локалізації полігонів ТПВ. Приведена методика створення такої системи космічного моніторингу сміттєзвалищ. Наведені основні вимоги до даних ДЗЗ з метою найбільш точного знаходження та ідентифікації законних та незаконних сміттєзвалищ. Описані прямі та непрямі дешифрувальні ознаки санкціонованих та несанкціонованих звалищ ТПВ. Для підтвердження правильності представленої методики проведений порівняльний аналіз результатів її роботи з реальними даними та показана практична реалізація запропонованої системи космічного моніторингу на прикладі Золочівського району Львівської області. Побудовані картографічні моделі забруднення підземної та поверхневої гідросфери від сміттєзвалищ ТПВ дозволяють оперативно приймати рішення щодо попередження негативних наслідків, які можуть бути визвані цими видами забруднень. В тому числі показаний вплив компонентів фільтрату на розвиток різних видів хвороб, які визивають накопичення забруднюючих речовин, що є результатом забруднення навколишнього середовища від сміттєзвалищ, як санкціонованих так і несанкціонованих. Показано, що розроблена система космічного моніторингу законних та несанкціонованих сміттєзвалищ дозволяє оперативно локалізувати та ідентифікувати ці звалища ТПВ для своєчасного прийняття рішення щодо недопущення забруднення навколишнього середовища.

Ключові слова: ДЗЗ, звалища ТПВ, забруднення, космічний моніторинг, підземні води, поверхневі води, Золочів.

Вступ

В наш час проблема забруднення навколишнього середовища від сміттєзвалищ стоїть дуже гостро. За даними Державної служби статистики України [1] щорічно утворюється 35-40 млн м³ твердих відходів. Загальна маса накопичених відходів в Україні становить 25 млрд. т [1], що у перерахунку на одного громадянина складає близько 600 т. Слід зазначити, що ці відходи знаходяться на санкціонованих сміттєзвалищах та складуються згідно вимог ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування» [2]. Цей нормативний документ дозволяє зменшити можливе антропогенне навантаження на навколишнє середовище, але не є досконалим. В свою чергу за останні десятиріччя з'явилася тенденція щодо збільшення несанкціонованих місць звалення ТПВ. Так, станом на 2015 р. в Україні [3] виявлено більш 28 тис. незаконних звалищ ТПВ, в яких знаходиться 20,5 млн м³ відходів. Несанкціоновані сміттєзвалища є найнебезпечнішим джерелом забруднення. Отже, своєчасне виявлення несанкціонованих сміттєзвалищ та моніторинг за динамікою законних та незаконних звалищ ТПВ є досить актуальною задачею.

Постановка проблеми. Звалища ТПВ є активними забруднювачами навколишнього середовища.

Неправильна їх експлуатація призводить до забруднення атмосферного повітря, підземних і поверхневих вод та ґрунту (рис. 1).

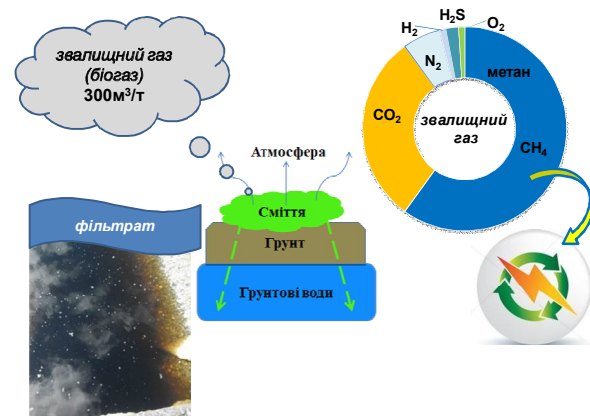


Рис. 1. Вплив сміттєзвалища на навколишнє середовище

На звалищах ТПВ в результаті гниття сміття за рахунок бактерій утворюється звалищний газ (біогаз), який складається з [4]: метану (CH₄) – 50-75%, вуглекислого газу (CO₂) – 25-50%, азоту (N₂) – 0-10%, водню (H₂) – 0-1%, сірководню (H₂S) – 0-3%, кисню (O₂) – 0-2%.

Більшість з цих газів негативно впливають на довкілля. Так, метан та вуглекислий газ є «парнико-

вими газами», які спричиняють глобальне потепління на планеті. Слід відзначити, що метан в 23-25 разів сильніше впливає на глобальну зміну клімату ніж вуглекислий газ. Сірководень може спричинити кислотні дощі, які призводять до підвищення кислотності рік та озер, загибелі флори та фауни, погіршення якості сільськогосподарської продукції, питної води, атмосферного повітря, а також призводять до руйнування будівель та споруд [5].

В результаті проникнення атмосферних вод у тіло полігону утворюється фільтрат, який може потрапляти у ґрунт, підземні і поверхневі води та забруднювати їх. Фільтрат утворюється при проходженні через товщу відходів та збагачується токсичними речовинами, що входять до їхнього складу, а також продуктами їх розкладення. Як правило, на санкціонованих звалищах існують споруди, які захищають навколишнє середовище від фільтрату, тоді як на стихійних звалищах цей токсичний роз-

чин проникає у ґрунт, підземні води та може стікати до найближчих ярів, річок, ставків тощо.

Розчин фільтрату є дуже токсичним, так як в ньому концентрація амонію може перевищувати гранично допустимі концентрації (ГДК) у 1000 разів, фенолів у 400 разів, нафтопродуктів у 150 разів, хлоридів у 30 разів, тяжких металів (свинець, кадмій, мідь, цинк, нікель, хром, марганець та ін.) у 10-60 разів. Концентрація заліза та ртуті може перевищувати ГДК у 2500 разів. В загалом, у фільтраті спостерігається перевищення наступних показників: арсен, манган, мідь, цинк, кадмій, кобальт, свинець, нікель, нітрати, хром, ртуть, берилій, залізо, сульфати поверхнево-активні речовини (ПАВ), нафтопродукти, феноли [5].

Усі вищевказані показники є дуже отруйними та небезпечними для здоров'я людини. У таблиці 1 показаний вплив цих компонентів на виникнення різних типів захворюваності у людини [6].

Таблиця 1

Вплив компонентів фільтрату на розвиток різних видів хвороб

Компонент	Тип захворювань
Арсен	судоми, гіперкератоз, рак шкіри, легенів, сечового міхура, діабет ін.
Манган	анемія, хвороби кістково-м'язової сечостатевої, нервової системи, шкіри
Мідь	розлади рухомого апарату
Цинк	хвороби серця, крові, ракові захворювання
Кадмій	гіпертонія, ішемічна хвороба, ниркова недостатність
Кобальт	склероз легень, кардіоміопатія, дерматит, хвороби щитовидної залози, гіпертонія,
Свинець	анемія, хвороби нирок, нервової системи
Нікель	хвороби нирок, легень, ракові захворювання
Нітрати	гіпоксія, порушення роботи ендокринної, травневої, серцево-судинної, нервової системи, рак шлунка
Хром	алергія, астма, ракові захворювання
Ртуть	ураження нервової системи,
Берилій	саркоїдоз, фіброз, хвороби серця, печінки, ракові захворювання
Залізо	хвороби печінки, імунної системи, серцево-судинні захворювання, алергія
Сульфати	жовчо- и сечокам'яної хвороби, серцево-судинні захворювання,
ПАВ	погіршення імунітету, алергія, ураження мозку, печінки, нирок, легенів.
Нафтопродукти	хвороби серцево-судинної системи
Феноли	ураження нервової та дихальної системи, хвороби печінки, серця, крові, головного мозку, ракові захворювання

Проникнення фільтрату у ґрунт, підземні та поверхні води призводить до повного знищення флори й фауни та до неможливості її використання у народному господарстві.

Виявлення звалищ ТПВ, наявними на сьогодні методами, пов'язане з великими витратами часу і коштів. У зв'язку з цим використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволить своєчасно виявляти і контролювати як санкціоновані, так і стихійні звалища ТПВ для прийняття оперативних рішень. У зв'язку з цим необхідно негайно впровадження космічного моніторингу для локалізації незаконних звалищ і контролю за санкціонованими звалищами ТПВ.

Аналіз останніх досліджень. Розробкою сучасних методів визначення сміттєзвалищ присвячено роботи М.Л. Азаряна, М.А. Шахраманьяна, А.А. Рихтера та ін., які за допомогою даних ДЗЗ дозво-

ляють їх доволі точно локалізувати, але не мають можливості ідентифікувати несанкціоновані звалища ТПВ. Локалізації незаконних сміттєзвалищ ТПВ присвячені роботи О.В. Бровкиної, С.С. Тимофєєвої, А.І.Філатова та ін.

Оцінка впливу сміттєзвалищ на навколишнє середовище проаналізовано в багатьох дослідженнях сучасних та закордонних авторів (І.С. Єфремов, І.Л. Трофімов, М. Персон, М. Алжардин та ін), але в умовах недостатньої кількості апріорних даних оцінити ступінь їх впливу на підземну гідросферу майже неможливо. Тому, тема розробка методики оцінки впливу несанкціонованих сміттєзвалищ на підземну та поверхневу гідросферу на основі даних ДЗЗ є досить актуальною та новою.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є створення системи космічного моніторингу за сміттєзвалищами ТПВ для виявлення несанк-

ціонованих місць звалення ТПВ та оперативного прийняття рішень стосовно зміни динаміки їх площ, оцінки впливу на навколишнє середовище та геодинамічної ситуації. В статі розглянуті наступні завдання для досягнення поставленої мети:

- розроблення системи космічного моніторингу за сміттєзвалищами ТПВ;
- розроблення методики оцінки впливу забруднюючих речовин від звалищ ТПВ на навколишнє середовище;
- розроблення методики оцінки геодинамічної ситуації в місці розташування законних та незаконних сміттєзвалищ.

Структура системи космічного моніторингу за санкціонованими та несанкціонованими сміттєзвалищами твердих побутових відходів

Система космічного моніторингу за сміттєзвалищами ТПВ включає наступні етапи (рис. 1):

1. Пошук і систематизація різночасових космічних знімків. В ході аналізу даних ДЗЗ визначені необхідні параметри для точної локалізації та іден-

тифікації сміттєзвалищ:

- спектральні канали. Найбільш інформативними каналами для даних завдань є червоний (R), зелений (G) та синій (B). Їх синтезування дозволяє доволі точно дешифрувати місця звалищ ТПВ;
- роздільна здатність. Відіграє основну роль при підборі знімків. Так, для великих сміттєзвалищ, як правило санкціонованих, оптимальна роздільна здатність становить 1-10 м/піксель. Для незаконних звалищ ТПВ, які мають невелику площу, необхідні знімки з роздільною здатністю менш 1 м/піксель.
- вартість знімків. З метою здешевлення моніторингу слід використовувати безкоштовні знімки, які знаходяться у вільному доступі.

До вищезазначених вимог відносяться наступні супутники, які знаходяться у вільному або частково у вільному доступі: Sentinel-2 (просторове розрізнення 10 м/піксель), QuickBird 1-2 (0,6-2,4 м/піксель), Worldview-1,2,3 (0,3-1,84 м/піксель), Geoeye-1,2 (0,4-1,7 м/піксель).

2. Визначення за дистанційними даними санкціонованих та стихійних звалищ виконується за допомогою дешифрувальних ознак наведених у табл. 1.

Таблиця 1

Дешифрувальні ознаки санкціонованих та несанкціонованих сміттєзвалищ

№	Дешифрувальні ознаки	Санкціоновані сміттєзвалища	Несанкціоновані сміттєзвалища
Прямі дешифрувальні ознаки			
1	Границя	Чітка	Розмита
2	Форма	Багатокутник з закругленими кутами	Неправильна, округла чи лінійно витягнута вздовж узбіч автомобільних та залізничних доріг
3	Тінь	Є, падаюча від уступів	Відсутня
4	Колір	Переважно світло-сірий, білий, сірий, темно-сірий	Переважно світло-сірий, білий, сірий, темно-сірий
5	Структура	Зернисті, плямиста	Плямиста
Непрямі дешифрувальні ознаки			
6	Захисне покриття (рекультивация)	присутня, світло-коричневого кольору (суглинок, глина)	Відсутня
7	Рослинність в місці звалення сміття	Спостерігається через декілька років після рекультивациі	Спостерігається як правило закономірність: заростання з центру до периферії сміттєзвалища; відсутня у випадку постійного надходження сміття
8	Головна під'їзна дорога	Є, як правило двусмугова	Відсутня, існують пішохідні тропи чи ґрунтові односмугові дороги
9	Огорожа	Присутня	Відсутня
10	Робоча техніка	Присутня	Відсутня
11	КПП та адміністративні будівлі	Присутній	Відсутній
12	Водовідні канали (дренаж)	Видні, якщо поверхневі; не виявляються, якщо підземні	Відсутні
13	Місце розташування	Землі, що відведені під полігони ТПВ мають цільове призначення 11.02 «Для розміщення та експлуатації основних, підсобних і допоміжних будівель та споруд підприємств переробної, машинобудівної та іншої промисловості». Просторову інформацію щодо полігонів ТБО мається на Публічній кадастровій карті [7]	Околиці населених пунктів, промислові зони. Часто зустрічаються на околиці населених пунктів з забудовою сільсько-го типу, вздовж доріг. Незаконні звалища часто розташовані в ярах та балках та лісосмугах

3. Аналіз різночасових знімків з метою визначення динаміки зміни площ сміттєзвалищ, який полягає в порівнянні геометричних характеристик складування ТПВ за певний проміжок часу. В результаті аналізу визначається щорічна динаміка, а

також вихід місць звалення сміття за контури ліцензійної ділянки.

4. Спостереження за виконанням робіт по засипанню глиною чи будівельними матеріалами ділянки сміттєзвалища для забезпечення гідроізоляції

грунтових вод від фільтрату. Даний етап простежується на різночасових знімках або даних з безпілотних літальних апаратів.

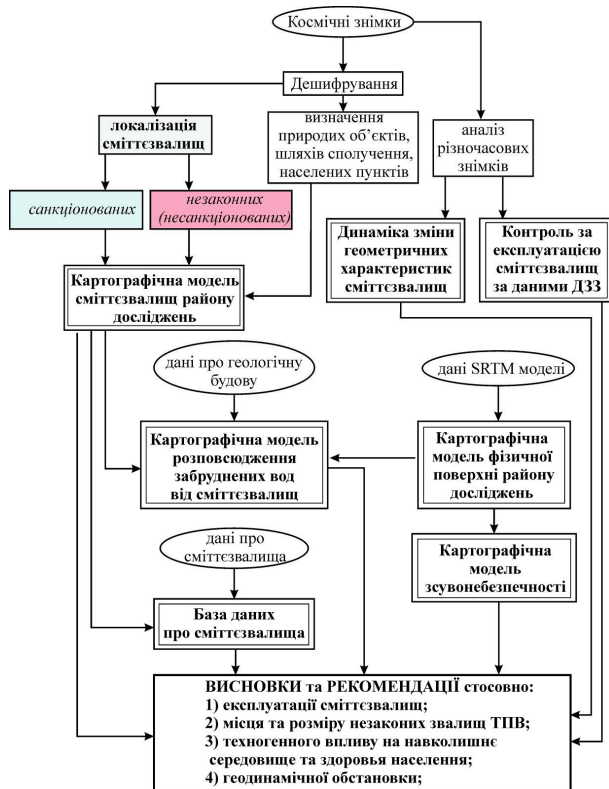


Рис. 2. Структурна схема системи космічного моніторингу за сміттєзвалищами ТПВ

5. Побудова картографічних моделей виявлених санкціонованих та не санкціонованих сміттєзвалищ. Полягає в створенні в геоінформаційному програмному продукті ArcGIS картографічних матеріалів з нанесенням шарів доріг, гідрографії, рослинності, населених пунктів тощо. На оглядових картах масштабу 1:100 000-1:500 000 сміттєзвалища позначаються умовними позначками, а на детальних картах та планах (масштаб 1:2000-1:10 000) виносяться контури сміттєзвалища з зонуванням.

6. Розробка карти зсувонебезпечності за даними SRTM моделі [8]. Методика створення геодинамічної карти полягає в обробці даних SRTM в ArcGIS. На початку, за допомогою функції Slope в ArcToolbox автоматично розраховується крутизна схилів. Далі визначається ризик виникнення зсувів за допомогою функції Symbology [9].

7. Оцінка впливу несанкціонованих сміттєзвалищ на підземну та поверхневу гідросферу. В умовах обмеженої апріорної інформації для оцінки негативного впливу звалищ ТПВ розроблена методика, яка дозволяє визначати час проникнення забруднення до підземних вод, глибини залягання першого від поверхні водоносного горизонту за даними ДЗЗ, зони потенційного забруднення підземних вод, місця розвантаження забруднених підземних вод, ділянки населених пунктів, що потрапляють в зону за-

бруднення поверхневими і підземними вод. Розроблена методика детально описана в роботах [10]

8. Результатом розробленої системи космічного моніторингу є рекомендації та висновки відносно експлуатації сміттєзвалищ, місця та розміру законних та незаконних звалищ ТПВ, відповідність контурам ліцензійної ділянки, техногенного впливу на навколишнє середовище, прогнозу захворюваності населення; геодинамічної обстановки.

Результати

У якості тестової ділянки для проведення екологічного моніторингу сміттєзвалищ був вибраний Золочівський район Львівської області.

За наведеною вище методикою у Золочівському районі Львівської області локалізовано два сміттєзвалища: Єлиховське, що розташоване в 700 м на північний схід в м. Золочів, та Сасівське, яке розташоване в 0,5 км на схід від с. Сасів (рис. 3). Сасівське звалище ТПВ є незаконним. В період з 2006 по 2013 рр збільшилося на 58% (рис. 4). Єлиховське сміттєзвалище є санкціонованим, займає площу 6,7 га та обладнане лінією сортування сміття (рис. 5). Після спорудження лінії сортування сміття площа звалища не збільшувалася. Оцінка зсувонебезпечності за даними SRTM моделі показало, що ідентифіковані звалища розташовані в межах зони з низькою вірогідністю зсувів (рис. 6).

За розробленими моделями отриманий час проникнення забруднення зі сміттєзвалищ до рівня першого від поверхні водоносного горизонту. Так, для сміттєзвалища ТПВ неподалік с. Єлиховичі час фільтрації становить 9-12 діб, а для несанкціонованого Сасівського – 1-2 доби.

На рис. 7 показано розповсюдження забруднених підземних вод від сміттєзвалищ. Після досягнення отруйним фільтратом рівня ґрунтових вод від сміттєзвалища ТПВ біля с. Єлиховичі, забруднений потік підземних вод буде рухатися у південно-західному напрямку до балки, а потім змінить напрямок на захід та буди просуватися до Шевченківського водосховища, яке розташоване на р. Золочівка. Проведений моніторинг за сміттєзвалищами ТПВ Золочівського району показав гостру необхідність запровадження моніторингу не тільки цього району, а і Львівської області та й усієї території України.

Отримані результати були обговорені на круглому столі у м. Золочеві за темою: «Деякі аспекти експлуатації, моніторингу полігонів побутових відходів із застосуванням геоінформаційних технологій» [11]. Виражаємо подяку голові Золочівської РДА Недзельському В.Й. у сприянні досліджень та Захарчуку Є. за організацію круглого столу для донесення інформації до населення й створення науково-впроваджувальний консорціуму «ЕКОГІС-Л-Х» (ECOGIS-L-Kh).

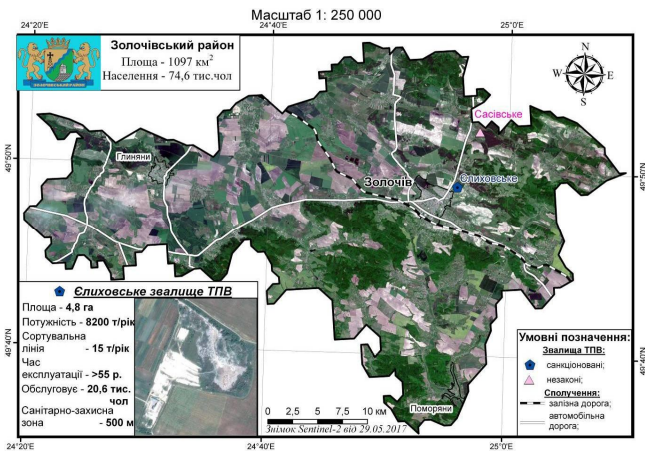
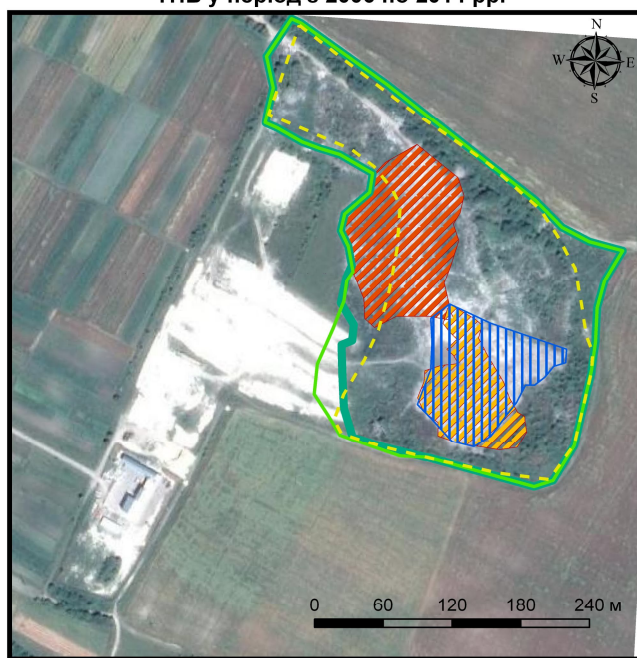


Рис. 3. Картографічна модель сміттєзвалищ Золочівського району

Динаміка зміни площі Єлиховського звалища ТПВ у період з 2006 по 2014 рр.



Динаміка зміни площі звалення сміття та рослинності Єлиховського звалища ТПВ

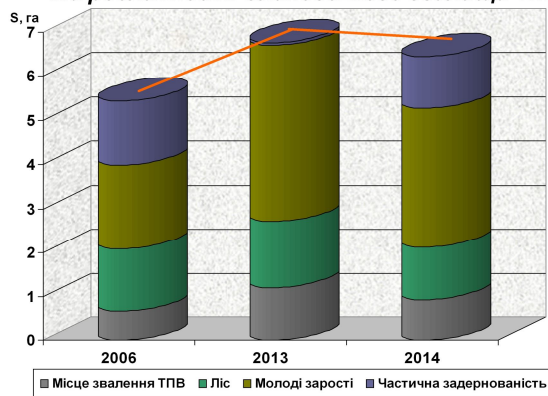


Рис. 5. Динаміка зміни площі санкціонованого Єлиховського сміттєзвалища

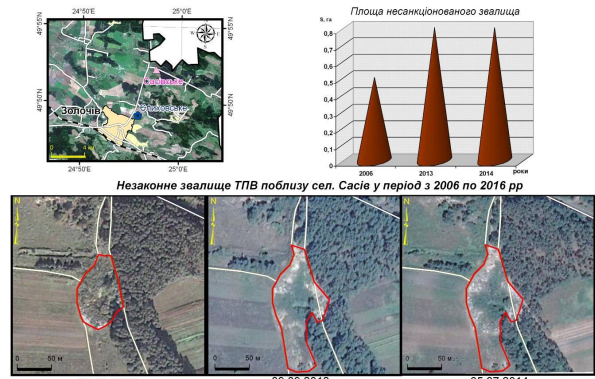


Рис. 4. Динаміка зміни площі незаконного звалища ТПВ поблизу с. Сасів

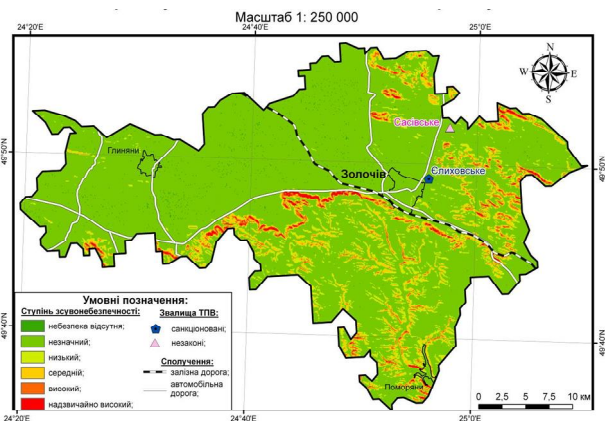


Рис. 6. Картографічна модель зсувонебезпечності Золочівського району

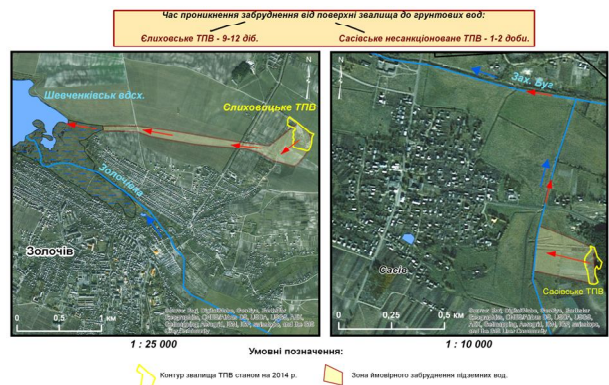


Рис. 7. Картографічна модель забруднення підземної та поверхневої гідросфери від сміттєзвалищ ТПВ

Висновки

Розроблена система космічного моніторингу законних та несанкціонованих сміттєзвалищ дозволяє оперативно локалізувати та ідентифікувати звалища ТПВ для своєчасного прийняття рішення щодо недопущення забруднення навколишнього середовища. Практична реалізація на прикладі Золочівського району Львівської області показала нагальну впровадження системи космічного моніторингу за санкціонованими та несанкціонованими сміттєзвалищами в Україні.

Список літератури

1. Державна служба статистики України. Утворення та поводження з відходами (1994-2016) [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2006/ns_rik/ns_u/orar_u2005.html. – Дата доступу: 27.01.2018.

2. ДБН В.2.4-2-2005. Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування [Текст]. – Київ : Держбуд України, 2005. – 67 с.

3. Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2016 рік. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://blagoustriv.info/statistics/43/show/>. – Дата доступу: 29.0.2017.

4. Глухов В. В. Экономические основы экологии [Текст] : Учебник для вузов 3-е изд / В. В. Глухов, Т. П. Некрасова, Т. В. Лисочкина. – С. Петербург : Питер, 2003. – 384 с.

5. Ерошина Д. М. Экологические аспекты захоронения твердых коммунальных отходов на полигонах / Д.М. Ерошина, В.В. Ходин, В.С. Зубрицкий, А.Л. Демидов. – Минск: «Бел НИЦ «Экология», 2010. – 152 с.

6. Экология: природопользование, инженерная защита окружающей среды : Учеб./ И.Г. Мельцаев, А.Ф. Сорокин, С.Г. Андрианов, А.М. Осипов. – Иваново: ГОУВ-ПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», 2008. – 552 с.

7. Публічна кадастрова карта [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://map.land.gov.ua/kadastrova-karta> – Дата доступу: 25.02.2018.

8. Earth Resources Observation and Science (EROS) Center [Electronic resource]. – Available: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version1/Eurasia/>.

9. Зыонг М.Х. Региональный прогноз оползневой опасности для района Ха Лонг – Кам Фа на северо-востоке Вьетнама / М.Х. Зыонг, И.К. Фоменко, В.В. Пендин // Инженерная геология. – 2013. – Вып. №1. – С. 46-54/

10. Горелик, С. И. Определение зон возможных подтоплений в условиях ограниченной априорной информации [Текст] / С. И. Горелик // Системы обработки информации : сб. науч. пр. Харк. ун-ту Повітряних сил ім. Івана Кожедуба. – 2014. – № 118. – С. 258-262.

11. Круглий стіл з проблем моніторингу полігонів відходів з застосуванням геоінформаційних технологій та космічної інформації. Західний науковий центр НАН України та МОН України [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://znc.com.ua/ukr/news/2016/201710_zolochiv.php. – Дата доступу: 05.11.2017.

Надійшла до редколегії 26.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.І. Адаменко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

СИСТЕМА КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ЗА СВАЛКАМИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

О.С. Бутенко, О.В. Барабаш, С.И. Горелик, А.А. Никитин

В данной работе представлены основные принципы, по созданию системы космического мониторинга свалок, с целью оперативного выявления несанкционированных свалок. Показано техногенное воздействие свалок твердых бытовых отходов (ТБО) на подземные и поверхностные воды, почвы и атмосферный воздух. Приведены возможные последствия для здоровья человека от загрязняющих веществ, выделяемых из свалок, которые концентрируются не только в воздухе, но и в почвах и подземных водах. Проанализированы последние исследования в области идентификации и локализации полигонов ТБО. Приведена методика создания такой системы космического мониторинга свалок. Приведены основные требования к данным ДЗЗ с целью наиболее точного нахождения и идентификации законных и незаконных свалок. Описанные прямые и косвенные дешифрующие признаки санкционированных и несанкционированных свалок ТБО. Для подтверждения правильности представленной методики проведен сравнительный анализ результатов ее работы с реальными данными и показана практическая реализация предложенной системы космического мониторинга на примере Золочевского района Львовской области. Построенные картографические модели загрязнения подземной и поверхностной гидросферы от свалок ТБО, позволяют оперативно принимать решения по предупреждению негативных последствий, которые могут быть вызваны этими видами загрязнения. В том числе показано влияние компонентов фильтрата на развитие различных видов болезней, которые вызывают накопление загрязняющих веществ, являющихся результатом загрязнения окружающей среды от свалок, как санкционированных так и несанкционированных. Показано, что разработанная система космического мониторинга законных и несанкционированных свалок позволяет оперативно локализовать и идентифицировать эти свалки ТБО для своевременного принятия решения по недопущению загрязнения окружающей среды.

Ключевые слова: ДЗЗ, свалки ТБО, загрязнения, космический мониторинг, подземные воды, поверхностные воды, Золочев.

SPACE MONITORING SYSTEM FOR LANDFILL FOR OPERATIONAL DETECTION OF UNAUTHORIZED LANDFILLS

O.S. Butenko, O.V. Barabfsh, S.I. Gorelik, A.A. Nikitin

In this paper, the main principles for the establishment of a space monitoring system for landfill for operational detection of unauthorized landfills are presented. It is shown the technogenic influence of landfills of solid household waste (TPW) on underground and surface water, soils and atmospheric air. The possible consequences for human health from pollutants released from landfills are concentrated and concentrated not only in the air, but also in soils and underground waters. Recent researches on identification and localization of solid waste landfills have been analyzed. The technique of creation of such a system of space monitoring of landfills is given. The basic requirements for remote sensing data are given in order to find and identify legitimate and illegal landfills most precisely. Described are direct and indirect decoding signs of authorized and unauthorized landfill of solid waste. In order to confirm the correctness of the presented methodology, a comparative analysis of the results of its work with real data was carried out and the practical realization of the proposed space monitoring system on the example of Zolochivsky rayon of Lviv region is shown. The cartographic models of pollution of the underground and surface hydrosphere from waste landfills of the landfill are constructed allowing to make prompt decisions on preventing the negative consequences that can be caused by these types of pollution. Including shows the influence of the components of filtrate on the development of various types of diseases that cause the accumulation of pollutants, which is the result of environmental pollution from landfills, both sanctioned and unauthorized. It has been shown that the developed system of space monitoring of legal and unauthorized landfills allows for the rapid localization and identification of these landfills for timely decision-making on preventing environmental pollution.

Keywords: remote sensing, landfill, landfill, pollution, space monitoring, groundwater, surface water, Zolochiv.

Л.О. Левченко, О.С. Сідько

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ

ЗАСТОСУВАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ АВІАЦІЙНОГО ШУМУ

Авіаційний шум залишається значним негативним чинником діяльності великих та малих аеропортів щодо його впливу на навколишнє середовище і населення, яке проживає біля аеропорту. В роботі запропоновано оцінювання авіаційного шуму в районі аеропорту шляхом моделювання з урахуванням міжнародних та правових аспектів, застосуванням ГІС-технології для візуалізації розрахованих контурів авіаційного шуму. Наведено схему компонентів програмного забезпечення для моделювання рівнів авіаційного шуму в районі аеропорту. Представлено результати розрахунку сценарію етапу зльоту літаків компанії Embraer та Airbus в аеропорту «Херсон».

Ключові слова: моніторинг, авіаційний шум, програмне забезпечення, критерії оцінки, рівні шуму, контури шуму, ГІС-технологія.

Вступ

Постановка проблеми. Глобалізація світової економіки зумовлює активізацію міждержавних господарських зв'язків, суттєво посилюючи роль транспорту, зокрема авіаційного. В Україні значно збільшився попит на авіаперевезення, що є важливим фактором економічного зростання. За даними Державної авіаційної служби України [1] у 2017 році пасажиропотоки через аеропорти України показали історичний максимум. Так, упродовж 2017 року українські авіакомпанії перевезли рекордну кількість пасажирів – 10,55 млн. осіб. В українських аеропортах пасажиропотоки за рік збільшилися на 27,6% до 16,5 млн осіб, у тому числі у міжнародному сполученні – на 29% до 14,9 млн осіб. У першу чергу, це пов'язано із введенням безвізового режиму з ЄС, що стало поштовхом суттєвого нарощування іноземних авіакомпаній на ринку авіаліній в Україні, бажанням активних українців працевлаштуватися у країнах Євросоюзу, розвитком туризму, поліпшенням регуляторного середовища на авіаперевезення. Також збільшилися і обсяги перевезень вантажів та пошти на 26,6 відсотка та склали 37,6 тис. тонн [2]. Найбільше шумове забруднення навколишнього середовища відбувається у зоні аеропортів під час посадки і зльоту літаків, а також під час прогріву їх двигунів. Проблема несприятливого впливу авіаційного шуму як на населення, яке проживає навколо аеропорту, так і на довкілля, залишається актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [3] запропоновано концепцію щодо побудови системи моніторингу авіаційного шуму. У роботах [4–5] наведено методичний підхід та результати моделювання щодо оцінювання шумового навантаження у зоні аеропорту шляхом з урахуванням національних гігієнічних нормативів.

Однак такий підхід не враховував застосування ГІС-платформи як основи, яка може відображати різноманітні шари даних різних об'єктів інфраструктури аеропорту, накладання розрахованих контурів шуму на ГІС-карти із загально доступних Інтернет-сервісів.

Моніторинг рівнів шуму в аеропортах європейських міст досліджено в багатьох роботах [6–10]. Більшість дослідників зосереджують увагу на негативному впливі шуму повітряного руху на здоров'я людини та навколишнє середовище. Деякі дослідники орієнтовані на оперативні заходи для зменшення негативних наслідків шуму. У роботі [6] проаналізовано зміни, пов'язані із збільшенням трафіку, та сприйняттям шуму в аеропорту Вена столиці Австрії. Автори [7] розглядають вплив шуму на гіпертензію населення, що проживає поряд з аеропортом.

У статті [8] запропоновано базову регресійну модель – «the hedonic pricing method» щодо обчислення фінансових витрат, пов'язаних із впливом шуму. Suau-Sanchez [9] запропонував структуру шуму, що дратує в аеропорту. У роботі [10] Von der Lippe була запропонована формула обчислення кореляції даних по шуму в різних містах в залежності від кількості жителів міста.

Метою статті є оцінювання впливу авіаційного шуму на оточуюче середовище в залежності від типової конструкції літака, типу встановлених двигунів, режимів їх роботи на окремих етапах руху літака та поширення звуку в умовах чинної експлуатації в аеропортах цивільної авіації із застосуванням ГІС-технології.

Викладення основного матеріалу

За прогнозом ІКАО до 2030 року буде експлуатуватися до 30 тис. літаків, щорічний приріст кількості літаків, що вводяться в експлуатацію, ста-

новить 5% [11]. Згідно того ж прогнозу до 2040 року парк повітряних суден практично збільшиться у три рази [12]. Високі темпи розвитку повітряного транспорту призвели до збільшення екологічних проблем в районі аеропорту [13].

Основними екологічними чинниками, пов'язаними з діяльністю авіації, є: шум літального апарату, шкідливі викиди авіадвигунів, звукові удари, що виникають при польотах надзвукових літаків [11]. Між тим, слід зазначити, що в цивільній авіації відбулося зміщення щодо пріоритетних завдань, а саме, на першому місці залишається безпека польотів, друге місце посідають більш жорстокі вимоги щодо екологічних характеристик повітряних суден. Головним завданням роботи Комітету ІКАО із захисту навколишнього середовища від впливу авіації (САЕР) є обмеження допустимого рівня шуму літаків та емісії шкідливих речовин, тому САЕР ініціює виробників авіаційної техніки впроваджувати новітні технології зниження шуму в їх конструкцію. У Резолюції 39-ї Асамблеї ІКАО [14] схвалено введення у дію нового більш жорсткого стандарту по шуму, який на 7 EPN дБ нижче за діючого стандарту. Новий стандарт вводиться у дію з 31 грудня 2017 року і застосовується до повітряних суден нової конфігурації, що вводяться у експлуатацію у 2017 році та до повітряних суден меншої ваги – до 2020 року. Відповідно до цього стандарту у 2017 році гранично допустимі рівні шуму у дозвукових реактивних літаків для максимальної злітної ваги літака 27 200 кг становлять 95 дБ, для максимальної злітної ваги 34 000 кг – 85 дБ. Крім того, з 2019 року буде запроваджено новий міжнародний стандарт щодо визначення допустимого рівня шкідливих викидів двигунів літаків.

У зв'язку з цим Міністром інфраструктури України Олександром Омеляном 26 січня 2017 року в було підписано з Повноважним послом Сполучених Штатів Америки Марі Йованович «Меморандум про взаєморозуміння про зниження впливу авіації на навколишнє середовище». Цей Меморандум передбачає співпрацю фахівців українського авіапрому, Державіаслужби з колегами із Центру сталого розвитку США щодо зменшення негативних впливів від авіаційних викидів, застосування найбільш передових технологій та набуття досвіду західних колег.

Враховуючи особливості конкретного аеропорту, відповідно до документу ІКАО Doc 9829, пропонується запроваджувати збалансований підхід щодо управління авіаційним шумом [15]. Такий підхід є гнучким щодо виявлення конкретної проблеми шуму і розрахований на врахування особливостей експлуатації повітряних суден в окремому аеропорту з метою визначення заходів щодо вирішення такої проблеми.

Збалансований підхід містить чотири складові: зниження шуму в джерелі, планування і організація землекористування, експлуатаційні прийоми зниження шуму, експлуатаційні обмеження щодо повітряних суден. ІКАО наполегливо рекомендує державам для реалізації збалансованого підходу ввести так званий транспарантний, тобто прозорий, процес щодо моніторингу оцінювання досягнення шумового показника і розгляду заходів, спрямованих на усунення проблеми шуму там, де вона існує.

Компонентами цього прозорого процесу є наступні: оцінювання існуючого та майбутнього впливів шуму у відповідному аеропорту у порівнянні з таким, що підлягає досягненню шумового показника; оцінка ймовірних витрат і вигоди щодо прийняття різних наявних заходів; вибір заходів з метою отримання максимальних екологічних переваг з найбільш ефективним з точки зору витрат способом; забезпечення поширення результатів оцінки; проведення консультацій з зацікавленими сторонами на різних етапах процесу від оцінки до реалізації; створення механізму вирішення спорів.

Такий підхід в аеропортах є екологічно вигідним і економічно ефективним засобом. З метою реалізації збалансованого підходу для оцінювання шумового навантаження у зоні аеропорту розроблено систему моніторингу авіаційного шуму. Така система відповідає документу ІКАО DOC 9911 [16], який є стандартом для моделювання та оцінювання контурів шуму з урахуванням санітарно-гігієнічних нормативів впливу шуму відповідно до національних та міжнародних законодавчих актів.

Дане дослідження є подальшим розвитком і удосконаленням побудови системи моніторингу авіаційного шуму, наведених у роботах [3–5].

Метод розрахунку рівнів авіаційного шуму враховує етапи зльоту, посадки літаків згідно DOC 9911, а також використовує акустичні та льотно-технічні характеристики літаків з міжнародної бази даних ANP виробників повітряних суден [17]. Для візуалізації результатів моделювання було обрано геоінформаційну систему Quantum GIS (QGIS), яка є безкоштовною для користувача, на відміну від відомих на ринку комерційних ГІС-систем ArcGIS, MapInfo, GRASS GIS, SAGA GIS. QGIS є відкритою системою, яка підтримує великий набір растрових і векторних форматів, забезпечує широкий спектр баз даних різних типів. За своїми функціональними можливостями QGIS не поступається своєму найближчому конкуренту ArcGIS. Ця ГІС-система активно підтримується спільнотою розробників QGIS Development Team. Метою розробників було створення геоінформаційної системи, яка має бути безкоштовною, з повноцінним функціоналом, легким та комфортним інтерфейсом для користувача.

На рис. 1 наведено узагальнену схему програмних компонентів системи. Дослідження акустичного стану аеропорту проводилося на прикладі аеропорту «Херсон», карта якого наведена на рис. 2.

Було протестовано набір сценаріїв щодо акустичного навантаження протягом доби з урахуванням різних типів літаків, кількості встановлених двигунів, набору критеріїв щодо оцінювання шуму, режимів експлуатації. На рис. 3 наведено вихідні дані щодо характеристик аеропорту «Херсон». На рис. 4 наведено сценарій моделювання зльоту літаків компаній Embraer та Airbus, які експлуатуються в аеропорту «Херсон» у денний час з використанням критерію оцінювання L_{Amax} .

нів, набору критеріїв щодо оцінювання шуму, режимів експлуатації. На рис. 3 наведено вихідні дані щодо характеристик аеропорту «Херсон». На рис. 4 наведено сценарій моделювання зльоту літаків компаній Embraer та Airbus, які експлуатуються в аеропорту «Херсон» у денний час з використанням критерію оцінювання L_{Amax} .

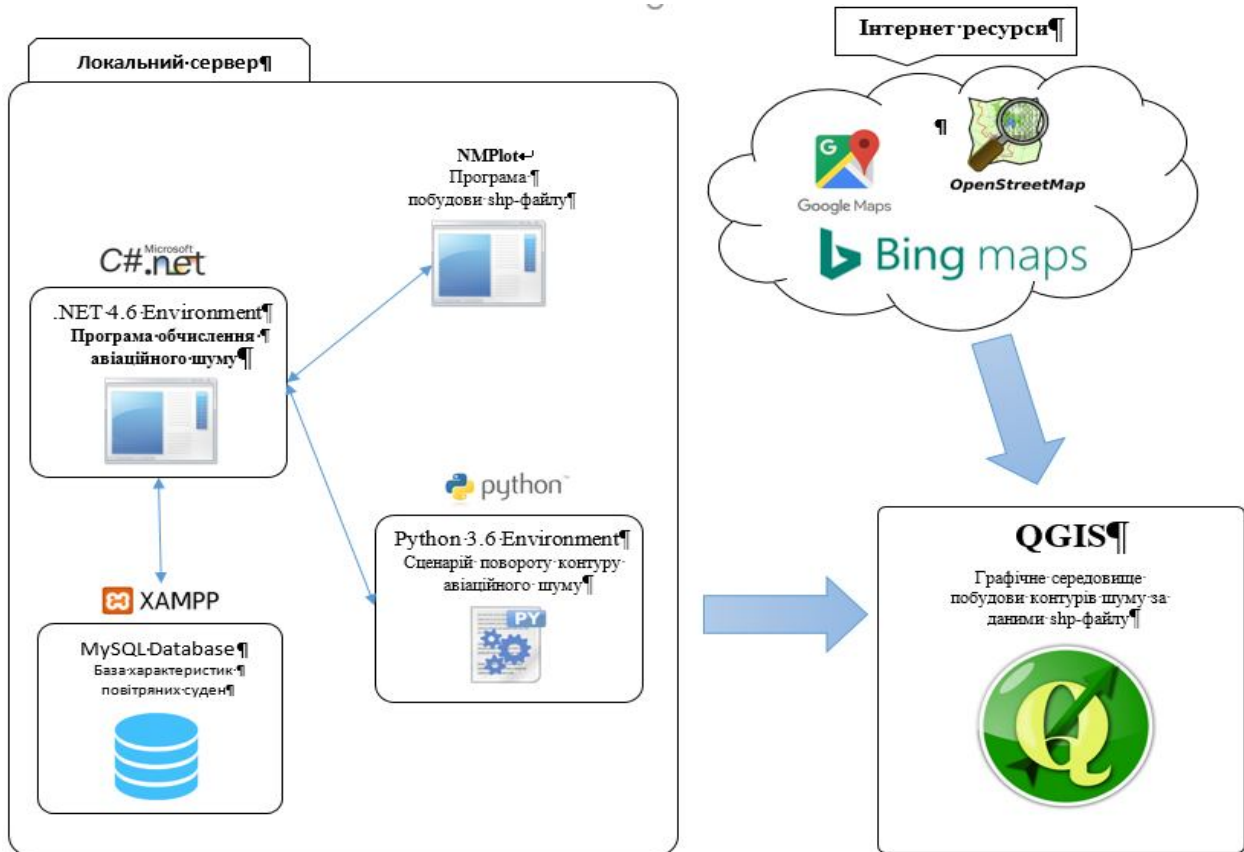


Рис. 1. Узагальнена схема програмних компонентів системи

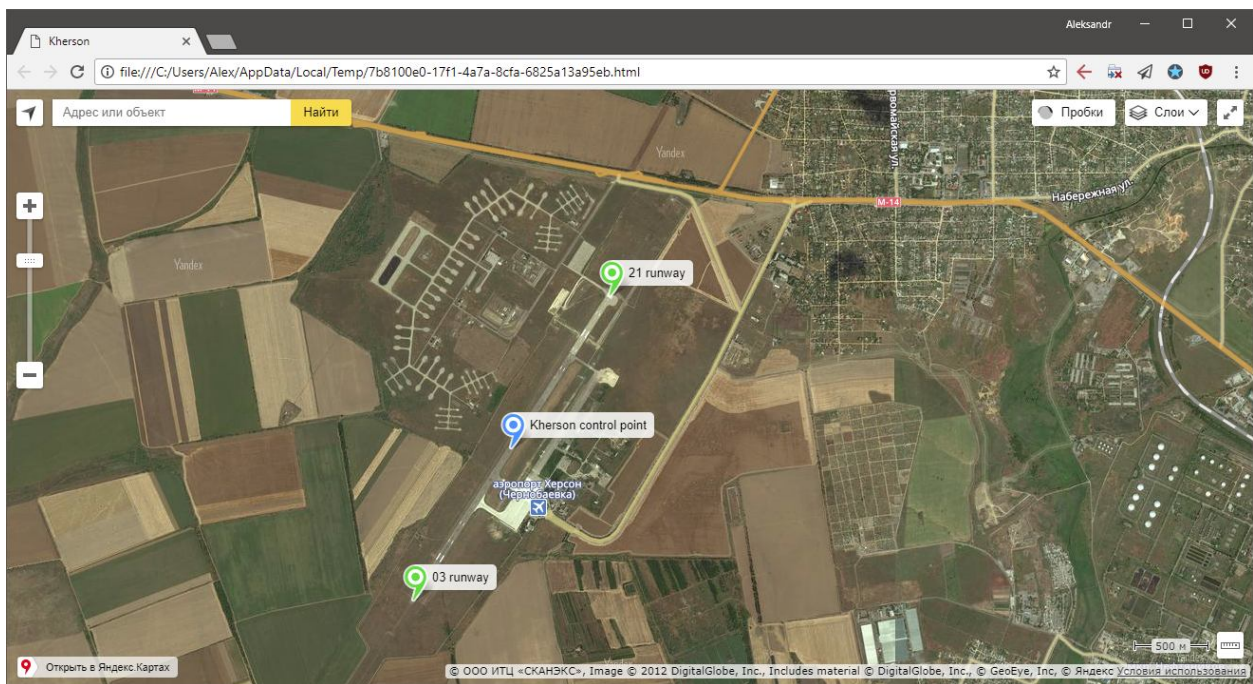


Рис. 2. Карта аеропорту «Херсон»

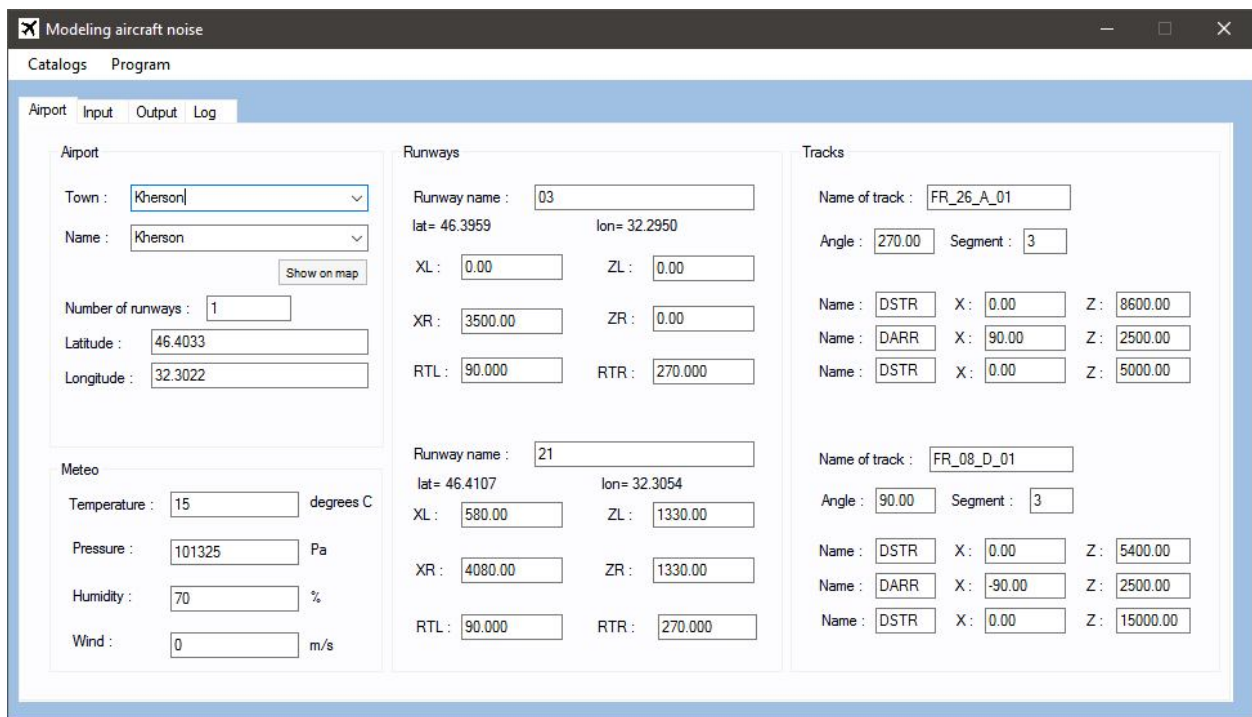


Рис. 3. Вихідні дані аеропорту «Херсон»

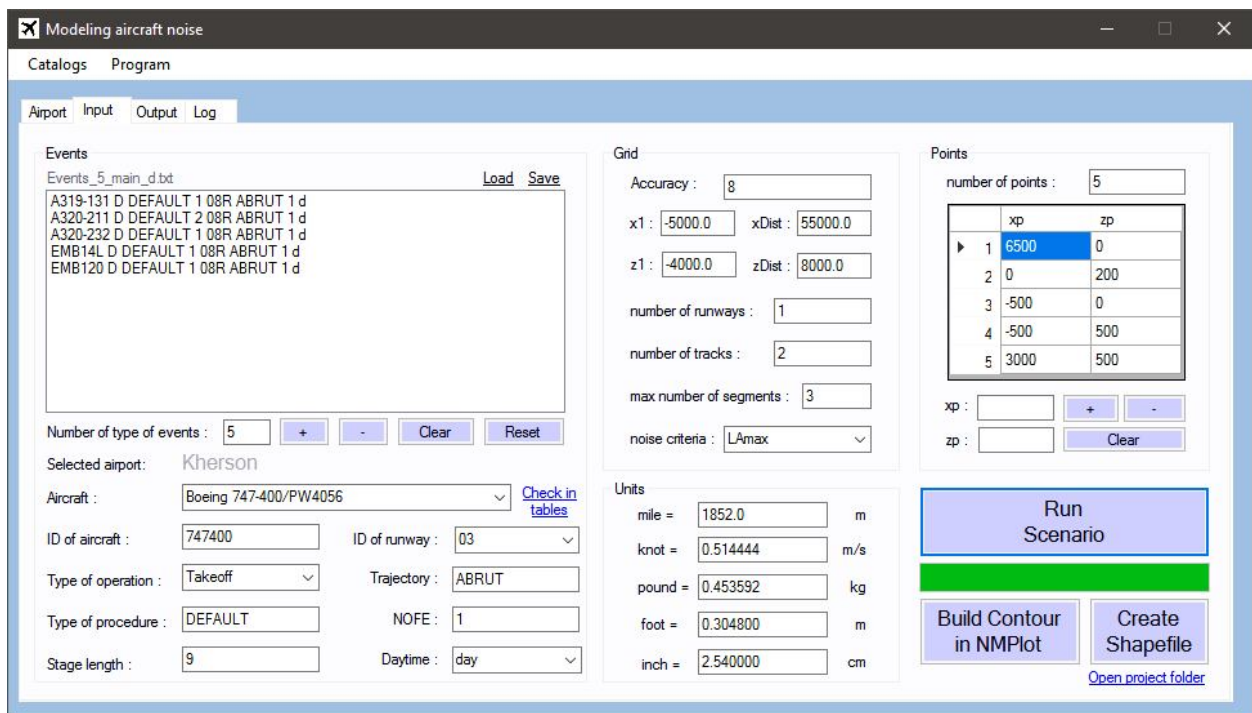


Рис. 4. Сценарій моделювання зльоту

В Україні застосовуються два критерії щодо рівнів шуму з урахуванням зон забудови (А - територія без обмежень для будівництва споруд будь-якого призначення, Б та В - території з обмеженнями, Г - непридатна територія до житлової забудови) [18], а саме:

L_{Amax} – максимальний рівень шуму з коригованою частотною смугою відповідно до шкали «А» стандартного вимірювача шуму;

L_{Aeq} – еквівалентний рівень шуму.

На відміну від національного нормативу по шуму в міжнародному документі DOC 9911 використовується тільки один критерій - L_{Amax} .

Так, в Україні для денного періоду (від 07.00 до 23.00) для зони А встановлені нормативи:

$$L_{Aeq} \leq 60 \text{ дБА}, L_{Amax} \leq 80 \text{ дБА},$$

для нічного періоду (від 23.00 до 07.00):

$$L_{Aeq} \leq 50 \text{ дБА}, L_{Amax} \leq 70 \text{ дБА}.$$

Для зони Б для денного періоду (від 07.00 до 23.00) визначено нормативи:

$61 \text{ дБА} \leq L_{\text{Аекв}} \leq 65 \text{ дБА}$ та $81 \text{ дБА} \leq L_{\text{Аmax}} \leq 85 \text{ дБА}$,
для нічного періоду (від 23.00 до 07.00):

$51 \text{ дБА} \leq L_{\text{Аекв}} \leq 55 \text{ дБА}$, $71 \text{ дБА} \leq L_{\text{Аmax}} \leq 75 \text{ дБА}$.

Для порівняння з іншими країнами нормативні максимальні рівні шуму від окремих прольотів літаків у денний / нічний періоди становлять для:

США – 99/89 дБА,

Великобританії – 97/89 дБА,

Нідерландів – 98/98 дБА,

Швейцарії – 100/95 дБА,

України та Росії – 85/75 дБА.

На рис. 5 наведено розраховані і побудовані контури шуму програмою NMPlot згідно сценарію моделювання, наведеного на рис. 4. На рис. 6 наведено контури шуму, перенесені на ГІС-карту.

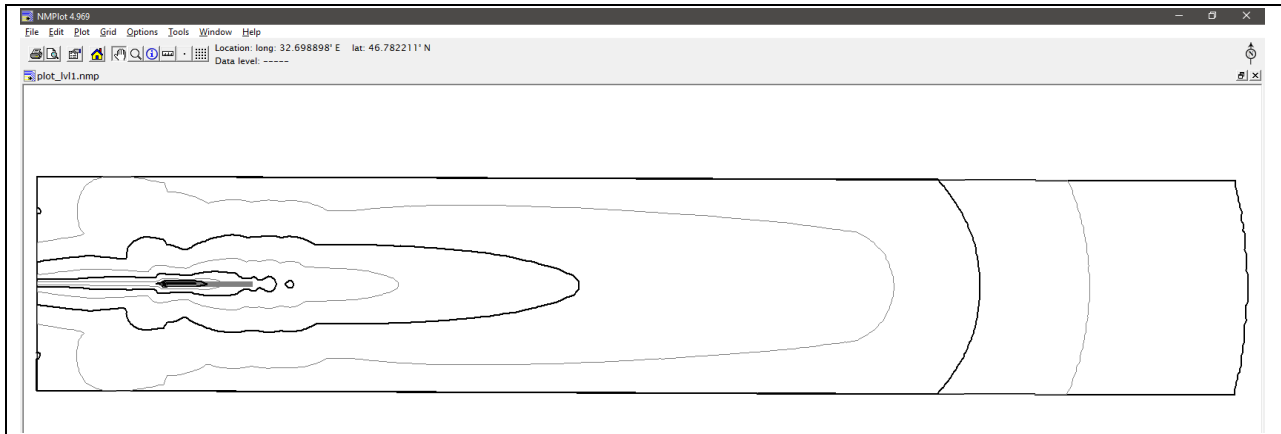


Рис. 5. Контури рівнів шуму, побудовані програмою NMPlot

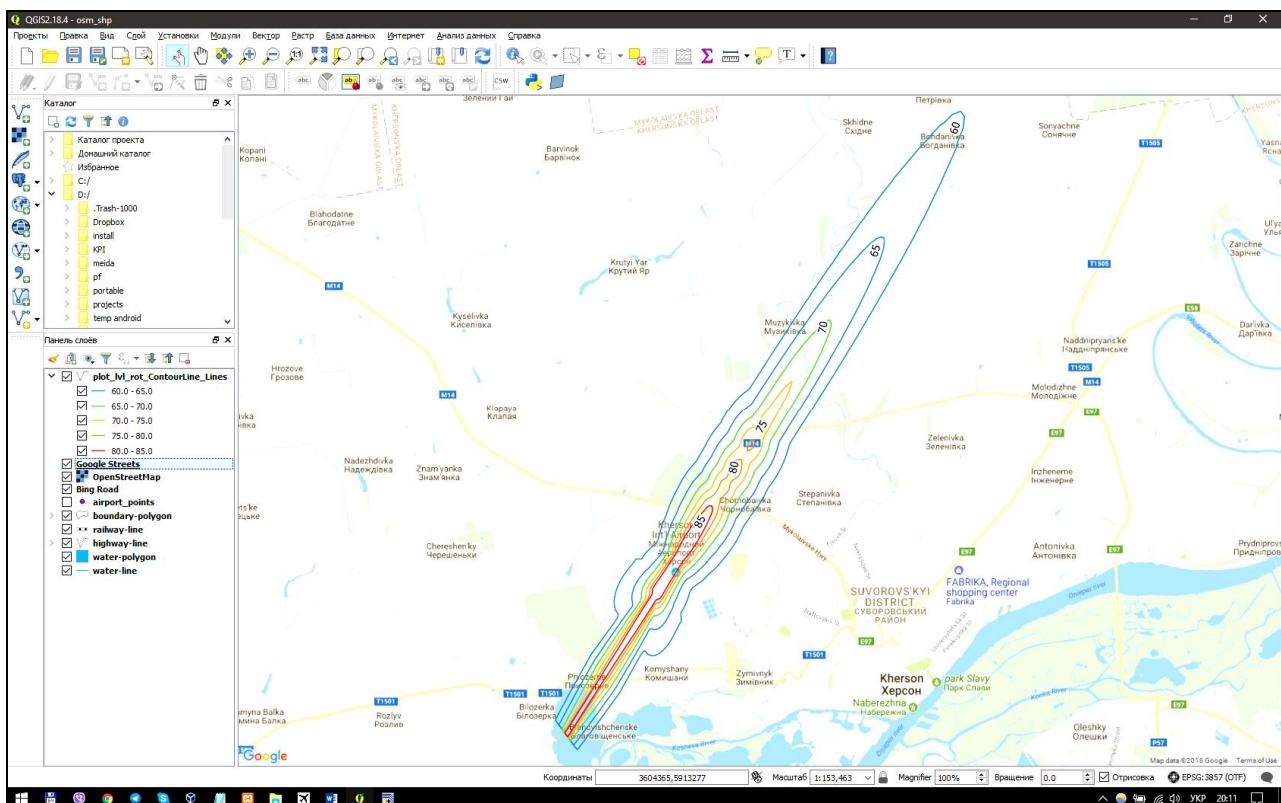


Рис. 6. Контури рівнів шуму, нанесені на ГІС-карту

Результати моделювання показують, що розраховані контури рівнів шуму відповідають гранично допустимим значенням.

Висновки

1. Запропоновано застосування збалансованого підходу як механізм індивідуального підходу

управління авіаційним шумом з урахуванням особливостей конкретного аеропорту.

2. Доведено, що моделювання розрахунків рівнів авіаційного шуму є мінімально затратним у порівнянні з експлуатаційними обмеженнями для оцінювання і прогнозування акустичної обстановки як у поточний час, так і на перспективу.

3. Запропоновано і реалізовано застосування ГІС-технології для візуалізації розрахованих контурів шуму в районі аеропорту та об'єктів аеропорту.

4. Наведено результати розрахунку сценарію етапу зльоту двох літаків бразильської авіабудівної компанії Embraer (EMB14L, EMB120) та трьох літаків європейської авіабудівної компанії Airbus (A319-131, A320-211, A320-232), які виконують польоти в аеропорту «Херсон».

Встановлено, що рівні шуму біля злітно-посадкової смуги є гранично-допустимими.

Список літератури

1. Топалов М. Авіап перевезення б'ють рекорди: чому це добре для пасажирів / М. Топалов. – URL: <https://www.epravda.com.ua/publications/2018/02/8/633878>.
2. Статистичні дані в галузі авіатранспорту // Міністерство інфраструктури України. – URL: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-v-galuzi-aviatransportu.html>.
3. Левченко Л.О. Концептуальний підхід до побудови системи моніторингу авіаційного шуму / Л.О. Левченко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – Вип.2 (34). – С. 120 – 123.
4. Левченко Л.О. Моделювання шумового навантаження, утвореного повітряними суднами / Л.О. Левченко // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2015. – Вип.3 (35). – С. 170 – 173.
5. Запорожець О.І. Оцінювання шумового впливу від повітряних суден в районі аеропорту / О.І. Запорожець, Л.О. Левченко // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2017. – Вип. 1/2017 (102). – С. 121 – 128.
6. Jelinek-Nigitz Heidelinde Vienna International Airport Noise Abatement / Heidelinde Jelinek-Nigitz // Journal of Airline and Airport Management (JAIRM). – 2016. – Iss. 6(1). – P. 61 – 91.
7. Annoyance due to aircraft noise has increased over the years-Results of the HYENA study / W. Babisch, D. Houthuijs, G. Pershagen, E. Cadum, K. Katsouyanni, M. Veionakis et al. // Environment International (online journal). – 2009. – Iss. 35/ – P. 1169 – 1176.
8. Dekkers J. Monetary valuation of aircraft noise: A hedonic analysis around Amsterdam airport/ J. Dekkers, W. van der Straaten // Ecological Economics (online journal). – 2009. – Iss. 68. – P. 2850 – 2858.
9. Suau-Sanchez P. Incorporating annoyance in airport environmental policy: Noise, societal response and community participation / P.Suau-Sanchez, M. Pallares-Barbera, V.Paul // Journal of Transport Geography (online journal). – 2011. – 19 P.
10. Von der Lippe, P. Wie gros muss meine Stichprobengroesse sein, damit sie repraesentativist (online document) / P. Von der Lippe. – (2011). – [Available online at]: <http://www.von-der-lippe.org/dokumente/Wieviele.pdf>.
11. Копьев, В.Ф. Проблемы экологии летательных аппаратов / В.Ф. Копьев, А.Г. Мунин, С.А.Чернышев // Техника воздушного флота. – 2012. - №1. - С. 40-46.
12. Халецкий Ю.Д. ИКАО: новый стандарт на шум самолетов гражданской авиации / Ю.Д. Халецкий // Двигатель. – 2014. – № 2. – С. 8–11.
13. Халецкий, Ю. Д. Экологические проблемы авиации / Ю. Д. Халецкий. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 504 с.
14. ICAO АССАМБЛЕЯ – 39-я СЕССИЯ, Монреаль, 27 сентября – 6 октября 2016 года. – 148 с.
15. ICAO DOC 9829 AN/451 Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management Ed 2. – Canada, Montreal: ICAO, 2008. – 130 p.
16. Doc 9911, Руководство по рекомендуемому методу расчета контуров шума вокруг аэропортов. ИКАО. – 2008. – 131 с.
17. Aircraft and Noise Performances (ANP) Database <http://www.aircraftnoisemodel.org>.
18. Державні санітарні норми і правила планування та забудови населених пунктів. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 19.06.96 № 173. – К.: Укрбудінформ, 2002. – 59 с.

Надійшла до редколегії 26.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.І. Запорожець, Національний авіаційний університет, Київ.

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВИАЦИОННОГО ШУМА

Л.А. Левченко, А.С. Сидько

Авиационный шум остается значительным негативным фактором деятельности крупных и малых аэропортов касательно его влияния на окружающую среду и население, проживающее возле аэропорта. В работе предложено оценивание авиационного шума в районе аэропорта, используя моделирование, с учетом международных и правовых аспектов, применением ГИС-технологии для визуализации рассчитанных контуров авиационного шума. Приведена схема компонентов программного обеспечения для моделирования уровней авиационного шума в районе аэропорта. Представлены результаты расчета сценария этапа взлета самолетов компаний Embraer и Airbus в аэропорту «Херсон».

Ключевые слова: мониторинг, авиационный шум, программное обеспечение, критерии оценки, уровни шума, контуры шума, ГИС-технология.

GIS-TECHNOLOGY APPLICATION FOR THE VISUALIZATION THE MODELING RESULTS OF THE SPREADING AIRCRAFT NOISE

L.A. Levchenko, O.S. Sidko

Aircraft noise is remained a significant negative factor in the activities of large and small airports regarding its impact on the environment and the population living near the airport. In this paper is proposed the estimation of aircraft noise in the airport area with the using modeling, taking into account international and legal aspects, the using of GIS technology to visualize the calculated contours of aircraft noise. A scheme of software components for modeling aircraft noise levels in the airport area is presented. The results of the calculation the scenario the take-off stage aircrafts of Embraer and Airbus companies at the airport "Kherson" are presented.

Keywords: monitoring, aircraft noise, the software, evaluation criteria, noise levels, noise contours, GIS-technology.

И.Ю. Чернявский¹, С.Ю. Петрухин¹, В.Б. Матыкин¹, В.Е. Гайдабука¹, В.В. Тютюник²

¹ Военный институт танковых войск НТУ «ХПИ», Харьков

² Национальный университет гражданской защиты Украины, Харьков

ИНФОРМАЦИОННО-ЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧЁТА НЕОБХОДИМЫХ И ДОСТАТОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

В работе анализируются закономерности в оценке полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации боеприпасов различного типа, необходимые и достаточные параметры для корректной оценки доз гамма-нейтронного излучения. На основе использования функционально-структурного подхода, при котором сетевая структура оценки полей гамма-нейтронного излучения формируется целенаправленно, описывая предметное пространство в виде системы логических уравнений на языке алгебры предикатов, разработана информационно-логическая модель, которая может быть использована в системах радиационного мониторинга.

Ключевые слова: информационно-логическая модель, функционально-структурный подход, гамма-нейтронное излучение проникающей радиации, тип боеприпаса.

Введение

Постановка проблемы. Для каждой мощности и вида ядерного взрыва, а для боеприпасов малого и сверхмалого калибров – и типа боеприпаса, существует определённая закономерность изменения вероятности определённой степени радиационного поражения в зависимости от расстояния [1, 2]. Это дает возможность, используя приведённые зоны поражений, с приемлемой для ручных (штабных) расчётов точностью, оценивать тяжесть ядерных ударов, определять границы очагов как комбинированных, так и поражений «в чистом виде», пользуясь заранее составленными сравнительно простыми для практики зависимостями, графиками, таблицами.

С другой стороны, существуют полуэмпирические модели как в зарубежной [3, 4] так и в отечественной литературе [2, 5-10], полученные в результате полигонных испытаний и позволяющие рассчитывать основные параметры полей гамма-нейтронного излучения в любой точке пространства. Данные выражения с учётом многочисленных поправочных коэффициентов для каждого из типов боеприпасов не нашли своего применения, на наш взгляд, из-за неприемлемой точности существующих на тот момент времени методов и способов определения параметров ядерного взрыва, параметров среды, а также низкого уровня вычислительной техники. Основной закономерностью решения неопределённости при таком подходе является зависимость величины интервала, вмещающего истинное значение об этом параметре, от объема информации. Чем меньше информации, тем больше интервал и роль субъективного фактора. В случае полной информации интервал превращается в точное значение. Общие вопросы определения критерия оптимальности объема необходимой и достаточной

информации – соотношения её количества и ценности, – были широко исследованы в работах Горского Ю.М. [28], заложившего основы системно-информационного анализа процессов управления.

На наш взгляд данные вопросы актуальны и для задачи корректной оценки дозовых полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации боеприпасов различного типа. Создание адекватных моделей в оценке полей гамма-нейтронного излучения может способствовать совершенствованию расчётного метода прогнозирования результатов поражений [12–15], а также созданию автоматизированных систем радиационного мониторинга, оценки ситуаций и принятия оптимальных управленческих решений. Основными вопросами при создании таких моделей при оценке доз гамма-нейтронного излучения проникающей радиации (ПР), на наш взгляд, являются:

- **достоверный учёт параметров** ядерного взрыва боеприпасов сверхмалого и малого калибра. Данные вопросы нами были рассмотрены в работе [11];

- **определения типа ядерного боеприпаса**, определяемые по спектральным характеристикам нейтронного излучения. В работе [21] нами показано, что неучёт типа ядерного боеприпаса, при оценках ядерного поражения в современных условиях может привести к значительным (недопустимым) ошибкам в оценках тяжести поражения (рис. 1).

В работе Ю.Н. Тарасенко [7] обосновываются необходимые и достаточные для корректной оценки полей гамма-нейтронного излучения характеристики ПР, создаваемые при взрывах боеприпасов различного типа. Важнейшими из них являются: спектральное распределение, амплитудно-временные параметры гамма-нейтронного излучения, накопление дозы во времени и пространственно-угловое распределение ионизирующих излучений;

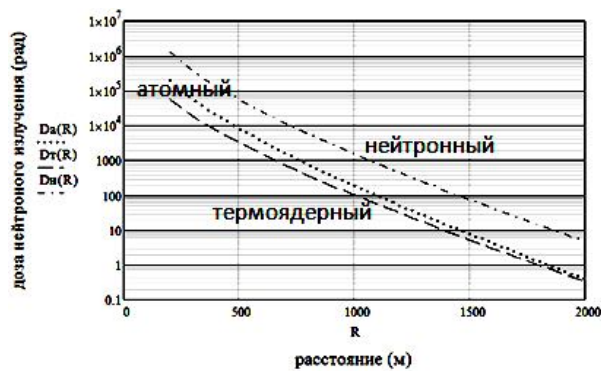


Рис. 1. Залежності дози нейтронної компоненти проникаючої радіації від відстані до центру вибуху потужністю 1 кт для різних типів боєприпасу при низькому повітряному ЯВ

- **корректне описання функцій** проходження гамма-нейтронного випромінювання в повітрі, залежачі як від енергії випромінювань, так і від параметрів середовища між центром вибуху та об'єктом. Це пов'язано з тим, що в повітрі важливу роль грають сезонні та добові зміни щільності і, в меншій ступені, зміни вологості. Як правило, це є помітним джерелом помилок розрахунку доз гамма-нейтронного випромінювання ПР. В ґрунті найбільш значиме вплив на поширення нейтронів викликає зміни вологості. Для великих відстаней від центру вибуху основною невизначеністю в результаті оцінки дози проникаючої радіації є похибка всіх констант взаємодії нейтронів та гамма-квантів визначеної енергії з речовиною. Найповніше дані питання розглянуті в роботах [16–20].

Зменшення похибки математичних моделей, що дозволяють правильно оцінювати дози гамма-нейтронного випромінювання, можливо за рахунок структурних об'єднань та обов'язкової обробки наступних основних етапів[19]:

- вибір найбільш перспективних математичних методів та створення на їх основі математичних моделей та алгоритмів, що дозволяють ефективно відтворювати проходження випромінювання в речовині при мінімальних допущеннях відносно процесів взаємодії та геометрії задачі;
- створення (обґрунтований вибір) бібліотеки константного забезпечення, що дозволяє проводити розрахунки з необхідною точністю та деталізацією.

В роботах [19, 20] зазначається, що необхідність розгляду високої ступені деталізації характеристик гамма-нейтронного випромінювання ПР з урахуванням нестационарності процесу та реальної геометрії іноді вступає в протиріччя з можливостями ЕВМ. Добитися суттєвого скорочення розрахункового часу, як правило, можна лише враховуючи конкретні особливості геометрії розв'язуваної задачі та можливості використання наявної апріорної інформації, т.е. створення спеціалізованих

баз знань для оцінки полів проникаючої радіації боєприпасів різного типу.

Повисить ефективність функціонування таких спеціалізованих баз знань в системі радіаційного моніторингу (виявлення та оцінки обстановки) цілорозумно шляхом формування цілеспрямованих структур за рахунок застосування функціонально-структурного підходу, описаного в [22]. Функції оцінки полів гамма-нейтронного випромінювання цілорозумно спочатку описати в системі логічних рівнянь на мові алгебри предикатів (АП). Предикат – це будь-яка функція $P(x_1, x_2, \dots, x_m)$, що задана в предметному просторі $S = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$, що відображає простір S в множині $B = \{0, 1\}$, де 0 і 1 – булеві змінні.

Формально операцію заміни відношення предикатом можна записати наступним чином:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_m) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x_1, x_2, \dots, x_m \in Q, \\ 0, & \text{якщо } x_1, x_2, \dots, x_m \notin Q, \end{cases}$$

де Q – відношення, а P – предикат.

Обернений перехід від предиката до відношення формально буде записано:

$$\begin{aligned} \text{якщо } P(x_1, x_2, \dots, x_m) = 1, & \text{ то } x_1, x_2, \dots, x_m \in P, \\ \text{якщо } P(x_1, x_2, \dots, x_m) = 0, & \text{ то } x_1, x_2, \dots, x_m \notin P. \end{aligned}$$

Таким чином, будь-якому відношенню Q в взаємно-однозначному відповідності стає предикат, який на мові алгебри предикатів можна записати в формі формули, використовуючи базисні предикати 0, 1, та предикат називання предмету x_i^a , а також базисні операції кон'юнкції \wedge та диз'юнкції \vee .

В результаті застосування математичного апарату алгебри предикатів дозволить перейти до єдиної математичної моделі інформаційного забезпечення системи радіаційного моніторингу, що, з нашої точки зору, є актуальним та перспективним напрямком в сучасних умовах.

Ціль роботи: на основі аналізу існуючих закономірностей в оцінці полів гамма-нейтронного випромінювання проникаючої радіації для боєприпасів різного типу виділити необхідні та достаточні для урахування параметри; побудувати логічні рівняння на мові алгебри предикатів для створення інформаційно – логічної моделі оцінки полів гамма-нейтронного випромінювання.

1. Аналіз необхідних і достаточних параметрів в оцінці полів гамма-нейтронного випромінювання проникаючої радіації

Сумарні дози проникаючої радіації визначаються сумою доз D_γ та D_n , створюваних всіма компонентами гамма-нейтронного випромінювання. По відомим вираженням, наведеним в роботах

[9,10,13], на основани математического пакета программ Mathcad нами получены зависимости как суммарной дозы ПР, так и её компонентов, от расстояния до центра взрыва нейтронного боеприпаса мощностью в 1 кт, взорванного на высоте 150 м (рис. 2).

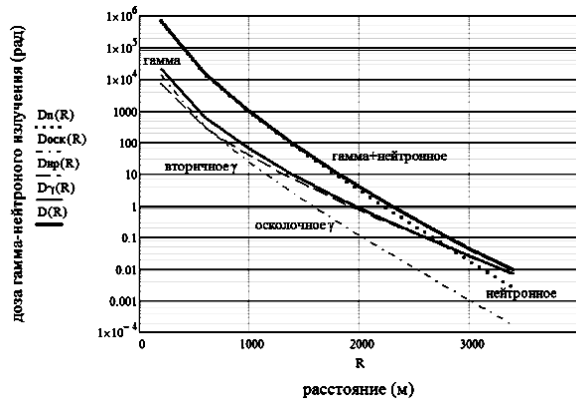


Рис.2. Зависимость суммарной дозы гамма-нейтронного излучения, а также их компонентов от расстояния до центра взрыва

С точки зрения оценки степени тяжести «чисто» радиационного поражения, что характерно для тактических ядерных боеприпасов, для оценки дозовых полей гамма-нейтронного излучения представляет наибольший интерес расстояние на открытой местности от 200 до 3000 м от центра взрыва. Поражающее действие нейтронной компоненты D_n (рис. 2) в большинстве случаев определяется мгновенными нейтронами, составляющими ~ 99% общего количества нейтронов. Количество нейтронов, выходящих из зоны взрыва, и их энергетическое распределение зависит от конструкции и типа боеприпаса (рис. 1), что в предложенных зависимостях [9, 10, 13] не учитывается. Идентификация типа ядерного боеприпаса может заключаться в анализе процентного состава спектра нейтронной компоненты (табл.1). Например, для термоядерного боеприпаса, действующего по принципу деление-синтез-деление, существует три максимума с энергиями 800 кэВ, 4 МэВ и 14 МэВ [23].

Таблица 1

Процентный состав спектра нейтронов (цит. по [7, 16])

E_n , МэВ	атомный	термоядерный	нейтронный
14-12,2	0,31	5,31	40,48
12,2-10	0,35	1,94	5,05
10-8,18	0,23	1,28	3,31
8,18-6,3	1,34	1,82	2,61
6,3-4	7,13	3,28	4,32
4-2,3	6,58	6,03	7,14
2,3-1,1	15,38	9,03	11,88

На рис. 3 представлена разработанная нами блок-схема алгоритма оценки дозовых полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации ЯВ, учитывающая мощность и тип ядерного боеприпаса.

Пункты 5-9 для термоядерного, 14-17 для атомного и 19-22 для нейтронного боеприпаса осуществляют определение доз гамма-нейтронного излучения с учётом специфики типа ядерного боеприпаса. Для оценки жёсткости нейтронного излучения в специальной литературе [3,4,9,10] введён множитель, отражающий выход нейтронов при взрыве боеприпаса данного типа K_n , лежащий в пределах от $5 \cdot 10^{-9}$ до $43 \cdot 10^{-9}$. Увеличение мощности взрыва нейтронного боеприпаса свыше 10 кт не имеет практического значения из-за поглощения нейтронов в окружающей среде, что было учтено при разработке блок-схемы (рис. 3).

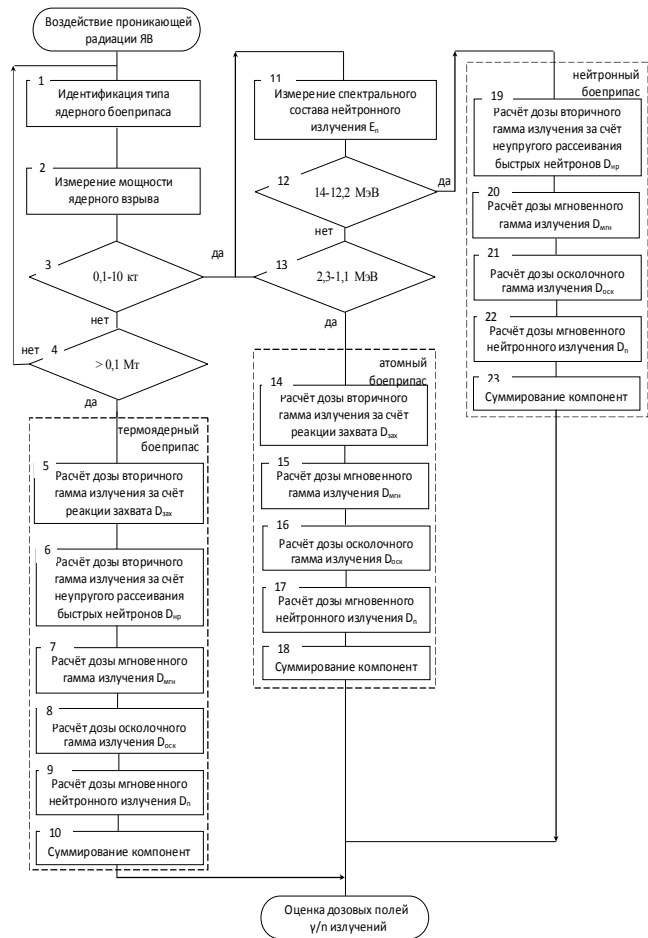


Рис. 3. Блок-схема алгоритма оценки дозовых полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации ЯВ

Процесс распространения нейтронного излучения ПР в воздухе является весьма сложным, и аналитическое решение задачи по определению дозы нейтронов на различных расстояниях представляет большие трудности. Поэтому во многих случаях для инженерных расчётов целесообразно использовать параметры и соотношения, установленные экспериментально. Функция $f(m)$ отражает прохождение нейтронов в воздухе и зависит от исходного энергетического спектра нейтронов (табл.1) и массы воздуха $m = R\rho$ между центром взрыва и объектом:

$$f(m) = e^{-R\Delta/\lambda_n} - \alpha e^{-R\lambda'_n/\Delta}, \quad (1)$$

где λ_n – эффективная длина ослабления дозы нейтронов (длина свободного пробега) для разных типов боеприпасов, изменяющаяся в пределах от 203 до 220 м;

$\Delta = \rho/\rho_0$ – относительная плотность воздуха (летом в большинстве случаев значение Δ близко к 0,9, а в зимнее время – к 1,1);

λ'_n, α – коэффициенты аппроксимации, отражающие специфику прохождения нейтронов в ближней зоне.

Для мгновенных нейтронов, как отмечается в работе [19], плотная подстилающая среда обладает существенно большими замедляющими способностями, что ведёт к ускорению процесса накопления во времени рассеянного излучения и обуславливает установление в энергетических и угловых распределениях близкого к равновесному состояния на меньших расстояниях от источника.

Кроме того, это приводит к увеличению до полутора раз дозы нейтронов на близких от источника расстояниях и уменьшению в 5–8 раз на дальних [19]. Характер и степень влияния границы раздела на дозу быстрых нейтронов оценивается коэффициентом влияния подстилающей поверхности:

$$K_3 = \frac{D_3(R, m, H, h)}{D_0(R, m)}, \quad (2)$$

где D_3 и D_0 – дозы нейтронов в однородной воздушной среде и у границ раздела воздух-земля соответственно при равенстве линейных и массовых расстояний.

Степень влияния поверхности определяется высотой взрыва H , высотой положения объекта h и расстоянием между ними R (рис. 4), а также содержанием водорода в плотной среде. В литературе допускают независимость влияния переменных, тогда $K_3 = K(R)K(H)K(h)$.

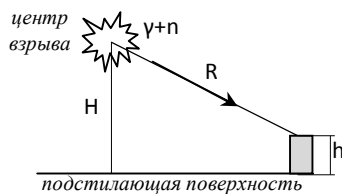


Рис. 4. Влияние поверхности земли на дозу нейтронного излучения

В работе [19] соответствующие зависимости влияния границы раздела воздуха-земля исследованы с помощью строгих моделей и могут быть аппроксимированы следующими соотношениями:

$$K(H) = 2,4 \cdot (1 - 0,58e^{-H/250}) \cdot K'_{вл}; \quad (3)$$

$$K(h) = 1,44 - 8,1/(h - 18,4); \quad (4)$$

$$K(R) = \begin{cases} 2,88R^{-0,27} \cdot K_{вл} & \text{для } 50 < R \leq 180 \text{ м;} \\ 15R^{-0,59} \cdot K_{вл} & 180 < R \leq 1500 \text{ м;} \\ 0,2 \cdot K_{вл} & R > 1500 \text{ м.} \end{cases} \quad (5)$$

Анализ выражений показывает, что при наземном (контактном) ядерном взрыве ($H = 0$) $K(H) = 1$ и возрастает с увеличением высоты подрыва ядерного боеприпаса. Для объектов на поверхности земли $K(h) = 1$. Максимальное значение данного коэффициента составляет 1,44 при $h \geq 200$ м.

В выражениях (3), (5) используется параметр влажности подстилающей поверхности $K'_{вл}$ ($K_{вл}$), характеризующий поглощение нейтронного излучения и изменяющийся таким образом: для грунта со средней влажностью до 10% параметр равен – 1, для грунта повышенной влажности до 20% – 1,05(0,9), для грунта сильной влажности до 50% – 1,1(0,85), для водной поверхности – 1,2(0,6) соответственно. Анализ показывает, что в приземных слоях атмосферы при грунте средней влажности $K(R)$ уменьшается от 0,6 до 0,2 с увеличением расстояния от 200 до 1500 м. На расстояниях более 1500 м $K(R) = 0,2$. Для произвольной влажности грунта коэффициенты влияния расстояния и высоты взрыва рассчитываются по соотношениям [19]:

$$K(R, \rho_H) = K(R) \left[1 - 7 \cdot 10^{-3} (10^{-15} \rho_H - 9,8) \right], \quad (6)$$

$$K(H, \rho_H) = K(H) \left[1 - 1,75 \cdot 10^{-2} (10^{-15} \rho_H - 9,8) \right] \times \left\{ 1 - 4 \left[1 - 0,75 \exp(-H/286) \right] / K(H) \right\}, \quad (7)$$

где ρ_H – концентрация атомов водорода в подстилающем грунте. Наличие лесных массивов равносильно увеличению влажности грунта и сводится в основном к уменьшению на больших расстояниях дозы нейтронов. Удельный выход мгновенного гамма-излучения сильно зависит от конструктивных особенностей боеприпаса, по оценкам литературных источников, 2/3 квантов имеют энергию от 1 до 4 МэВ (табл. 2).

Таблица 2

Энергетическое распределение мгновенного гамма-излучения в процентах (цит. по [7,16])

E_γ , МэВ	атомный	термоядерный	нейтронный
4-8	4,4	3,6	10,3
2-4	23,6	22,4	23,5
2-1	43	43	33,2
0,5-1	29	31	33

На данную компоненту приходится менее 1% от полной энергии взрыва. Для учёта выхода мгновенных гамма-квантов при взрыве боеприпаса данного типа также, как и для нейтронов, вводится множитель K_γ лежащий в пределах от 6,6 до 25, а также функция, отражающая прохождение излуче-

ния в воздухе, аналогичная выражению (1). Для мгновенной составляющей гамма-излучения граница раздела воздух - земля может определяться:

$$K(H) = 1,6 \cdot \left(1 - 0,375e^{-H/120}\right) \quad (8)$$

$$K(R) = \begin{cases} 2,13R^{-0,23} & \text{для } 50 < R \leq 500 \text{ м;} \\ 0,51 & R > 500 \text{ м.} \end{cases} \quad (9)$$

Осколочное гамма-излучение испускается в процессе постепенного радиоактивного распада продуктов деления и, следовательно, его действие в районе взрыва наблюдается вплоть до момента уноса этих продуктов нагретым воздухом в верхние слои атмосферы. Средняя энергия гамма-квантов составляет 2 МэВ. Поскольку осколки деления и продукты их распада представляют собой сложную смесь радиоактивных изотопов, то кинетика испускания ими гамма-излучения имеет весьма сложный характер, количество и энергия гамма-квантов непрерывно изменяются. Поэтому учёт доли энергии взрыва, обусловленной реакцией деления η – является обязательным при оценки дозы осколочного гамма-излучения $D_{оск}$ (рис. 2), для различных типов боеприпасов. Кроме того, на формирование поля осколочного гамма-излучения влияют такие физические процессы, как подъём радиоактивного облака и изменение его формы и размеров, вовлечение в облако грунта (создание дополнительного ослабления излучения), отражение и поглощение гамма-квантов поверхностью земли. Большое влияние на распространение гамма-излучения оказывает гидродинамический эффект воздушной полости, связанный с прохождением ударной волны и приводящий к уменьшению поглощения гамма-излучения в десятки раз в зависимости от мощности взрыва. Учет этого фактора для ядерного взрыва мощностью 1-2 Мт приводит к увеличению дозы осколочного гамма-излучения $D_{оск}$ до 20 раз по сравнению со случаем невозмущённой атмосферы. Некоторые результаты расчёта с учётом отмеченных особенностей источника излучений и среды их рас-

пространения приведены в работе [19]. Вторичное гамма-излучение включает ряд составляющих, из которых основными являются:

- гамма-излучение, возникающее при неупругом рассеивании нейтронов высоких энергий (более 4-6 МэВ) на ядрах атомов воздуха и грунта;
- захватное гамма-излучение, испускаемое при реакциях захвата медленных и тепловых нейтронов ядрами азота воздуха и различных элементов грунта и материала защиты.

Проведённый анализ показал, что вклад вторичных квантов в общую дозу сильно зависит от спектра нейтронов (табл. 1), условий и вида взрыва. Для атомных и термоядерных боеприпасов основной составляющей вторичного гамма-излучения является захватное $D_{зах}$, а для нейтронных боеприпасов – гамма-излучения неупругого рассеяния $D_{нр}$ (рис. 2). При воздушных и наземных взрывах захватное гамма-излучение «рождается» в зоне взрыва радиусом порядка 300 м.

В работе [20] заявляется, что максимальная мощность дозы вторичного гамма-излучения при энергии быстрых нейтронов в 14 МэВ может до 80 раз превышать соответствующие характеристики для атомного взрыва при равных энерговыделениях. Наличие границы раздела с грунтом приводит к увеличению плотности источников вторичного гамма-излучения и, как следствие, к увеличению дозы $D_{нр}$ на близких расстояниях от центра взрыва. Данное влияние целесообразно описывать соотношением:

$$K_{зг}(R) = \begin{cases} 0,2 + \frac{250}{R + 100}, & R \leq 1500 \text{ м,} \\ 0,36, & R \geq 1500 \text{ м.} \end{cases} \quad (10)$$

На основании проведенной декомпозиции полумпирических зависимостей нами предложена иерархическая структура учёта необходимых и достаточных параметров [25] для корректной оценки полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации (рис. 5).

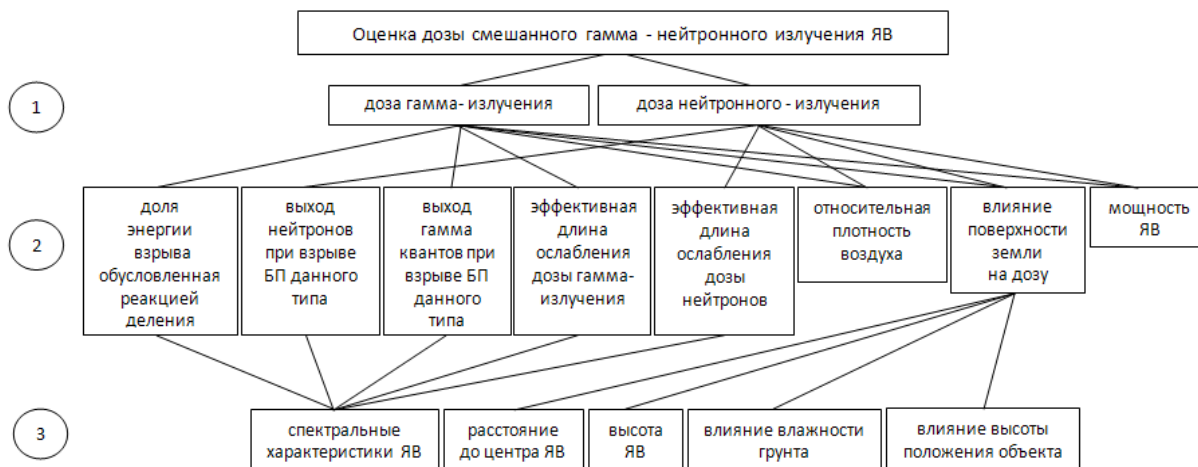


Рис.5. Декомпозиция задачи учёта необходимых и достаточных параметров гамма-нейтронного излучения ПР

Необходимые и достаточные показатели находятся на разных уровнях иерархии (рис.5), однако могут составлять единую базу данных для оценки гамма-нейтронного излучения.

В полученной нами иерархической структуре целесообразно выделить показатели, характеризующие ядерный боеприпас, и состояния среды (атмосфера, подстилающая поверхность), большая часть которых зависят от спектральных характеристик гамма-нейтронного излучения, а, значит, от типа боеприпаса (рис.1).

Кроме того, полученная иерархическая структура позволяет выделить для дальнейшего анализа более простые составляющие, а попарное сравнение элементов между собой делает возможным численное представление величины влияния каждого элемента иерархии на достижение поставленной цели, т.е точную оценку доз гамма-нейтронного излучения проникающей радиации.

2. Построение логических уравнений на языке алгебры предикатов для создания математической модели оценки полей гамма-нейтронного излучения

Универсум U рассмотренной нами задачи представлен множеством всех объектов, входящих в базу знаний системы радиационного мониторинга. При переходе от графического изображения конечных предикатов введем бинарный предикат $P(x_1, x_2)$, который описывает отношения: 1, если два элемента x_1, x_2 находятся в отношении, и 0 в противоположенном случае. Каждому предикату соответствует дуга иерархической системы, соединяющая вершины, в которых находятся его переменные или их значения. Предложенная нами иерархическая структура информации о поражающих факторах ЯВ представлена на рис. 6.

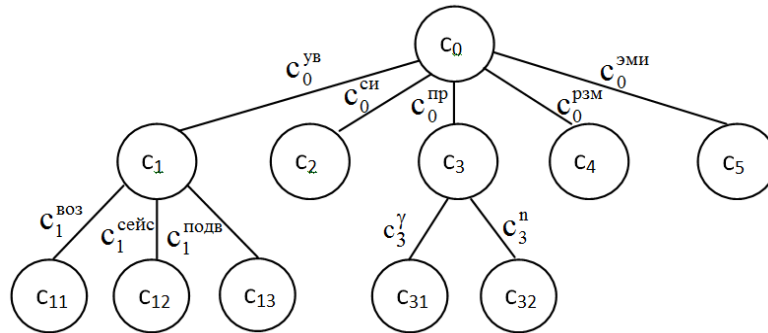


Рис. 6. Иерархическая структура элемента c_0 – «поражающие факторы ЯВ»

Декомпозиция информации по поражающим факторам ЯВ языком алгебры конечных предикатов имеет следующий вид:

$$c_0^{уб} \vee c_0^{си} \vee c_0^{пр} \vee c_0^{рзм} \vee c_0^{эми} = 1.$$

При этом каждый из поражающих факторов: ударная волна (УВ), световое излучение (СИ), проникающая радиация (ПР), радиоактивное заражение местности (РЗМ) и электромагнитный импульс (ЭМИ) может быть записан как конечный предикат. Область определения переменной для проникающей радиации ($c_0^{пр}$) описывается уравнением: $c_3^{\gamma} \vee c_3^n = 1$ соответственно имеем:

$$\gamma\text{-излучение } P(c_0, c_3, c_{31}) = c_0^{пр}, c_3^{\gamma} = \Pi\Phi_1^{пр};$$

$$n\text{-излучение } P(c_0, c_3, c_{32}) = c_0^{пр}, c_3^n = \Pi\Phi_2^{пр}.$$

Языком алгебры конечных предикатов иерархическую структуру для типов ядерного боеприпаса целесообразно записать:

$$e_0^a \vee e_0^t \vee e_0^n = 1;$$

$$\text{атомный } P(e_0, e_1) = e_0^a = \text{ТБ}^a;$$

$$\text{термоядерный } P(e_0, e_2) = e_0^t = \text{ТБ}^t;$$

$$\text{нейтронный } P(e_0, e_3) = e_0^n = \text{ТБ}^n.$$

С целью решения практических задач опишем предметное пространство, которое представляет собой базу знаний параметров среды, условий прохождения излучения в пространстве.

В соответствии с представленной на рис. 6 иерархической структурой определим показатели для оценки гамма-нейтронного излучения ПР языком алгебры предикатов [22, 26, 27]. Для этого введём предметные изменения и зададим их значения (табл. 3, ПП – предметные переменные).

Область определения группы показателей определяющие дозу гамма-нейтронного излучения проникающей радиации описывается предикатным уравнением:

$$\text{ПБ} \vee \text{ПС} \vee \text{ПО} \vee \text{ПД} = 1.$$

В свою очередь, область определения переменных для показателей ПБ, ПС, ПО, ПД описываются следующими уравнениями:

$$\text{ПС}_R \vee \text{ПС}_H \vee \text{ПС}_h \vee \text{ПС}_\Delta \vee \text{ПС}_B = 1;$$

Таблица 3

Окончание табл. 3

Группы показателей, определяющие дозу гамма-нейтронного излучения проникающей радиации

Показатели	ПП
1	2
Показатели, характеризующие ядерный боеприпас	ПБ
тротиловый эквивалент	ПБ _q
выход гамма-квантов при взрыве атомного боеприпаса	ПБ _{γa}
выход гамма-квантов при взрыве термоядерного боеприпаса	ПБ _{γt}
выход гамма-квантов при взрыве нейтронного боеприпаса	ПБ _{γn}
выход нейтронов при взрыве атомного боеприпаса	ПБ _{na}
выход нейтронов при взрыве термоядерного боеприпаса	ПБ _{nt}
выход нейтронов при взрыве нейтронного боеприпаса	ПБ _{nn}
доля энергии взрыва, обусловленная реакцией деления	ПБ _η
Показатели, характеризующие среду	ПС
расстояние от центра взрыва	ПС _R
высота взрыва	ПС _H
высота положения объекта	ПС _h
относительная плотность воздуха	ПС _Δ
влажность подстилающей поверхности (грунта)	ПС _B
Показатели, характеризующие прохождение излучения в воздухе	ПО
эффективная длина ослабления дозы гамма-излучения атомного боеприпаса	ПО _{γa} ^{эдо}
эффективная длина ослабления дозы гамма-излучения термоядерного боеприпаса	ПО _{γt} ^{эдо}
эффективная длина ослабления дозы гамма-излучения нейтронного боеприпаса	ПО _{γn} ^{эдо}
эффективная длина ослабления дозы нейтронов атомного боеприпаса	ПО _{na} ^{эдо}
эффективная длина ослабления дозы нейтронов термоядерного боеприпаса	ПО _{nt} ^{эдо}
эффективная длина ослабления дозы нейтронов нейтронного боеприпаса	ПО _{nn} ^{эдо}
коэффициенты аппроксимации, отражающие специфику прохождения гамма-излучения в ближней зоне для атомного боеприпаса	ПО _{γa} ^{ка}
коэффициенты аппроксимации, отражающие специфику прохождения гамма-излучения в ближней зоне для термоядерного боеприпаса	ПО _{γt} ^{ка}
коэффициенты аппроксимации, отражающие специфику прохождения гамма-излучения в ближней зоне для нейтронного боеприпаса	ПО _{γn} ^{ка}
коэффициенты аппроксимации, отражающие специфику прохождения нейтронов в ближней зоне для атомного боеприпаса	ПО _{na} ^{ка}
коэффициенты аппроксимации, отражающие специфику прохождения нейтронов в ближней зоне для термоядерного боеприпаса	ПО _{nt} ^{ка}
коэффициенты аппроксимации, отражающие специфику прохождения нейтронов в ближней зоне для нейтронного боеприпаса	ПО _{nn} ^{ка}
Показатели характеризующие дозу гамма-нейтронного излучения проникающей радиации	ПД

доза мгновенного гамма-излучения	ПД _γ ^{МГН}
доза захватного гамма-излучения	ПД _γ ^{зах}
доза гамма-излучения за счёт неупругого рассеивания	ПД _γ ^{НР}
доза осколочного гамма-излучения	ПД _γ ^{ОСК}
доза мгновенного нейтронного излучения	ПД _n ^{МГН}

$$\begin{aligned}
 & \text{ПБ}_q \vee \text{ПБ}_{\gamma a} \vee \text{ПБ}_{\gamma t} \vee \text{ПБ}_{\gamma n} \vee \text{ПБ}_{na} \vee \\
 & \vee \text{ПБ}_{nt} \vee \text{ПБ}_{nn} \vee \text{ПБ}_{\eta} = 1; \\
 & \text{ПО}_{\gamma a}^{\text{эдо}} \vee \text{ПО}_{\gamma t}^{\text{эдо}} \vee \text{ПО}_{\gamma n}^{\text{эдо}} \vee \text{ПО}_{na}^{\text{эдо}} \vee \text{ПО}_{nt}^{\text{эдо}} \vee \text{ПО}_{nn}^{\text{эдо}} \vee \\
 & \vee \text{ПО}_{\gamma a}^{\text{ка}} \vee \text{ПО}_{\gamma t}^{\text{ка}} \vee \text{ПО}_{\gamma n}^{\text{ка}} \vee \text{ПО}_{na}^{\text{ка}} \vee \text{ПО}_{nt}^{\text{ка}} \vee \text{ПО}_{nn}^{\text{ка}} = 1; \\
 & \text{ПД}_{\gamma}^{\text{МГН}} \vee \text{ПД}_{\gamma}^{\text{зах}} \vee \text{ПД}_{\gamma}^{\text{НР}} \vee \text{ПД}_{\gamma}^{\text{ОСК}} \vee \text{ПД}_n^{\text{МГН}} = 1.
 \end{aligned}$$

Следует заметить, что при описании таких показателей, как выход гамма квантов при взрыве атомного боеприпаса (ПБ_{γa}), необходимо учитывать как вид излучения, так и тип ядерного боеприпаса. Языком алгебры предикатов это будет записано с помощью импликативного уравнения:

$$\text{ПБ}_{\gamma a} \supset \text{ПФ}_1^{\text{ПР}} \text{ТБ}^a.$$

С учётом этого запишем импликативные уравнения для показателей ПБ_{γt}, ПБ_{γn}, ПБ_{na}, ПБ_{nt}, ПБ_{nn}, соответственно:

$$\begin{aligned}
 & \text{ПБ}_{\gamma t} \supset \text{ПФ}_1^{\text{ПР}} \text{ТБ}^t; \\
 & \text{ПБ}_{\gamma n} \supset \text{ПФ}_1^{\text{ПР}} \text{ТБ}^n; \\
 & \text{ПБ}_{na} \supset \text{ПФ}_2^{\text{ПР}} \text{ТБ}^a; \\
 & \text{ПБ}_{nt} \supset \text{ПФ}_2^{\text{ПР}} \text{ТБ}^t; \\
 & \text{ПБ}_{nn} \supset \text{ПФ}_2^{\text{ПР}} \text{ТБ}^n.
 \end{aligned}$$

Запишем предикатное уравнение для области определения переменной ПД:

$$\text{ПД}_{\gamma}^{\text{МГН}} \wedge (\text{ПД}_{\gamma}^{\text{зах}} \vee \text{ПД}_{\gamma}^{\text{НР}}) \wedge \text{ПД}_{\gamma}^{\text{ОСК}} \wedge \text{ПД}_n^{\text{МГН}} = 1$$

Импликативное уравнение для получения необходимой и достаточной информации по показателям, характеризующим дозу нейтронного излучения проникающей радиации (ПД_n^{МГН}) для возможных типов боеприпасов, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & \text{ПД}_n^{\text{МГН}} \supset \\
 & \supset \text{ПБ}_q (\text{ПБ}_{na} \vee \text{ПБ}_{nt} \vee \text{ПБ}_{nn}) \text{ПС}_R \text{ПС}_H \text{ПС}_h \text{ПС}_{\Delta} \text{ПС}_B \\
 & (\text{ПО}_{na}^{\text{эдо}} \vee \text{ПО}_{nt}^{\text{эдо}} \vee \text{ПО}_{nn}^{\text{эдо}}) (\text{ПО}_{na}^{\text{ка}} \vee \text{ПО}_{nt}^{\text{ка}} \vee \text{ПО}_{nn}^{\text{ка}}),
 \end{aligned}$$

из которого выходит, что для характеристики дозы нейтронного излучения проникающей радиации D_n (рис. 2) необходимо иметь следующие выходные данные: тротиловый эквивалент (мощность ядерно-

го взрива), выход нейтронов (в зависимости от типа боеприпаса (ПБ_{на} или ПБ_{нт} или ПБ_{нн}), расстояние от центра ядерного взрыва ПС_R до объекта, высоту взрыва ПС_H, высоту положения объекта над поверхностью ПС_б, относительную плотность воздуха ПС_Δ, влажность подстилающей поверхности (грунта) ПС_в, эффективную длину ослабления дозы нейтронов и коэффициенты аппроксимации, отражающие специфику прохождения нейтронов в ближней зоне в зависимости от типа ядерного боеприпаса.

Аналогично запишем имплицитное уравнение для получения необходимой и достаточной информации по показателям:

– характеризующие дозу мгновенного гамма-излучения проникающей радиации D_{мгн} (рис.2) для возможных типов боеприпасов:

$$PD_{\gamma}^{мгн} \supset ПБ_q (ПБ_{\gamma_a} \vee ПБ_{\gamma_t} \vee ПБ_{\gamma_n}) ПС_R ПС_H ПС_{\Delta} (ПО_{\gamma_a}^{эдo} \vee ПО_{\gamma_t}^{эдo} \vee ПО_{\gamma_n}^{эдo}) (ПО_{\gamma_a}^{ка} \vee ПО_{\gamma_t}^{ка} \vee ПО_{\gamma_n}^{ка}).$$

– характеризующие дозу вторичного гамма-излучения проникающей радиации за счет неупругого рассеивания быстрых нейтронов D_{нр} (рис. 2):

$$PD_{\gamma}^{нр} \supset ПБ_q ПБ_{\gamma_n} ПС_R ПС_H ПС_{\Delta} ПО_{\gamma_n}^{эдo} ПО_{\gamma_n}^{ка};$$

– характеризующие дозу вторичного гамма-излучения проникающей радиации за счет захвата медленных (тепловых) нейтронов D_{зах} (рис. 2):

$$PD_{\gamma}^{зах} \supset ПБ_q (ПБ_{\gamma_a} \vee ПБ_{\gamma_t}) ПС_R ПС_H ПС_{\Delta} (ПО_{\gamma_a}^{эдo} \vee ПО_{\gamma_t}^{эдo}).$$

– характеризующие дозу осколочного гамма-излучения проникающей радиации D_{оск} (рис. 2):

$$PD_{\gamma}^{оск} \supset ПБ_q ПБ_{\eta} ПС_R ПС_H ПС_{\Delta} (ПО_{\gamma_a}^{эдo} \vee ПО_{\gamma_t}^{эдo} \vee ПО_{\gamma_n}^{эдo}).$$

Таким образом, разработка алгебры предикатов даёт возможность перехода от алгоритмического описания информационных процессов к описанию их с помощью уравнений, которым не свойственна направленность действия. Важным достоинством метода описания объекта с помощью уравнений является то, что по уравнениям можно определить реакцию объекта при любом способе распределения сигналов между его полюсами.

Выводы

1. В работе проведен анализ необходимых и достаточных параметров в оценки полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации. Несмотря на существенные особенности для боеприпасов различного типа данную информацию целесообразно сгруппировать в параметры, характеризующие ядерный боеприпас, характеризующие прохождение излучения в воздухе и состояния среды. Большая часть параметров напрямую зависят от

спектральных характеристик гамма-нейтронного излучения, а, значит, от типа ядерного боеприпаса. Предложена блок-схема алгоритма оценки дозовых полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации ЯВ, учитывающая мощность и тип ядерного боеприпаса.

2. На основании проведенной декомпозиции полуэмпирических зависимостей получена иерархическая структура учёта необходимых и достаточных параметров для корректной оценки полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации.

3. На основе функционально-структурного подхода к построению моделей, описывая предметное пространство в виде системы логических уравнений на языке алгебры предикатов, разработана информационно-логическая модель оценки полей гамма-нейтронного излучения проникающей радиации боеприпасов различного типа. Модель позволяет перейти к единой математической модели комплексной оценки воздействий поражающих факторов боеприпасов различного типа, мощности и вида взрыва.

Список литературы

1. *Защита от оружия массового поражения / Под.ред. В.В. Мясникова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Воениздат, 1989. – 389 с.*
2. *Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения: Справочник/ Под редакцией Г.П. Демиденко. 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Виццашк. Головное изд-во, 1989. – 287 с.*
3. *Действие ядерного взрыва/ Сборник переводов под редакцией С.С. Григоряна и Г. С. Шапиро. – М.: Изд. «Мир», 1971. – 680 с.*
4. *Действие ядерного оружия: Пер. с англ. – М.: Воениздат, 1965. – 683 с.*
5. *Иванов А.И., Рыбкин Г.И. Поражающее действие ядерного взрыва. – М.: Военное издательство МО Союза ССР, 1960. – 378 с.*
6. *Иванов А.И., Науменко И.А., Павлов М.П. Ракетно-ядерное оружие и его поражающее действие. – М.: Воениздат, 1971. – 224 с.*
7. *Тарасенко Ю. Н. Ионизационные методы дозиметрии высокоинтенсивного ионизирующего излучения – М.: Техносфера, 2013. – 264 с.*
8. *Мырова Л.О., Чепиженко А.З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.*
9. *Краснощечекова Г.Ф. Особенности проектирования средств специального назначения [Электронный ресурс] Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост Г.Ф. Краснощечекова. – Электрон.текстовые и граф. дан. – Самара, 2012*
10. *Оценка устойчивости работы электронных систем при воздействии ионизирующих излучений: метод. Пособие для практ. занятий / А.И. Новаша и др. – Минск: БГУИР, 2008. – 18 с.*
11. *Чернявский И.Ю., Григорьев А.Н., Бильк З.В., Матыкин В.Б. Применение кремниевых рпн детекторов для регистрации параметров ядерного взрыва. Системы озброєння і військова техніка: науковий журнал. –Х. ХУПС, 2016. – №4(48). – С. 61–68.*

12. Дозовая нагрузка на человека в полях гамма-нейтронного излучения / Гозенбук В.Л., Кеирим-Маркус И.Б., Савинский А.К., Чернов Е.Н. – М.: Атомиздат, 1978. – 168 с.

13. Чернявский И.Ю. Оценка степени радиационного поражения путём прогнозирования дозовых нагрузок за данными датчика боеспособности / И.Ю. Чернявский, В.В. Маруценко, А.В. Матыкин // Системи озброєння і військова техніка: науково – технічний журнал. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016. – №1(45). – С. 125-133.

14. Гаранюшкин Н.В., Кондурикин Н.А., Шаховский В.В., Шуляк И.П. Алгоритм расчёта полей гамма-нейтронного излучения (РИНГ-78). Доклад № 7.12 // Вторая Всесоюзная научная конференция по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. 19-21 декабря 1978. – М.: МИФИ.

15. Гаранюшкин Н.В., Кондурикин Н.А. Расчёт захватного гамма-излучения в однородной среде и у границы раздела двух сред на основе комбинирования метода Монте-Карло и полуаналитических методов // Четвёртая Всесоюзная конференция по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Тезисы докл. – Томск: Томский политехнический институт, 1985. – 79 с.

16. Распространение ионизирующих излучений в воздухе/ Климанов В.А., Коновалов С.А., Кочанов В.А. и др. Под ред В.И. Кухатевича и В.П. Машиковича. – М.: Атомиздат, 1979 – 216 с.

17. Волощенко А.М., Гончаров А.Н., Кондушкин Н.А. Влияние влажности воздуха на характеристики ионизирующих излучений // Сб. научных трудов МИФИ: Защита от ионизирующих излучений / Под ред. В.К. Сахарова.-М.: Энергоатомиздат, 1988. – С. 57-60.

18. Гаранюшкин Н.В., Кондурикин Н.А. Банк данных для расчёта полей нейтронов и гамма-излучения от точечных и распределённых источников у границы раздела воздух-земля// Шестая Российская научная конференция по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. Тезисы докладов. – Обнинск: ГНЦ ФЭИ, 1994. Т.1. – С. 93-94.

19. Физика ядерного взрыва: Том 1. Развитие взрыва/ Министерство обороны Российской Федерации.

Центральный физико-технический институт. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 528 с.

20. Физика ядерного взрыва: Том 2. Действие взрыва/ Министерство обороны Российской Федерации. Центральный физико-технический институт. – М.: Наука. Физматлит, 1997. – 256 с.

21. Чернявский И.Ю. Биологические аспекты импульсного воздействия радиационного фактора военного характера // Чернявский И.Ю. Маруценко В.В. Гайдабука В.Е., Писарев С.А., Меньшов С.Н., Матикин В.Б. Системи обробки інформації: збірник наук. праць – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2016. – Вип.5(142). – С. 193-201.

22. Булкин В.И. Математические модели знаний и их реализация с помощью алгебропредикатных структур / В.И. Булкин, Н.В. Шаронова. – Донецк: Дмитренко Л.Р., 2010. – 304 с.

23. Дозиметрия ионизирующих излучений ядерного взрыва: Учебник / Под ред. Шестерякова. – М.: ВАХЗ, 1976. – 455 с.

24. Шабанов-Кушнаренко Ю.П. Теория интеллекта. Математические средства. Харьков. Вища школа, 1984. – 144 с.

25. Козуля Т.В., Петрухін С.Ю. Місце екологічного портрету території в інформаційному забезпеченні систем моніторингу // Вестник Херсонского Национального Технического Университета, №4 (27), 2007, – С. 230- 233.

26. Петрухін С.Ю. Напрями розробки інформаційної корпоративної екологічної системи військово-техногенних територій. // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 6/5 (42), 2009. – С. 48-52.

27. Петрухін С.Ю., Артем'єв С.Р., Пісня Л.А. Напрями вирішення завдань екологічної безпеки військ у миротворчих операціях // Восточно-европейский журнал передовых технологий, 3/11 (51), 2011. – С. 4-7.

28. Горский Ю.М. Системно-информационный анализ процессов управления / Ю.М. Горский. – М., 1988. – 322 с.

Надійшла до редколегії 19.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Стаховський, Військовий інститут танкових військ НТУ «ХП», Харків.

ІНФОРМАЦІЙНО-ЛОГІЧНА МОДЕЛЬ ОБЛІКУ НЕОБХІДНИХ І ДОСТАТНІХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ДОЗИ ГАММА-НЕЙТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРОНИКАЮЧОЇ РАДІАЦІЇ

І.Ю. Чернявський, С.Ю. Петрухін, В.В. Матикін, В.Е. Гайдабука, В.В. Тютюник

В роботі аналізуються закономірності в оцінці полів гамма нейтронного випромінювання проникаючої радіації боєприпасів різного типу, необхідні і достатні параметри для коректної оцінки доз гамма-нейтронного випромінювання. На основі використання функціонально-структурного підходу, при якому мережева структура оцінки полів гамма нейтронного випромінювання формується цілеспрямовано, описуючи предметний простір у вигляді системи логічних рівнянь на мові алгебри предикатів, розроблена інформаційно-логічна модель, яка може бути використана в системах радіаційного моніторингу.

Ключові слова: інформаційно-логічна модель, функціонально-структурний підхід, гамма-нейтронне випромінювання проникаючої радіації, тип боєприпаси.

INFORMATIONAL-LOGICAL MODEL OF ACCOUNTING NECESSARY AND SUFFICIENT PARAMETERS FOR DOSE ASSESSMENT OF GAMMA-NEUTRON RADIATION OF PENETRATING RADIATION

I.Y. Cherniavskiy, S.Y. Petrukhin, V.B. Matykin, V.E. Gaydabuka, V. V. Tyutyunyk

This paper analyse regularities in the assessment of the fields of gamma-neutron radiation of penetrating radiation of ammunitions of various types, necessary and sufficient parameters for the correct estimation of doses of gamma-neutron radiation. Based on the use of the functional-structural approach, in which the network structure of the evaluation of gamma-neutron radiation fields is formed purposefully, an information-logical model that can be used in radiation monitoring systems is developed describing the object space in the form of a system of logical equations in the language of predicate algebra.

Keywords: information - logical model, functional - structural approach, gamma - neutron radiation of penetrating radiation, type of ammunition.

В.М. Безрук, С.А. Иваненко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ АПРИОРНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ В ЗАДАЧАХ РАДИОМОНИТОРИНГА

В данной работе рассматриваются неклассические методы обнаружения и распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности, которые основаны на разных вероятностных моделях сигналов и помех. Проведены исследования методов обработки сигналов путем статистических испытаний на выборках реальных сигналов и шумов, характерных для РМ. В результате исследований получены оценки вероятностей правильного обнаружения и распознавания сигналов, приемлемые для работы в комплексах автоматизированного РМ.

Ключевые слова: обнаружение, распознавание, сигнал, помеха, априорная неопределенность, радиомониторинг.

Введение

Одной из важных задач контроля за использованием радиочастотного спектра является проведение автоматизированного радиомониторинга (РМ) [1-5]. Следует отметить, что при автоматизированном РМ из-за действия шума и многих других неконтролируемых факторов сигналы в частотных каналах носят случайный характер с априори неизвестными статистическими характеристиками. Априорная неопределенность обычно преодолевается с использованием обучающих выборок, которые могут быть получены для заданных сигналов и шума. Однако при РМ на обработку поступает также множество неизвестных сигналов, для которых отсутствует возможность получить обучающие выборки. Это усложняет решение задач обнаружения и распознавания сигналов и определяет актуальность применения специальных методов обнаружения и распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности, которые отличаются от классических методов, которые обычно применяются в областях радиосвязи, радиолокации и навигации [6-9].

В данной статье рассматриваются неклассические методы решения задач обработки случайных сигналов в частотных каналах при повышенной априорной неопределенности, в частности, методы обнаружения неизвестных сигналов на фоне помех, селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов, распознавания заданных видов модуляции радиосигналов. Методы обнаружения и распознавания сигналов основаны на описании сигналов разными вероятностными моделями, адекватными решаемым задачам обработки сигналов, в частности, в виде ортогональных разложений сигналов, авторегрессионных процессов, сме-

си распределений сигналов. Приводятся результаты экспериментальных исследований задач обнаружения и распознавания сигналов при РМ, которые проведены путем статистического моделирования на выборках сигналов и помех, характерных для автоматизированного РМ.

1. Особенности постановки задач распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности

В известных статистических методах распознавания образов преодоление априорной неопределенности относительно статистических характеристик представляющих их сигналов осуществляется с использованием обучающих выборок реализаций сигналов [6-9]. Кроме того, обычно полагается, что число проверяемых гипотез M равно числу классов распознаваемых сигналов. Однако в реальных задачах автоматизированного РМ возникают ситуации, когда наблюдаемый сигнал может не принадлежать к заданным классам сигналов и должен быть отнесен к $(M+1)$ -му не заданному в вероятностном смысле классу неизвестных сигналов. Причем обучающие выборки сигналов из $(M+1)$ -го класса в силу их разнообразия либо вообще не могут быть получены, либо являются непредставительными. Такие неклассические задачи распознавания, которые возникают при автоматизированного РМ называются задачами распознавания сигналов в условиях повышенной априорной неопределенности [6].

Рассмотрим особенности формализованной постановки задачи распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. Будем полагать, что распознаваемые сигналы представлены конеч-

номерными векторами некоторых статистик наблюдений \bar{x} , по реализациям которых принимаются решения. Задаются $(M+1)$ гипотезы, которые могут быть сделаны в отношении наблюдаемых сигналов: $H^i, i = \overline{1, M}$ – для заданных сигналов, H^0 – для неизвестных сигналов, объединенных в $(M+1)$ -й класс. Плотности вероятности заданных сигналов $W(\bar{x} | \bar{\alpha}^i), i = \overline{1, M}$ заданы с точностью до случайных векторных параметров $\bar{\alpha}^i, i = \overline{1, M}$, а для $(M+1)$ -го класса сигналов плотность вероятности неизвестна. Заданы также априорные вероятности гипотез $P(H^i) = P_i$, причем $\sum_{i=0}^M P_i = 1$. Полагается также, что заданы обучающие выборки для M сигналов $\{\bar{x}_r^i, r = \overline{1, n_i}; i = \overline{1, M}\}$, а обучающая выборка для $(M+1)$ -го класса сигналов отсутствует либо является непредставительной.

Показатель качества распознавания сигналов при наличии всей априорной информации о распознаваемых сигналах может характеризоваться средним риском

$$R = \sum_{i=0}^M \sum_{l \neq i}^M c_{li} P_i P\left(\frac{G^l}{i}\right) = \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M c_{li} P_i P\left(\frac{G^l}{i}\right) + \sum_{i=1}^M c_{0i} P_i P\left(\frac{G^0}{i}\right) + P_0 \sum_{l=0}^M c_{l0} P\left(\frac{G^l}{0}\right), \quad (1)$$

где c_{li} – функция потерь; $P(G^l / i)$ – вероятность ошибки в случае принятия решения в пользу i -го сигнала при действии i -го сигнала.

В соответствии с имеющейся априорной информацией можно найти оценки первых двух составляющих в (1). Оценить величину третьей составляющей не представляется возможным. Для учета третьей составляющей можно ввести показатель объема критической области отклонения гипотезы H^0 о действии сигнала из $(M+1)$ -го класса. Эта область имеет смысл собственной области M заданных сигналов.

2. Задача селекции распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов

Для сформулированной неклассической задачи распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов может быть использовано следующее решающее правило селекции и распознавания заданных сигналов [3, 4]:

если выполняются неравенства

$$H^0 : \max_{l=1, M} \{P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l)\} < \lambda, \quad (2, a)$$

то принимается гипотеза H^0 о действии неизвестных сигналов из $(M+1)$ -го класса;

при выполнении системы неравенств

$$H^i : \max_{l=1, M} \{P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l)\} \geq \lambda, \quad (2, б)$$

$$P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^l) \geq P_l W(\bar{x} / \bar{\alpha}^1), l = \overline{1, M}, l \neq i \quad (2, в)$$

принимается гипотеза H^i о действии заданного i -го сигнала.

Здесь $W(\bar{x} / \bar{\alpha}^i)$ – плотности распределения заданных сигналов, $\bar{\alpha}^i$ – параметры, которые оцениваются по обучающим выборкам для M заданных сигналов; пороговое значение λ определяется из условия обеспечения заданной вероятности правильного распознавания заданных сигналов.

Решающие правила (2), (3) дают общее решение поставленной задачи селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. Эти решающие правила могут быть конкретизированы для выбранной вероятностной модели, которая используется для описания обрабатываемых сигналов. В работе [4] приведены особенности решающих правил распознавания, когда сигналы описываются вероятностной моделью в виде ортогональных разложений, дающей представление сигналов вектором спектральных отсчетов сигналов в некотором ортонормированном базисе.

В частности, при выборе для описания сигналов вероятностной модели в виде гауссовских авторегрессионных процессов решающее правило распознавания (2) принимает следующий вид [3]:

если выполняется система неравенств

$$H^1 : K_1(\bar{x}) < \Lambda_1, \quad l = \overline{1, M} \quad (3, a)$$

$$K_1(\bar{x}) - K_i(\bar{x}) + \ln \frac{(2\pi\sigma_i)^{p_i-L}}{(2\pi\sigma_k)^{p_k-L}} \geq \ln \frac{P_i}{P_i}, \quad (3, б)$$

то принимается гипотеза о действии i -го заданного сигнала;

если выполняются неравенства)

$$H^{M+1} : K_1(\bar{x}) > \Lambda_1, \quad l = \overline{1, M}, \quad (3, в)$$

то принимается гипотеза о действии неизвестного сигнала.

$$K_1(\bar{x}) = \frac{1}{2\sigma_1^2} \sum_{k=p+1}^L \left[x_k - \mu_1 - \sum_{j=1}^{p_1} a_j^1 (x_{k-j} - \mu_1) \right]^2 -$$

соотношение, определяющее нормированную ошибку предсказания в авторегрессионной модели; p_1, a_j^1 – порядок АР модели и коэффициенты авторегрессии для l -го сигнала; Λ_1 – некоторые пороговые значения, определяемые из условия обеспечения заданных вероятностей правильного распознавания M заданных сигналов.

При использовании вероятностной модели сигналов в виде смеси распределений решающее правило распознавания (2) имеет следующий вид [3]:

- при выполнении условий

$$\max_{l=1, M} \left\{ P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \right\} \geq \lambda, \quad (4, a)$$

$$P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \geq P_i \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^i), \quad (4, б)$$

$$l = \overline{1, M}, \quad l \neq i$$

принимается гипотеза о действии i -го заданного сигнала;

- если выполняются условия

$$\max_{l=1, M} \left\{ P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \right\} < \lambda, \quad (4, в)$$

то принимается гипотеза о действии неизвестных сигналов из $(M+1)$ -го класса.

В приведенных решающих правилах распознавания полагается, что для неизвестных параметров распределений находятся их оценки, вычисленные по обучающим выборкам для заданных сигналов.

Рассмотрим практические особенности применения рассмотренных решающих правил распознавания сигналов при решении некоторых прикладных задач обнаружения и распознавания в области автоматизированного РМ.

3. Обнаружение неизвестных сигналов на фоне помех в частотных каналах

При обнаружении РИ, наблюдаемых в частотных каналах выдвигаются две гипотезы: H^1 – действует сигнал на фоне шума; H^0 – действует только шум. Полагается, что шум описывается многомерной плотностью распределения $W(\bar{x}/\bar{\alpha}^0)$. Задается обучающая выборка реализаций шума $\{\bar{x}_r^0, r = \overline{1, n_0}\}$, которая может быть использована для оценивания неизвестного параметра $\bar{\alpha}^0$. Информация о вероятностных характеристиках сигнала отсутствует. Необходимо решить задачу обнаружения неизвестного сигнала на фоне шума, заданного своей обучающей выборкой.

Для решения сформулированной задачи обнаружения неизвестных сигналов может быть использовано следующее решающее правило:

$$H^1 : W(\bar{x}/\bar{\alpha}^0) > \lambda - \quad (5)$$

принимается гипотеза о наличии сигнала,

$$H^0 : W(\bar{x}/\bar{\alpha}^0) \leq \lambda -$$

отвергается гипотеза о наличии сигнала.

Здесь λ – некоторое пороговое значение, выбираемое из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

При описании наблюдений в частотном канале вероятностной моделью в виде ортогональных разложений векторы наблюдений \bar{x} представляются в спектральной области коэффициентами разложений c_j в некотором ортонормированном базисе. При исследованиях выбирался ортонормированный базис дискретных экспоненциальных функции (ДЭФ).

Для случая гауссовского распределения и некоррелированности спектральных коэффициентов разложений наблюдений \bar{x} решающее правило обнаружения неизвестных сигналов (5) представляется в виде соотношений:

$$\sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} > \Delta_c^0; \quad H^0 : \sum_{j=1}^N \frac{(c_j - \mu_{jc}^0)^2}{(\sigma_{jc}^0)^2} \leq \Delta_c^0, \quad (6)$$

где c_j – коэффициенты разложений вектора наблюдений \bar{x} , μ_{jc}^0 – оценки математических ожиданий и дисперсий координат c_j , которые оцениваются по обучающей выборке помехи; Δ_c^0 – некоторые пороговые значения, выбираемые из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги.

Если решение принимается по выборке наблюдений объемом v реализаций, решающее правило (6) принимает следующий вид:

$$H^1 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N (c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2 / (\sigma_{jc}^0)^2 > \Delta_{cv}^0; \quad (7)$$

$$H^0 : \sum_{r=1}^v \sum_{j=1}^N (c_{jr} - \mu_{jc}^0)^2 / (\sigma_{jc}^0)^2 \leq \Delta_{cv}^0,$$

Проведены исследования рабочих характеристик рассмотренных решающих правил обнаружения неизвестных сигналов на фоне заданной помехи. Исследования были проведены методом статистического моделирования на выборках реализаций реальных сигналов и помех, которые были получены с помощью приёмника SDR, подключенного к компьютеру [12]. Проводились записи в оцифрованном виде выборок реализаций сигналов и шума, действующих в выбранных частотных каналах с полосой 125 кГц в УКВ диапазоне. Накоплены обучающие и контрольные выборки сигналов и шума объемом по 1000 реализаций, каждая из которых включала 256 дискретных отсчетов наблюдений, взятых с частотой 250 кГц.

Вначале проведен анализ статистических характеристик шума в выбранном частотном канале. По обучающим выборкам шума построена гистограмма распределений его выборочных значений (рис. 2), а также найдены оценки корреляционной функции шума (рис. 3).

Также были проведены исследования статистических характеристик шума в случае представления наблюдений \bar{x} в ортонормированном базисе ДЭФ. При этом рассматривалось спектральное представ-

ление наблюдений шума в виде отсчетов амплитудного спектра в базисе ДЭФ. В результате анализа получено, что такое спектральное представление наблюдений шума подчиняется распределению Райса, которое при определенных условиях переходит в гауссово распределение. Вычислена также оценка корреляционной функции выборочных значений амплитудного спектра шума, которая имеет вид близкий к рис. 3. Это дает основание использовать решающие правила обнаружения неизвестных сигналов (6), (7), которые получены для таких предположений.

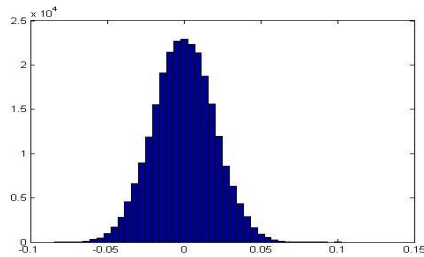


Рис. 2 Гистограмма распределений выборочных значений шума в частотном канале

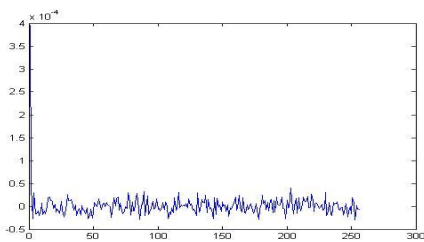


Рис. 3 Оценка корреляционной функции выборочных значений шума в частотном канале

На этапе обучения по накопленным выборкам шума находились параметры решающих правил. Пороговое значение Δ_{cv}^0 выбиралось из условия обеспечения заданной вероятности ложной тревоги. В рабочем режиме подавались реализации наблюдений в виде аддитивной смеси сигнала и шума, действующих в выбранном частотном канале. Путем статистических испытаний с использованием контрольных выборок реализаций сигналов были получены оценки вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов. Исследования проведены для разных типов сигналов, действующих в частотных каналах. Для примера на рис. 4 приведен амплитудный спектр одного из сигналов, который рассматривался как неизвестный сигнал, действующий на фоне шума в анализируемом частотном канале.

По контрольным выборкам этого сигнала проведены исследования характеристик обнаружения в виде зависимости оценок вероятности правильного обнаружения $P(1/1)$ от соотношения сигнал-шум (ОСШ) SNR. Оценки $P(1/1)$ были получены в виде $P(1/1) = n_1 / N$, где n_1 - число опытов, в которых

приняты правильные решения о действии сигнала на фоне шума, N - общее число опытов. На рис. 5 приведены полученные зависимости для решающего правила (7) при фиксированной вероятности ложной тревоги $P(1/0) = 0,04$. Оценки $P(1/1)$ были получены при разных значениях $v = 1, 2, 3$.

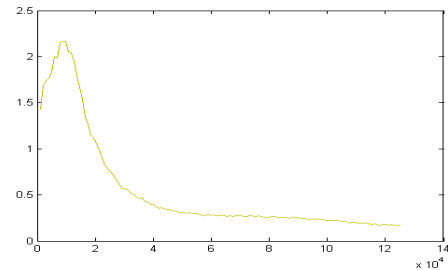


Рис. 4. Амплитудный спектр сигнала

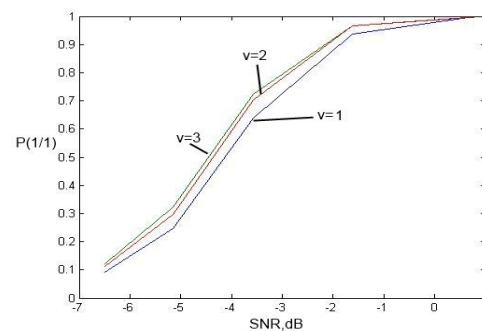


Рис. 5. Зависимости оценок вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов от ОСШ при вероятности ложной тревоги $P(1/0) = 0,04$ и разных значениях $v = 1, 2, 3$.

Из анализа результатов исследований следует, что рассмотренное решающее правило может быть использовано для решения задачи обнаружения неизвестных сигналов на фоне шума в анализируемых частотных каналах. При этом могут быть достигнуты приемлемые значения вероятности правильного обнаружения неизвестных сигналов путем выбора необходимого ОСШ.

4. Селекция и распознавание заданных сигналов

При радиомониторинге частотных диапазонов часто возникает необходимость из всего множества анализируемых РИ выделить некоторые известные ранее РИ, для которых могут быть получены обучающие выборки сигналов. Решение такой задачи представляет собой задачу селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов. В частности, для радиомониторинга средств связи соответствующие РИ представляются радиосигналами с энергетическими спектрами, которые характеризуются наличием ярко выраженных экстремумов. Для вероятностного описания таких сигналов рационально использовать авторегрессионную (АР) модель. При этом решающее правило

селекции и распознавания заданных сигналов определяется соотношениями (3).

Проведено исследование задачи селекции и распознавания заданных сигналов методом статистического моделирования на выборках радиосигналов с различным видом и параметрами модуляции, характерных для задач РМ (рис. 4).

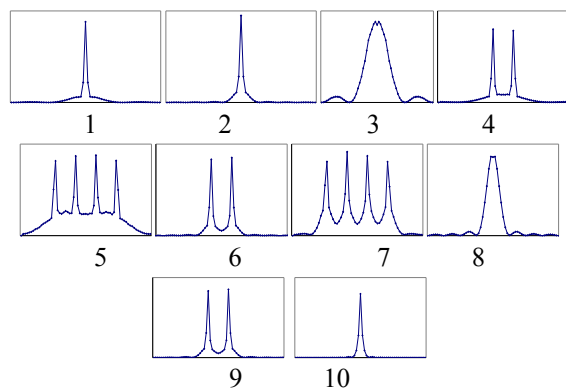


Рис. 6. Энергетические спектры радиосигналов для типовых РИ, использованных при исследованиях

Размерность исходного описания сигналов составляла $L = 512$, объемы обучающих и контрольных выборок для каждого сигнала составляли 1000 реализаций.

Получена зависимость оценки средней вероятности ошибочного распознавания M заданных сигналов $\hat{P}_{\text{ош. ср.}}$ от используемого порядка АР модели p (рис. 7). Видно, что при выборе порядка АР модели $p=20$ уже достигается достаточно высокое качество распознавания сигналов.

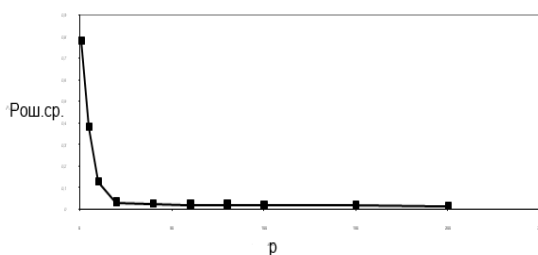


Рис. 7. Зависимость средней вероятности ошибочного распознавания сигналов $\hat{P}_{\text{ош. ср.}}$ от порядка АР модели p

Исследованы также показатели качества решения задачи распознавания M заданных сигналов при наличии сигналов из $M+1$ -го класса с применением решающего правила (3). В качестве M заданных сигналов использовались сигналы 1–5, остальные пять сигналов представляли $M+1$ -й класс неизвестных сигналов. В результате исследований получены диаграммы обмена показателей качества распознавания в виде зависимости оценок $P_{\text{н/з}}$ от $P_{\text{з/н}}$ при различных длительностях реализаций сигналов $L=256$ и $L=512$ (рис. 4).

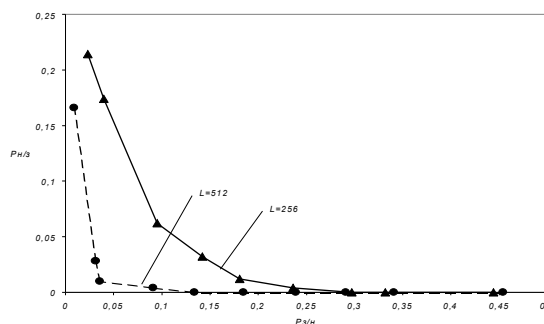


Рис. 8. Диаграммы обмена ошибок распознавания заданных радиосигналов при наличии неизвестных сигналов $P_{\text{з/н}}$, $P_{\text{н/з}}$ для разных значений L

5. Распознавание видов модуляции радиосигналов при их описании вероятностной моделью в виде смеси распределений

В условиях возрастающей загрузки радиодиапазона при автоматизированном РК важной задачей является распознавание видов модуляции (ВМ) для новых выявленных РИ. Эта более сложная задача распознавания по сравнению с выше рассмотренной задачей распознавания заданных видов РИ с фиксированными видами и параметрами модуляции. Сложность обусловлена тем, что здесь распознаванию подлежат целые классы сигналов – радиосигналов с определенным ВМ и разными возможными значениями параметров модуляции. Распознавание ВМ радиосигналов при РМ в реальных условиях затрудняется из-за случайного характера передаваемых сообщений, действия помех, а также появления радиосигналов с новыми неизвестными ранее ВМ, для которых отсутствуют необходимые априорные сведения.

Указанную задачу предлагается решать как задачу распознавания классов радиосигналов с известными ВМ при наличии класса сигналов с неизвестными ВМ. При этом общий вид алгоритма селекции и распознавания заданных сигналов конкретизирован с учетом описания классов радиосигналов с заданными ВМ вероятностной моделью в виде смесей распределений (4). Решение о ВМ принимается по реализациям радиосигналов в виде последовательностей отсчетов квадратурных составляющих

$$\xi(k) = (A_c(k), A_s(k)), \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

полученных с выхода цифрового радиоприемного устройства. Исследования проведены для радиосигналов со различными видами модуляции (рис. 9). Сигналы наблюдались на фоне помехи в виде гауссовского белого шума. Видно, что эти проекции отсчетов квадратурных составляющих определяют характерные области для каждого вида модуляции. Здесь же по каждой из координат приведены гистограммы распределений значений квадратурных составляющих сигналов.

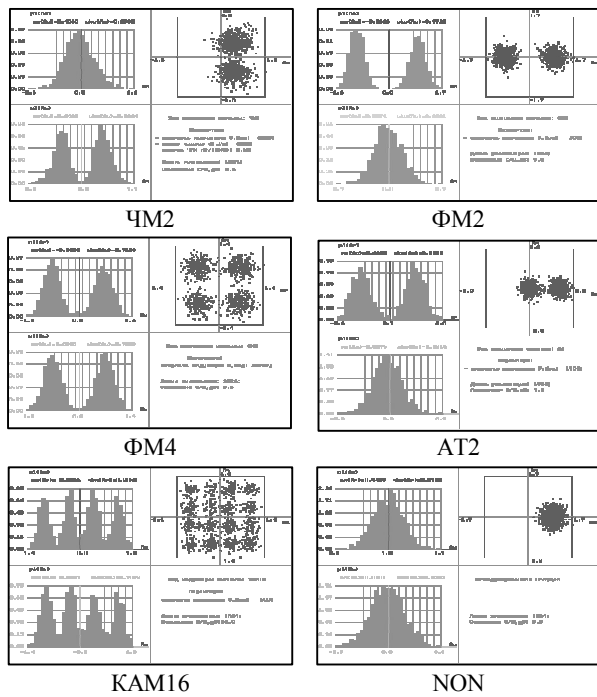


Рис. 9. Гистограммы распределений и проекции отсчетов радиосигналов с различным видом модуляции в пространстве квадратурных составляющих (A_c, A_s)

Из анализа содержания поставленной задачи распознавания ВМ радиосигналов следует, что подходящей вероятностной моделью для описания сигналов с разным ВМ может служить модель в виде смеси распределений и соответствующее решающее правило (4). При этом в предположении независимости отсчетов квадратурных составляющих вероятностные свойства сигналов определяются смесями гауссовских распределений отсчетов квадратурных составляющих в виде

$$\begin{aligned}
 W(A_c) &= \sum_{j=1}^Q q_j \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(A_c - m_{cj})^2 / (2\sigma_j^2)\right], \\
 W(A_s) &= \sum_{j=1}^Q q_j \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(A_s - m_{sj})^2 / (2\sigma_j^2)\right],
 \end{aligned} \tag{8}$$

где $(q_j, j=1, Q)$ – дискретное взвешивающее распределение, определяющее вероятности компонент в смеси; $\sigma_j^2, m_{cj}, m_{sj}$ – соответственно дисперсии и математические ожидания компонент смеси (дисперсии квадратурных составляющих полагаются одинаковыми).

При этом может быть использовано частный случай правила принятия решений (4) о ВМ радиосигналов по $2L$ -мерному вектору $\vec{\xi}$ независимых квадратурных составляющих сигналов $A_c(n)$ и $A_s(n)$:

если хотя бы для одного значения i ($i = \overline{1, M}$) выполняется неравенство

$$P_i W(\vec{\xi} / \vec{\alpha}_i) \geq \lambda^i, \tag{9,а}$$

то принимается решение в пользу M заданных ВМ радиосигналов;

если же при всех $i = \overline{1, M}$

$$P_i W(\vec{\xi} / \vec{\alpha}_i) < \lambda^i, \tag{9,б}$$

то принимается решение в пользу $M+1$ -го класса сигналов с неизвестными ВМ;

2) при выполнении неравенства (9а) на втором этапе производится распознавание заданных видов модуляции радиосигналов, т.е. принимается решение в пользу i -го ВМ при выполнении системы неравенств

$$P_i W(\vec{\xi} / \vec{\alpha}_i) \geq P_l W(\vec{\xi} / \vec{\alpha}_l), \quad l = \overline{1, M}, \quad l \neq i. \tag{9,в}$$

Пороговые значения λ^i определяются из условия обеспечения требуемой вероятности правильного распознавания i -го ВМ радиосигнала. Оценки показателей эффективности распознавания ВМ получены путем статистических испытаний на выборках радиосигналов с различным ВМ (рис. 9) при разных значениях скорости манипуляции в диапазоне 100–2400 Бод. Для каждого вида сигнала получены обучающие и контрольные выборки по 500 реализаций длиной по $N=1024$ отсчета. Качество распознавания ВМ радиосигналов оценивалось следующими показателями качества: $P_{(M/M+1)}$ – средняя вероятность ошибочного принятия решения в пользу сигналов с заданным ВМ при действии сигналов из $M+1$ -го класса; $P_{(M+1/M)}$ – средняя вероятность ошибочного принятия решения в пользу сигналов из $M+1$ -го класса при действии сигналов с заданным ВМ; P_M – средняя вероятность ошибки за счет перепутывания сигналов внутри класса сигналов с заданными ВМ.

На рис. 10 приведены результаты распознавания ВМ в виде диаграммы обмена показателями качества распознавания $P_{(M/M+1)}$ и $P_{(M+1/M)}$, полученной при $L=1024$ и при соотношении сигнал/шум 9.54 дБ.

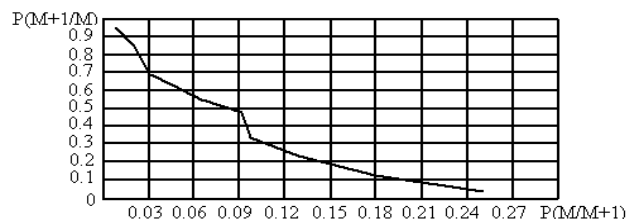


Рис. 10. Диаграмма обмена показателями качества распознавания заданных видов модуляции радиосигналов

Были исследованы зависимости вероятностей ошибок распознавания от длины реализаций сигналов L . При исследованиях при каждом значении $L=8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024$ пороговые значения λ_i выбирались исходя из условия обеспечения требуемой вероятности $P_{(M+1/M)} = 0,05$. Полученные зависимости приведены на рис. 11. Видно, что при $L < 64$ качество распознавания существенно ухудшается, а при $L > 256$ обеспечивается приемлемое качество распознавания ВМ.

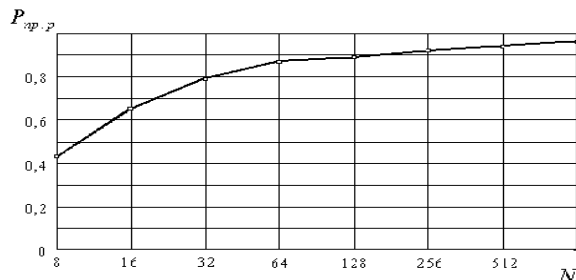


Рис. 11. Зависимость вероятности правильного распознавания ВМ от длины реализаций сигналов

Рассмотренное решающее правило распознавания ВМ (9) обеспечивает среднюю вероятность правильного распознавания ВМ не менее 0,9 при вероятности «ложной тревоги» не более 0,02.

Выводы

1. Приведены решающие правила обнаружения неизвестных сигналов на фоне помех, селекции и распознавания заданных сигналов при наличии неизвестных сигналов, распознавания заданных видов модуляции радиосигналов, которые основаны на описании сигналов разными вероятностными моделями, адекватными решаемой задаче обработки.

2. Исследованы практические особенности решения задач обнаружения и распознавания РИ путем статистического моделирования с использованием выборок реальных сигналов и помех, характерных для автоматизированного РМ.

Список литературы

1. Калужный Н.М., Николаев И.М., Ковшарь В.А. Системная методология оценивания эффективности функционирования национальных систем радиочастотного мониторинга на основе пространственно-частотно-временного подхода // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – №. 12. – С. 375-386.
2. Weber C., Peter M., Felhauer T. Automatic modulation classification technique for radio monitoring // Electronics Letters. – 2015. – Т. 51, No. 10. – P. 794-796.
3. Безрук В.М., Певцов Г.В. Теоретические основы проектирования систем распознавания сигналов для автоматизированного радиоконтроля. – Харьков: Коллегиум, 2007. – 430 с.
4. Рембовский А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин, А.М. Рембовский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 641 с.
5. Специальный радиомониторинг / Коханович Г.Ф., Бабак В.П., Фисенко В.М. – Киев: МК-Прес, 2007. – 384 с.
4. Основы спектральной теории распознавания сигналов / Омельченко, В.А. – Х.: Вища школа, 1983. – 156 с.
5. Borghlund A. Statistical Pattern Recognition // International Journal of Computer (IJC). – 2014. – Т. 7, № 1.
6. Handbook of pattern recognition and computer vision. / Hau C. C. – World Scientific, 2015.
7. Methodologies of pattern recognition. / Watanabe S. – Academic Press, 2014.
8. Мерков А. Б. Распознавание образов. Введение в методы статистического обучения // М.: Едиториал УРСС. – 2011. – Т. 256.
9. Helstrom C. W. Statistical Theory of Signal Detection: International Series of Monographs in Electronics and Instrumentation. – Elsevier, 2013. – Т. 9.
10. An introduction to signal detection and estimation. / Poor H. V. – Springer Science & Business Media, 2013.
11. Signal detection theory and ROC analysis in psychology and diagnostics: Collected papers. / Swets J. A. – Psychology Press, 2014.
12. SDR and CR Boost Wireless Communications [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.electronicdesign.com>.

Надійшла до редколегії 19.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.В. Певцов, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ВІЯВЛЕННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОЇ АПРІОРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ В ЗАДАЧАХ РАДІОМОНІТОРИНГУ

В.М. Безрук, С.А. Іваненко

В даній роботі розглядаються неklasичні методи виявлення та розпізнавання сигналів в умовах підвищеної апріорної невизначеності, які засновані на різних імовірнісних моделях сигналів і перешкод. Проведені дослідження методів обробки сигналів шляхом статистичних випробувань на вибірках реальних сигналів і шумів, характерних для РМ. В результаті досліджень отримано оцінки ймовірності правильного виявлення та розпізнавання сигналів, прийнятні для роботи в комплексах автоматизованого РМ.

Ключові слова: виявлення, розпізнавання, апріорна невизначеність, радіомоніторинг.

DETECTION AND RECOGNITION OF SIGNALS UNDER CONDITIONS OF HIGH A PRIORI UNCERTAINTY IN THE TASKS OF RADIO MONITORING

V.M. Bezruk, S.A. Ivanenko

In this paper, it is consider a non-classical methods of the detection and recognition of signals in case of high a priori uncertainty, which are based on different probabilistic models of signals and interferences. Researches of methods of processing of signals by statistical tests on samples of the real signals and noises characteristic of PM are carried out. As a result of the research, estimates of the probability of correct signal detection and recognition are obtained, which are acceptable for operation in automated PM complexes.

Keywords: detection, recognition, signal, interference, a priori uncertainty, radio monitoring.

Р.Є. Гребеля, І.І. Слюсарь, В.І. Слюсар

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЕРЕКРИТТЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ РЕЗОНАТОРНИХ АНТЕН НА ОСНОВІ УСІЧЕНОГО КОНУСУ

Розглянуто характеристики квазіфрактальних діелектричних резонаторних антен (ДРА) на основі усіченого конусу в залежності від глибини перекриття їх елементів. При цьому досліджені два варіанти антен: більшим діаметром вгору та більшим діаметром до низу. Оцінка та порівняння антен здійснювалися за такими параметрами: амплітудно-частотна характеристика, діаграма спрямованості та коефіцієнт стоячої хвилі. Оцінка зазначених параметрів проводилася за допомогою пакету програм Ansoft HFSS.

Ключові слова: антена, АЧХ, ДС, фрактал, Ansoft HFSS, ДРА.

Вступ

Стрімке розширення функціоналу телекомунікаційної апаратури супроводжується одночасним посиленням вимоги щодо її мініатюризації. Даний аспект технологічного розвитку спонукає виробників до пошуку нових підходів до побудови антенних систем.

При цьому, основний акцент робиться на широкосмуговості та багатодіапазонності. В даному сенсі, досить привабливими є високоефективні діелектричні резонаторні антени (ДРА), що характеризуються компактними розмірами, можливістю формування заданої діаграми спрямованості (ДС) і роботою в широкому частотному спектрі [1]. Як відомо, в даному типі антен використовується діелектрик, з якого легко формуються їх елементи: паралелепіпеди, циліндри, конуси, напівсфери та ін. [2].

З метою реалізації багатодіапазонності при проектуванні ДРА можливо використовувати так званий «фрактальний підхід» [3-5]. Перш за все, він спирається на застосування відомих геометричних фракталів в антенних рішеннях. Існуючі чисельні публікації результатів імітаційного моделювання та експериментів свідчать, що фрактальні антени дозволяють отримати практично той же коефіцієнт підсилення, що і звичайні, але при менших габаритах, що важливо для мобільних телекомунікаційних систем.

В свою чергу, для запропонованих фрактальних ДРА буде досить важко спрогнозувати характеристики через їх залежність від геометричних форм елементів, їх кількості, розміщення цих елементів один відносно одного, а також глибини та наявності перекриття елементів антени. Виходом з цього є використання методів чисельного моделювання [6].

Таким чином, актуальним завданням є розробка антен, що мають одночасно малі габарити, необхідний коефіцієнт посилення та здатність працювати в широкому спектрі частот. При цьому, доцільно дослідити вплив зміни геометрії багатоеlementної ДРА на її просторово-частотні характеристики.

Мета роботи: визначення впливу конструкції та рівня накладання елементів ДРА на базі усіченого конусу на характеристики антени.

Основна частина

На даний час для моделювання антенної техніки існує кілька пакетів програмного забезпечення. Відносно ДРА, досить привабливим є пакет Ansoft HFSS [7].

З метою розширення схемотехніки ДРА в роботі запропоновано спиратись на квазіфрактальну геометрію, для якої існування рекурсивного співвідношення фрактальних ітерацій є необов'язковим.

Для повноти опису впливу геометрії ДРА, крім ДС доцільно розглянути частотні характеристики підсилення (далі – АЧХ) та коефіцієнту стоячої хвилі (КСХ). Згідно [8], для формування ДРА використовується усічений конус з умовного діелектричного матеріалу, діелектрична проникність якого $\epsilon = 50$. Всі досліджені варіанти ДРА містять 5 елементів, які розташовані на одній горизонтальній поверхні, мають однакові геометричні розміри та зроблені з одного матеріалу.

Розміри базового елементу антени з метою аналізу загальних залежностей обрані наступними:

- більший діаметр – 40,
- менший діаметр – 30,
- висота – 15 мм.

Живлення підводиться тільки до центрального елемента антени.

Під час досліджень оцінювались залежності просторово-частотних характеристик ДРА від висоти конусу, схеми живлення та, особливо, глибини перекриття центрального елемента периферійними.

Враховуючі наведені положення, в пакеті Ansoft HFSS була отримана модель ДРА, що відповідає рис. 1. Проаналізувавши результати з дослідження антени, можна зробити такі висновки. ДРА має ДС, що близька за формою до однопроменевої ДС звичайного диполя, резонансна частота знаходиться на

відмітці 10,2 ГГц. АЧХ 5-елементної антени має два виражені резонанси. Якщо необхідно, робочу частоту можна змінити за допомогою варіації розміру антенного елемента (АЕ), у тому числі з метою досягнення злиття резонансів у широкосмугову ділянку. Значення коефіцієнта підсилення хоча і фіксується на досить високому рівні, та все ж таки має недостатні для таких високих частот величини.

Характер впливу висоти АЕ на форму ДС наведений на рис. 2.

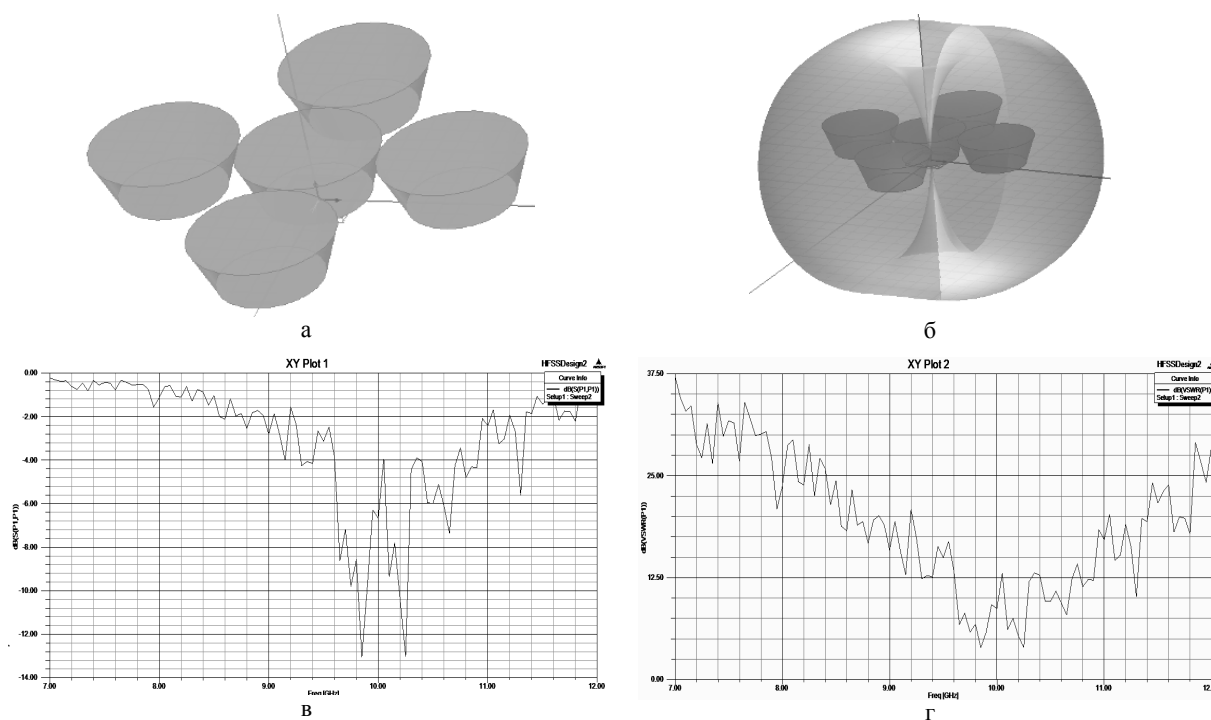


Рис. 1. Базова модель ДРА:
а – компоновка; б – ДС; в – АЧХ; г – КСХ

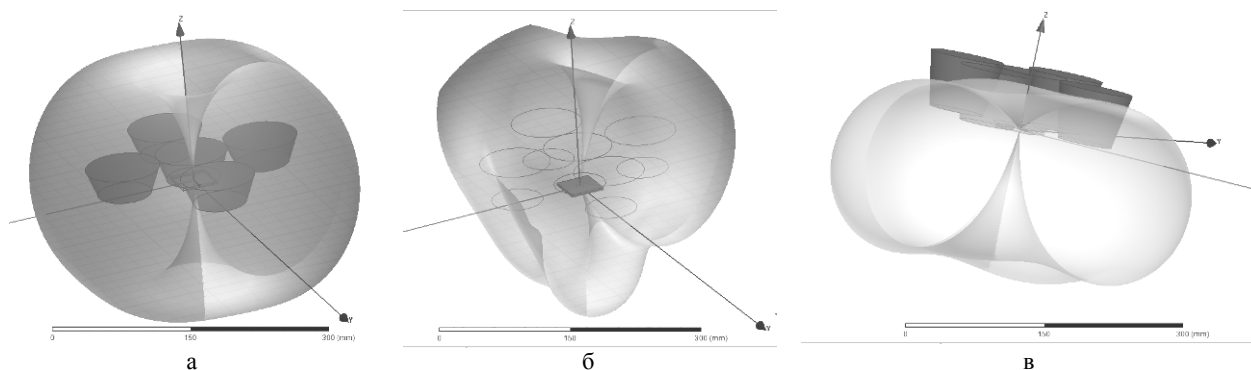


Рис. 2. Вплив висоти АЕ на форму ДС:
а – 30 мм, б – 45 мм, в – 60 мм

При зміні значення співвідношення між діаметрами меншого та більшого основ усіченого конусу також спостерігається відхилення резонансних частот відносно початкового положення (рис. 3).

Подальшим кроком досліджень є введення перекриття (10 мм в основі усічених конусів). Слід зазначити, що якщо в попередньому варіанті АЕ

дотикалися один з одним лише в одній точці, то, в даному випадку, елементи накладаються та утворюють одну суцільну фігуру (рис. 4).

Порівняємо отримані результати.

Очевидно, що антена стала компактнішою за попередню, це є важливим критерієм для сучасної техніки.

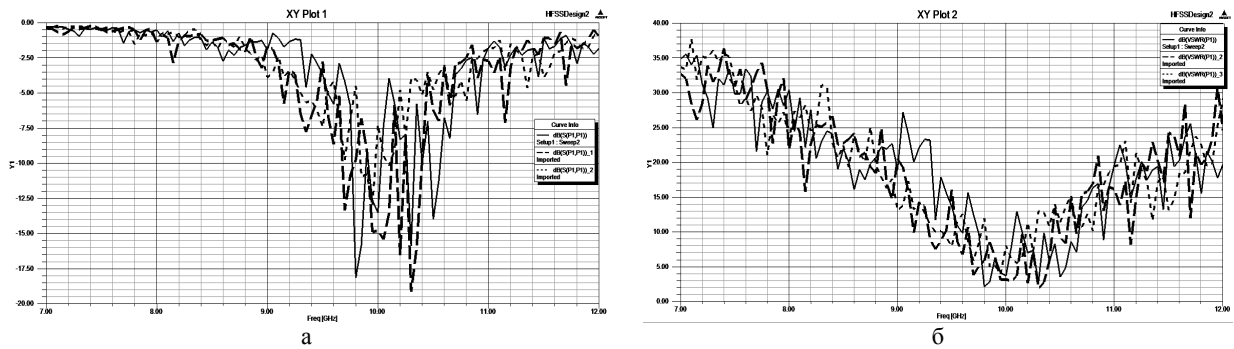


Рис. 3. Вплив зміни діаметру меншої основи АЕ (суцільна лінія – 10 мм; пунктирна лінія – 15 мм; крапкова лінія – 20 мм) при фіксованому діаметрі більшої основи: а – АЧХ; б – КСХ

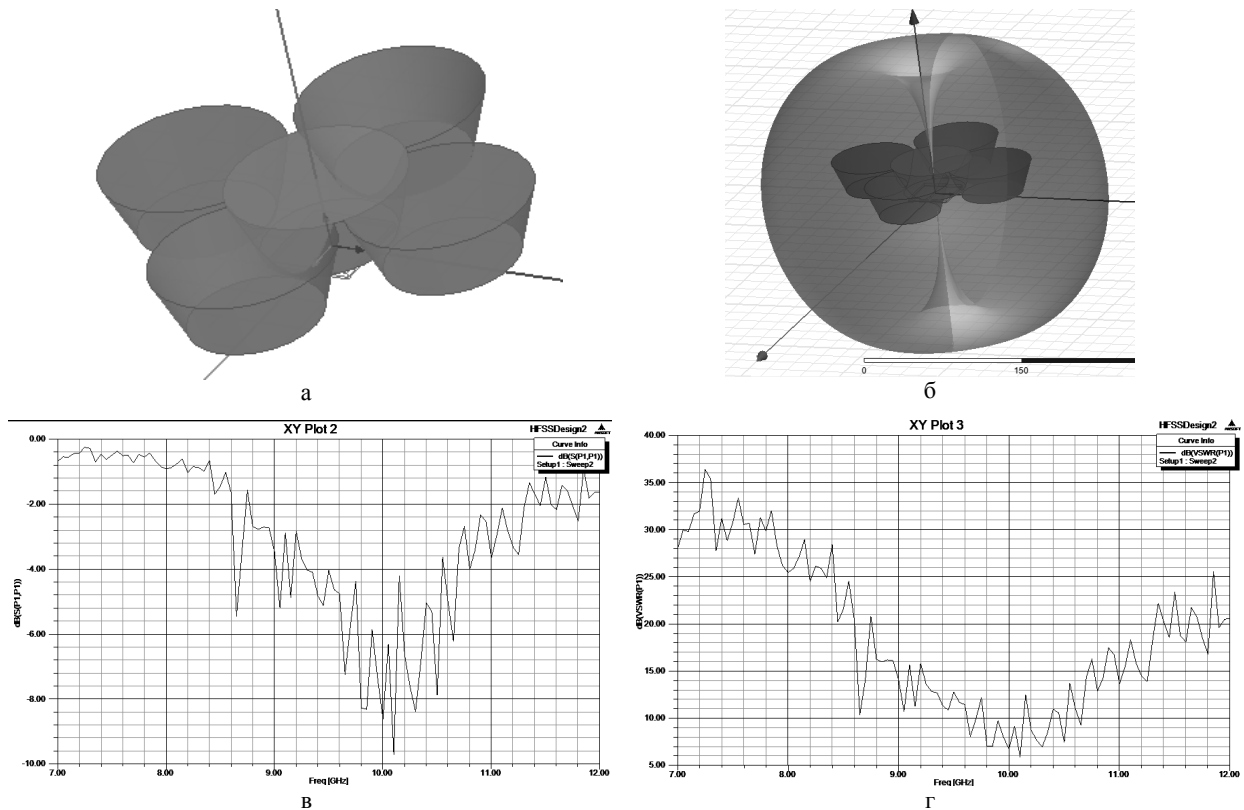


Рис. 4. ДРА з перекриттям АЕ на 10 мм: а – компоновка; б – ДС; в – АЧХ; г – КСХ

Що ж стосується ДС, то вона майже не зазнала ніяких змін і залишилася близькою до однопроменевої. АЧХ, в свою чергу, змінилася більше, ніж ДС. В першу чергу, це стосується збільшеної смуги робочих частот ДРА. При цьому не значно змінилася основна робоча частота з 10,2 до 10,1 ГГц, а також менше, ніж на 1 дБ зменшилось підсилення антени, що не є суттєвим.

Отже, антена з накладанням в 10 мм має трохи гірші параметри, ніж антена без накладання елементів.

Наступною є модель з перекриттям АЕ на рівні 20 мм (рис. 5).

Провівши аналіз отриманих результатів, можна зробити наступні висновки. ДС, як і в двох попередніх випадках, близька до однопроменевої. З графіку

АЧХ видно, що робоча частота знову стала 10,2 ГГц, тобто така ж, як і в антені без накладання.

При детальнішому порівнянні АЧХ антен з накладанням 20 мм і без накладання, можна побачити, що робочий частотний діапазон ДРА з накладанням ширший.

Однак, основна відмінність АЧХ цих антен – збільшений на величину понад 70 % коефіцієнт підсилення антени з накладанням, що є досить непоганим результатом.

Таким чином, три синтезовані варіанти ДРА мають такі властивості.

1. ДС у всіх трьох випадках близька до однопроменевої, що є важливою умовою, в сукупності з малими розмірами, при використанні цих антен в мобільних пристроях.

2. Припущення, що накладання елементів антени зможе підвищити коефіцієнт підсилення антени та вивести його на потрібний рівень виявилось справедливим і в третьому дослідженні, в якому розглянуто ДРА з перекриттям 20 мм. При цьому спостерігається збільшення рівня підсилення антени більше, ніж на 70 %.

3. При аналізі результатів моделювання підтверджено гіпотезу, що ступінь накладання елементів антени впливає на спектр робочих частот, але пошук закономірності зміни ширини спектру у цьому випадку потребує додаткових досліджень.

Надалі, слід розглянути альтернативний варіант базової компоновки ДРА, що відповідає рис. 6.

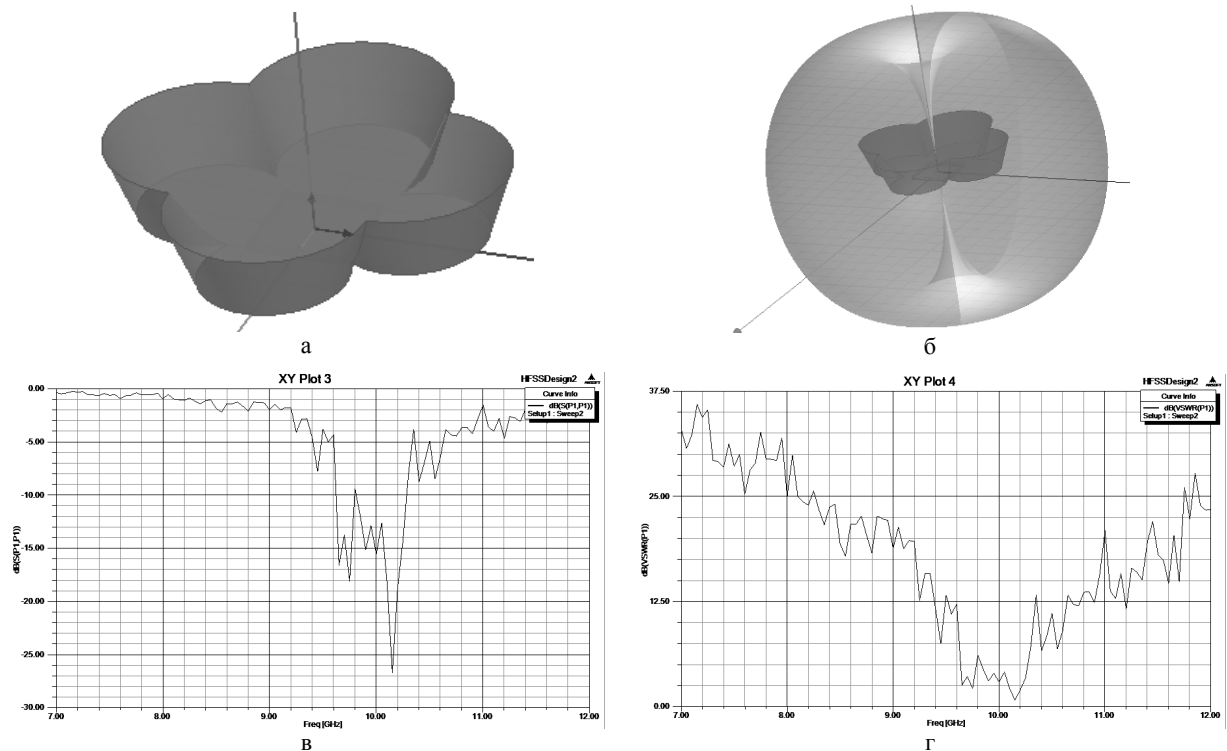


Рис. 5. ДРА з перекриттям АЕ на 20 мм: а – компоновка; б – ДС; в – АЧХ; г – КСХ

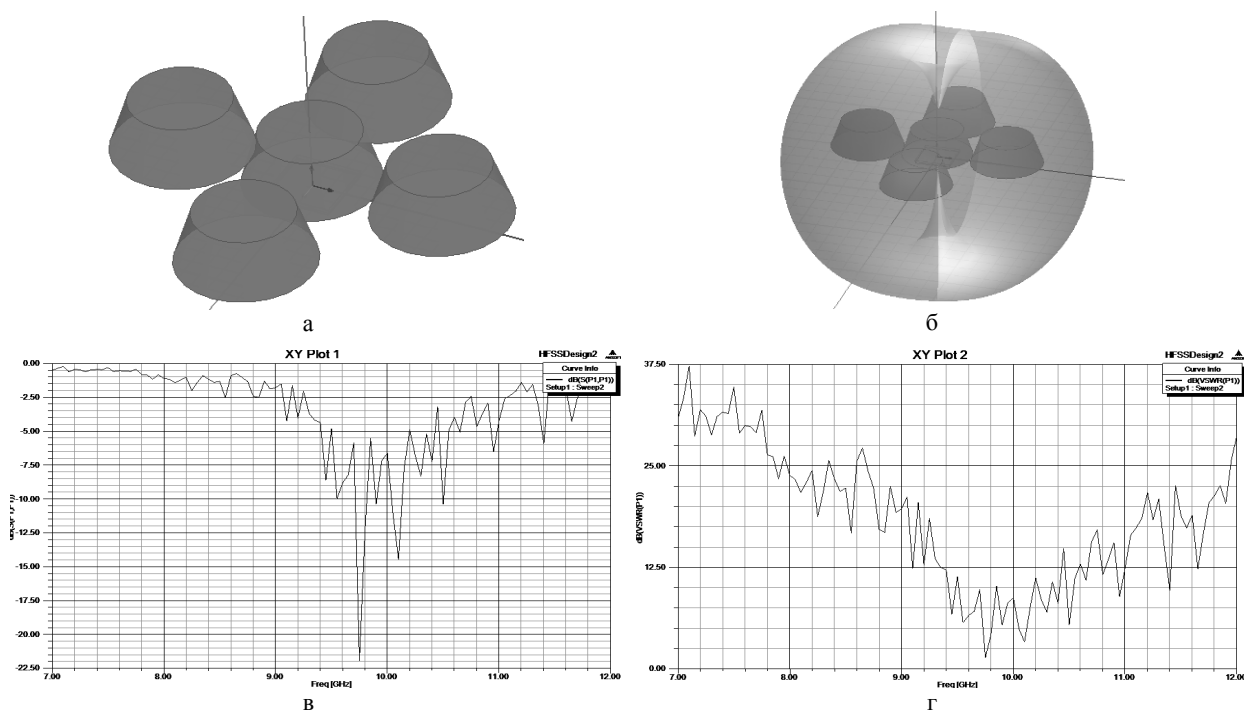


Рис. 6. Друга базова модель ДРА: а – компоновка; б – ДС; в – АЧХ; г – КСХ

Рис. 6 являє собою дзеркальне відображення попередньої версії базової моделі, в якій живлення

підводиться до широкій основі центрального антенного елемента.

З графіків видно, що коефіцієнт підсилення сягає досить високого рівня. Якщо порівнювати, то він вище на 50 % від аналогічного конструктиву антени з більшим радіусом до гори. Також можна відмітити розширення смуги пропускання антени порівняно з першим типом антен.

Варіант ДРА з перекриттям на 10 мм відповідає рис. 7. Як і у всіх попередніх випадках, маємо оптимальну форму ДС. З графіку АЧХ видно, що рівень коефіцієнту підсилення зменшився на чверть, порівняно з минулим варіантом антени. Слід зазначити, що смуга пропускання за цим параметром стала

менше, порівняно з попередньою антеною, та наближається до значень для першої базової антени з перекриттям АЕ на 20 мм. Однак, якщо порівнювати ці дві антени, то в антени (див. рис. 5.в), коефіцієнт підсилення значно вищий ніж у даної. Суттєво, що всі результати отримані без вжиття додаткових заходів для узгодження ДРА з фідером живлення.

Останньою серед даного типу антен розглянемо ДРА з перекриттям в 20 мм (рис. 8). ДС несуттєво змінилася у порівнянні з попередніми конструкціями, якщо придивитися, то в гору та внизу ДС трохи вужча ніж у інших ДРА.

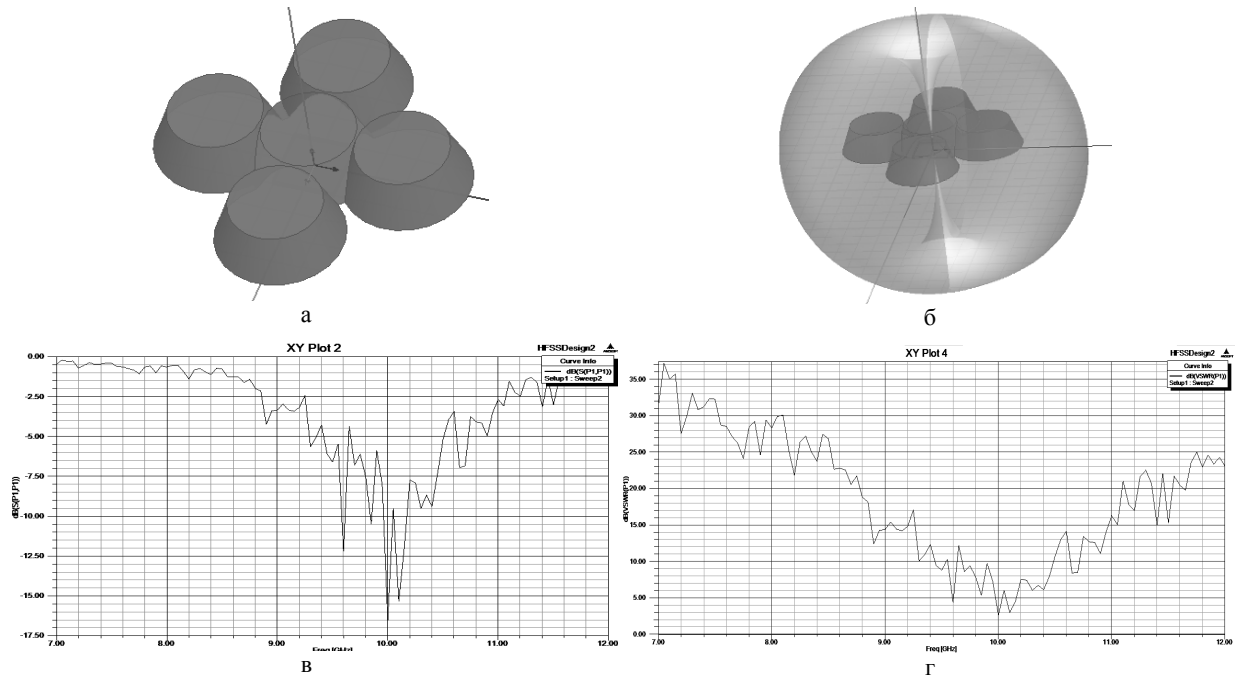


Рис. 7. Друга базова модель ДРА з перекриттям на 10 мм: а – компоновка; б – ДС; в – АЧХ; г – КСХ

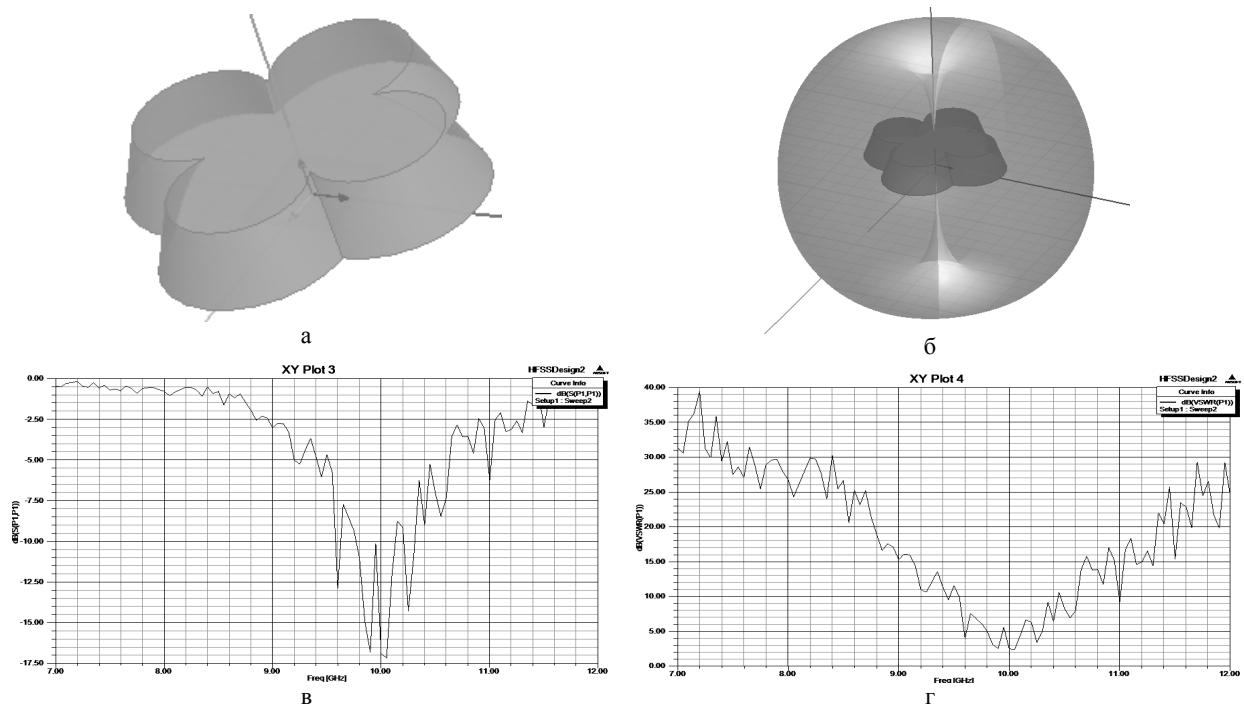


Рис. 8. Друга базова модель ДРА з перекриттям на 20 мм: а – компоновка; б – ДС; в – АЧХ; г – КСХ

Під час досліджень був реалізований також ще один варіант діелектричної резонаторної антени, який відповідає комбінації базових моделей антен: центральний елемент – з першого, а периферійні – з другого варіантів (рис. 9).

Такий підхід є досить перспективним, оскільки в наведеному на рис. 9 графіку АЧХ для випадку відсутності накладання периферійних та центрального елементів видно досягнення рекордного піково-

го значення коефіцієнта підсилення серед усіх розглянутих вище конструкцій діелектричної резонаторної антени.

Зазначений вигравш спостерігається також за наявності перекриття АЕ, що було підтверджено зміною величини перекриття в межах від нуля до 10 мм.

Останній спосіб компоновки діелектричної резонаторної антени відповідає рис. 10.

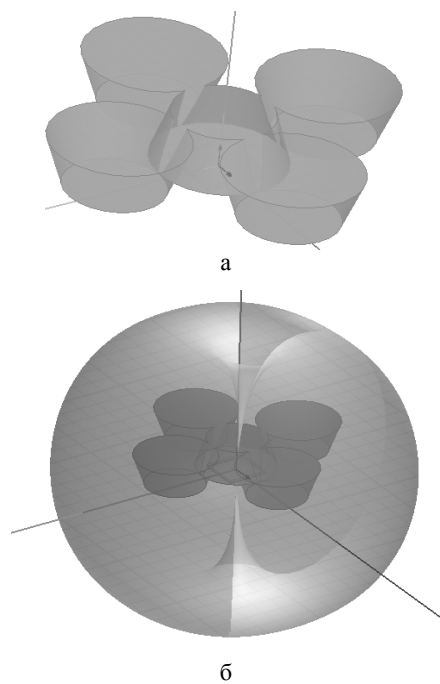


Рис. 9. Комбінаційна базова модель ДРА без накладання АЕ:
а – компоновка; б – ДС; в – АЧХ; г – КСХ

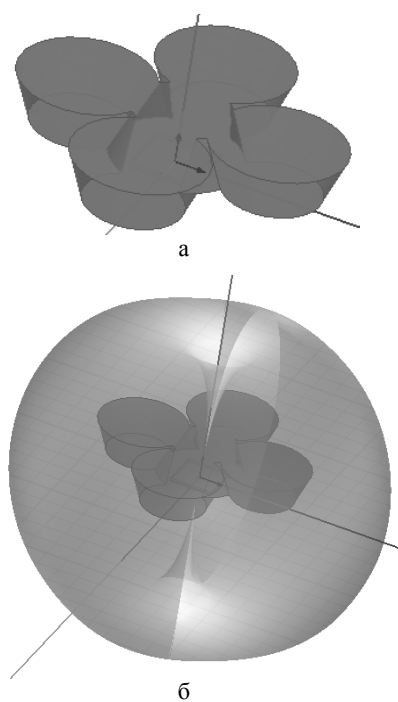
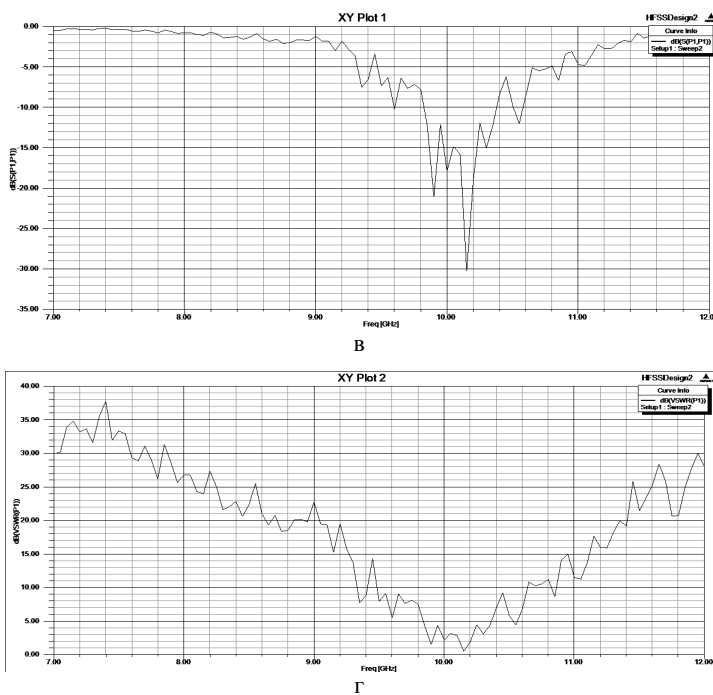
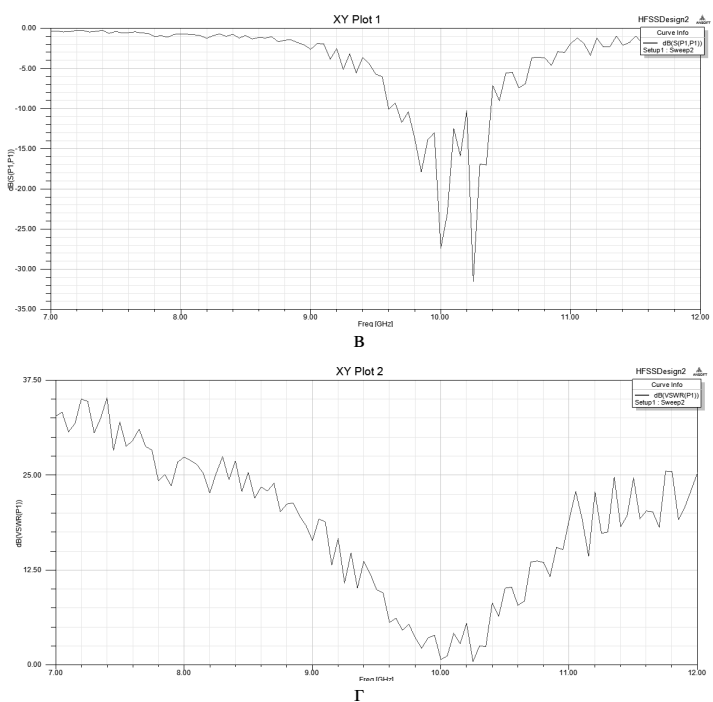


Рис. 10. Комбінаційна модель ДРА з перекриттям 10 мм:
а – компоновка; б – ДС; в – АЧХ; г – КСХ



В ході досліджень синтезовані варіанти антен аналізувались також з врахуванням наявності рефлектора. Однак, детальний опис відповідних результатів виходить за межі даної статті.

ВИСНОВКИ

На основі аналізу результатів моделювання можна зробити кілька висновків.

Реалізація перекриття АЕ ДРА підтвердила допущення про покращення в таких умовах просторово-частотних характеристик антени. Наприклад, в ДРА першого типу рівень підсилення зріс більше, ніж на 70 %, а в антенах другого типу - приблизно на 12,5 %.

Завдяки накладанню елементів вдалося розширити смуги робочих частот ДРА.

ДС виявилися нечутливі до накладання елементів, але за потреби форму ДС можна змінити іншими шляхами, наприклад, зміною геометричних розмірів елементів антени або встановленням рефлектора.

Також треба зауважити, що розміри антен з накладанням елементів суттєво зменшуються, порівняно з антенами без перекриття. А це є дуже важливим фактором для мінімізації розмірів електронної апаратури.

Отже в результаті накладання АЕ отримано антени, які кращі по своїм параметрам, ніж ті, що були на початку моделювання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку моделей ДРА, які забезпечать роботу в кількох діапазонах, стандартизованих для мобільних додатків та Інтернету речей.

Потребує додаткової уваги питання визначення впливу властивостей діелектрика на значення резонансних частот ДРА, варіювання розмірами і кількістю периферійних елементів та застосування метаматеріалів [9].

Список літератури

1. Слюсар В.И. Диэлектрические резонаторные антенны. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2007. – № 2. – С. 28-37.
2. Слюсарь І.І. Імітаційна модель квазіфрактальної 3D-антени. / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Миколенко О.С. // *Проблеми інформатизації: Тези доповідей 5-ої міжнародної НТК, 13-15 листопада 2017 р.* – Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава. – С. 80.
3. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. / Слюсар В.И. // *Радиоаматор.* – 2002. – № 9. – С. 54-56.
4. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип “ломаных” антенн. Часть 1 / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2007. – № 5. – С. 78-83.
5. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. Часть 2. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2007. – №. 6. – С. 82-89.
6. Потапов А.А. Генетические и самоаффинные методы проектирования фрактальных антенн / Потапов А.А., Шифрин Я.С., Кузеев Р.Р. // *Антенны, 2014.* – № 3. – С. 25-48.
7. Банков С.Е. Расчет антен и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. / Банков С.Е., Курушин А.А. – М.: ЗАО «НПП «РОДНИК», 2009. – 256 с.
8. Миколенко О.С. Діелектрична резонаторна антена на основі усіченого конуса. [Електронний ресурс] / Миколенко О.С., Слюсар В.І., Слюсарь І.І. // *Новітні інформаційні системи та технології.* – 2017. – № 8. – Режим доступу: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/3096>.
9. Слюсарь І.І. Метаматеріали в антенах засобів мобільного зв'язку. / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Задорожний Р.С. // *Проблеми інформатизації: Матеріали III-ої міжнародної НТК – Черкаси, ЧДТУ; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТіГН; Полтава: ПолтНТУ, 2015.* – С. 54.

Надійшла до редколегії 19.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.Є. Пустовойтов, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРНЫХ АНТЕНН НА ОСНОВЕ УСЕЧЁННОГО КОНУСА

Р.Е. Гребеля, В.И. Слюсар, И.И. Слюсарь

В работе рассмотрены характеристики квазифрактальных диэлектрических резонаторных антенн (ДРА) на базе усеченного конуса, в зависимости от степени наложения их элементов. Кроме того, были проведены исследования двух вариантов антенн: с большим диаметром сверху, и с большим диаметром снизу. Оценка и сравнение антенн осуществлялось по таким параметрам: амплитудно-частотная характеристика, диаграмма направленности и коэффициент стоячей волны. Оценка этих параметров проводилась с помощью пакета программ Ansoft HFSS.

Ключевые слова: антенна, АЧХ, ДН, фрактал, Ansoft HFSS, ДРА.

INFLUENCE OF IMPOSITION ELEMENTS DIELECTRIC RESONATOR ANTENNA BASED ON A TRUNCATED CONE

R.E. Hrebelia, V.I. Slyusar, I.I. Sliusar

In the paper, the characteristics of quasi-fractal dielectric resonator antennas based on a truncated cone were considered, depending on the degree of superposition of its elements. In addition, two versions of antennas were investigated: with a large diameter to the top, and with a large diameter to the bottom. Evaluation and comparison of antennas was carried out for such parameters: amplitude-frequency response, directivity pattern and VSWR. The evaluation of these parameters was done using Ansoft HFSS software package.

Keywords: antenna, amplitude frequency response, Ansoft HFSS, directivity pattern, ДРА, fractal.

А.І. Ільницький¹, О.І. Бурба²

¹ Інститут телекомунікаційних систем НТУУ «КПІ», Київ

² Військова частина А1906, Київ

СТАТИСТИЧНІ ОЦІНКИ НЕЗМІЩЕНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ДЖЕРЕЛ ВИПРОМІНЮВАННЯ ПРИ РАДІОМОНІТОРИНГУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ І СИСТЕМ

Стаття присвячена висвітленню особливостей отримання статистичних оцінок параметрів джерел радіовипромінювання і характеристик їх незміщеності, ефективності та оптимальності у процесі ведення радіомоніторингу з моноімпульсним визначенням відносного пеленгу радіотехнічних елементів телекомунікаційних систем. Завдання вимірювання параметрів джерел радіовипромінювань розглядається як завдання оцінювання параметрів розподілу щільності імовірності за даними вибірки вхідної випадкової статистики.

Ключові слова: статистичні оцінки, точність пеленгування, джерело радіовипромінювань, радіомоніторинг, моноімпульсне пеленгування, телекомунікаційні системи, незміщеність, ефективність, оптимальність.

Вступ

Відомо [1, 2], що сучасні телекомунікаційні системи (ТКС) виконують велику кількість завдань та відрізняються значною різноманітністю як структурної, так й функціональної побудови і навантаженням за призначенням. Глобальну ТКС можна розглядати як багатофункціональну параметричну радіотехнічну систему, кожний елемент якої у сукупності створює складну радіоелектронну обстановку (РЕО). Складність сучасної РЕО обумовлена такими основними факторами: постійним збільшенням та різноманіттям джерел радіовипромінювання (ДРВп) на фоні обмежених ресурсів наявних сил та засобів радіомоніторингу (РМ); широким діапазоном робочих частот ТКС (від 30 МГц до 400 ГГц) і тривалості сигналів ДРВп (десятки нс - сотні мкс); високою щільністю потоку сигналів ДРВп в точці прийому, яка може досягати $10^5 - 10^7$ імпульсів в секунду; застосуванням сигналів зі складною частотно-часовою структурою та інформаційним наповненням; використанням енергетично прихованих режимів роботи, в тому числі - з короткочасними сеансами випромінювання; появою і використанням відносно нових, наприклад, SDR (Software – defined radio) технологій побудови і експлуатації приймально-передавальних пристроїв ТКС.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Загальний контроль за станом РЕО – радіомоніторинг (РМ) – здійснюють сили і засоби “Українського державного центру радіочастот та нагляду за зв'язком”. Вони визначають умови енергетичного та структурного доступу до ДРВп з метою контролю і забезпечення електромагнітної сумісності радіотехнічних систем, що є запорукою високої ефективності роботи ТКС [3]. При цьому під час РМ повинні визначатися як енергетичні, так і частотно-часові та просторові параметри ДРВп в середовищі ТКС (по-

тужність імпульсних і безперервних сигналів, їх миттєва частота та її девіація, тривалість імпульсів і період повторення, ширина спектра і вид модуляції сигналів, значення пеленга на ДРВп та його місцеположення тощо).

Однак на думку як науковців, так і операторів ТКС поряд з загальним контролем стану РЕО та виконання умов електромагнітної сумісності засобами ДРВп необхідно мати і автономні засоби РМ, які мають бути задіяні та розташовані безпосередньо на приймально-передавальній апаратурі ТКС для здійснення оперативного контролю.

Слід зазначити, що технічні засоби РМ працюють в складних умовах часткової або повної невизначеності, при цьому в результаті контролю отримуються не параметри ДРВп, а їх статистичні оцінки, які повинні задовольняти умовам Крамера-Рао і бути незміщеними, ефективними та оптимальними [3]. Велика точність цих статистичних оцінок параметрів сигналів, отриманих в реальному масштабі часу, гарантує високу ефективність РМ і працездатність ТКС. Тому проблемні питання, які обумовлені завжди існуючими суперечливостями між високими вимогами до ефективності технічних засобів РМ та їх реальними можливостями, вимагають постійного подальшого розвитку теорії і практики апаратно-програмних засобів радіоконтролю, створення нових і модернізації існуючих зразків спеціального обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз стану технічного оснащення сил і засобів радіоконтролю, технічних характеристик обладнання (апаратури контролю) свідчить про те, що проблемні питання щодо підвищення їх ефективності залишаються актуальними. Разом з цим, останнім часом у відомій науково-технічній літературі з'являються відомості про нові наукові та практичні результати в галузі теорії і практики радіокон-

тролю: нові та уточнені математичні моделі процесів РМ, нові і удосконалені методи, способи і методики вимірювання основних параметрів ДРВП та апаратно-програмні пристрої їх реалізації [4 – 6]. Однак, слід звернути увагу, що автори нових розробок в цей предметної області обмежуються лише отриманням наукових результатів на ідейно-принциповому рівні [7 – 9], і багато питань практичного значення залишається поза їх увагою.

В якості прикладу можна розглянути використання SDR (Software – defined radio) технологій побудови і експлуатації приймально-передавальних пристроїв ТКС [4], де застосовуються програмні зміни робочих радіочастотних параметрів сигналів (вихідна потужність, діапазон зміни робочих частот тощо), які можуть змінюватися як детерміновано, так і випадково). Природно, що радіоконтроль таких ДРВП є складним науковим і практичним завданням та потребує особливої уваги. Найактуальнішими стають питання миттєвого отримання з високою точністю енергетичних і частотно-часових оцінок параметрів ДРВП та їх моноімпульсного пеленгування з подальшим визна-

$$\beta^* = \arcsin\left(\frac{\lambda_H^*}{2\pi d} \arctg \frac{U_1}{U_2}\right) = \arcsin\left(\frac{\lambda_H^*}{2\pi d} \arctg \left[\frac{\int_{t-T}^t x_1(t) \cos \omega_H t dt \int_{t-T}^t x_2(t) \sin \omega_H t dt - \int_{t-T}^t x_1(t) \sin \omega_H t dt \times \int_{t-T}^t x_2(t) \cos \omega_H t dt}{\int_{t-T}^t x_1(t) \cos \omega_H t dt \int_{t-T}^t x_2(t) \cos \omega_H t dt + \int_{t-T}^t x_1(t) \sin \omega_H t dt \int_{t-T}^t x_2(t) \sin \omega_H t dt} \right]^{-1} \right), \quad (1)$$

де λ_H^* – оцінка довжини хвилі вхідного сигналу з несучою частотою ω_H , яка відома, або вимірюється окремим вимірювачем миттєвої частоти; d – величина фазометричної бази антенної системи пеленгатора; $x_1(t) = S_1(t) + n_1(t)$; $x_2(t) = S_2(t) + n_2(t)$ – сигнально-завадова суміш у приймальних каналах пеленгатора; $S_1(t) = S(t) \cos[\omega_H t + \phi + \psi(t)]$; $S_2(t) = S(t) \cos[\omega_H t + \phi + \psi(t)]$ – корисні сигнали на вході приймальних каналів пеленгатора; $\phi = \pi d / \lambda_H \cdot \sin \beta$; $n_1(t) = N_1(t) \cos[\omega_0 t - \phi_1(t)]$; $n_2(t) = N_2(t) \cos[\omega_0 t - \phi_2(t)]$ × $N_2(t)$ – незалежні внутрішні шуми у приймальних каналах пеленгатора; U_1 – сигнал різницевого каналу фазометричної обробки; U_2 – сигнал сумарного каналу фазометричної обробки; $x_1(t) \cos \omega_H t = x_{1c}$ та $x_1(t) \times \sin \omega_H t = x_{1s}$; $x_2(t) \cos \omega_H t = x_{2c}$ та $x_2(t) \sin \omega_H t = x_{2s}$ – квадратурні (с – косинусоїдальна, s – синусоїдальна) складові сигналів $x_1(t)$ та $x_2(t)$ відповідно.

Наведений вираз (1) для подальшого аналізу отриманої оцінки пеленгу зручніше надати в вигляді:

$$\beta^* = \arcsin\left(\frac{\lambda_S}{2\pi d} \arctg \frac{2(x_{1\Delta c} x_{2\Sigma s} - x_{1\Delta s} x_{2\Sigma c})}{(x_{1\Sigma c}^2 + x_{2\Sigma s}^2) - (x_{1\Delta c}^2 + x_{2\Delta s}^2)}\right), \quad (2)$$

де індекси Δ і Σ при x_1 та x_2 вказують на різнице-

ченням місцеположення ТКС, які підлягають контролю в реальному масштабі часу.

На підставі наведеного *метою і основним змістом статті* є висвітлення результатів аналізу умов отримання незміщених, ефективних та оптимальних статистичних оцінок точності при пеленгуванні джерел радіовипромінювань двоканальними фазовими моноімпульсними пеленгаторами, як апаратно-програмними засобами радіомоніторингу телекомунікаційних мереж і систем.

Виклад основного матеріалу

В [5] запропоновано спосіб двоканального фазового моноімпульсного пеленгування джерел радіовипромінювання станціями радіомоніторингу, а в [6] – пристрій його реалізації, які в сукупності створюють апаратно-програмний засіб радіомоніторингу для аналізу РЕО в середовищі ТКС. Також описано процес отримання достатньо точних оцінок відносного пеленгу на ДРВП β^* , які обчислюються з використанням квадратурних складових прийнятих сигналів в пеленгаційних каналах за виразом:

вий і сумарний канали апаратної обробки квадратур сигналів x_1 та x_2 відповідно.

Обчислення тригонометричних функцій \arctg і \arcsin здійснюється програмно.

Як було зазначено, отримані статистичні оцінки повинні задовольняти умовам Крамера-Рао і бути незміщеними, ефективними та оптимальними, тобто їх математичне сподівання $E(\beta^*)$ та дисперсія $D(\beta^*)$ матимуть мінімальні значення [3]. Проведемо аналіз результатів оцінювання параметрів відносного пеленгу для вузькосмугових сигналів, отриманих за виразами (1) і (2) з визначенням математичного сподівання s та дисперсії $D(\beta^*)$ оцінок відносного пеленгу. Враховуючи те, що щільність імовірності оцінки β^* , отриманої в результаті складної апаратної обробки, у загальному випадку невідома, доцільно використати метод лінеаризації функцій кількох випадкових аргументів [3, 9].

Припустимо, що функція $\beta^* = f(x_{1c}, x_{1s}, x_{2c}, x_{2s})$, $i = 1, 2$ є достатньо гладкою в області точки математичного сподівання $E_1(x_{1c}), E_1(x_{1s})$ реалізації сигналу x_1 . Це надає можливість з достатнім ступенем точності апроксимувати її рядом Тейлора. Обмежуючись тільки лінійними членами розкладу функції $f(x_{1c}, x_{1s}, x_{2c}, x_{2s})$ некорельованими, отримуємо таке значення математичного очікування оцінки пеленгу:

$$E(\beta^*) = \arcsin \left(\frac{\lambda_S}{2\pi d} \arctg \left[\frac{E(x_{1C})E(x_{2S}) - E(x_{1S})E(x_{2C})}{E(x_{1C})E(x_{2C}) + E(x_{1S})E(x_{2S})} \right] \right), \quad (3)$$

де $E(x_{1C}) = S/2 \cdot \cos(\psi + \phi)$; $E(x_{1S}) = -S/2 \cdot \sin(\psi + \phi)$;
 $E(x_{2C}) = S/2 \cdot \cos(\psi - \phi)$; $E(x_{2S}) = -S/2 \cdot \sin(\psi - \phi)$ – математичні сподівання квадратурних складових.

Отже, математичне сподівання оцінки β^* пеленгу (3), знайдене тільки за лінійними членами ряду Тейлора функції $f(x_{1C}, x_{1S})$ можна вважати її грубим значенням, яке дорівнює дійсному значенню відносного пеленгу β_T^* , що свідчить про незміщеність, достовірність та ефективність саме грубої оцінки параметрів. Дисперсія грубої оцінки $D(\beta_T^*)$ у цьому випадку визначається за виразом:

$$D(\beta_T^*) = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial \beta^*}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{KB}^2, \quad (4)$$

де $x_1 = x_{1C}$; $x_2 = x_{1S}$; $x_3 = x_{2C}$; $x_4 = x_{2S}$ – квадратурні складові x_i ; σ_{KB} – дисперсія шуму у квадратурних каналах пеленгатора; E – символ математичного сподівання величини x_i .

Вирішуючи (2, 3), як функцію (4), отримаємо:

$$D(\beta_T^*) = \frac{\lambda_S^2}{2\pi^2 d^2 q^2 \cos^2 \beta}. \quad (5)$$

Характер зміни дисперсії оцінки пеленгу $D(\beta_T^*)$ можна проаналізувати, задаючись фіксованими значеннями параметрів, від яких вона залежить, згідно з виразом (5). Хоча слід відмітити, що вираз (5) коректний лише для невеликої і достатньо лінійної ділянки функції (1), що знаходиться навколо нормалі до бази пеленгатора. Збільшити розміри цієї ділянки та уточнити результати, отримані за її допомогою, можна використавши розклад функції $\beta = f(x_i), i = 3$ в ряд Тейлора, де необхідно врахувати і третій квадратичний член [5]. У цьому випадку можна стверджувати, що отримані оцінки будуть мати більш точні значення β_T , а математичне сподівання $E(\beta_T^*)$ та дисперсія $D(\beta_T^*)$ точної оцінки визначатиметься за такими виразами:

$$E(\beta_T^*) = [f(x_i)]_E + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial x_i^2} \right) \sigma_{KB}^2; \quad (6)$$

$$D(\beta_T^*) = \sigma_{KB}^2 \times \left[\sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial \beta^*}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial x_i^2} \right)^2 \sigma_{KB}^4 + \sum_{i < j} \left(\frac{\partial^2 \beta}{\partial x_i \partial x_j} \right)^2 \sigma_{KB}^4 \right]. \quad (7)$$

Використовуючи похідні $\left(\frac{\partial^2 \beta^*}{\partial x_i^2} \right)_E$, запишемо другий доданок правої частини виразу (7):

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \left(\frac{\partial^2 \beta^*}{\partial x_i^2} \right)_E \sigma_{KB}^4 = \frac{2\lambda_S}{\pi d \cos \beta} \frac{\sigma_{KB}^4}{S^2} \times \left[2\text{tg}2\phi \left(1 - \frac{1}{\cos^3 2\phi} \right) - \frac{\lambda_S}{2\pi d \cos \beta} \right]. \quad (8)$$

З урахуванням наведених вище виразів та нелінійного члена розкладу функції $f(x_i)$ у ряд Тейлора (8), математичне сподівання точної оцінки відносного пеленгу можна записати у вигляді:

$$E(\beta_T^*) = \beta + \frac{\lambda_S^2}{2\pi d q^2 \cos \beta} \left[2\text{tg}2\phi \left(1 - \frac{1}{\cos^3 2\phi} \right) - \frac{\lambda_S}{2\pi d \cos \beta} \right], \quad (9)$$

з якого видно, що математичне сподівання збільшується на величину другого доданку виразу (9).

За виразом (9) в середовищі MathCAD проведіть розрахунки і побудовані графічні залежності математичного сподівання $E(\beta^*)$ від кута надходження радіосигналу відносно рівносигнального напрямку при лінійної та нелінійної апроксимації (рис. 1) за умови, що $q^2 = 10$; $d = 0,5\lambda$. На рисунку суцільною лінією показане математичне сподівання $E(\beta^*)$ у лінійному наближенні, а пунктирною – з урахуванням нелінійного члена ряду Тейлора.

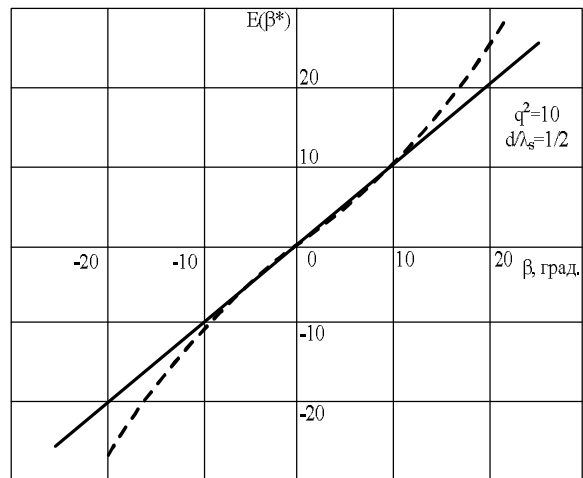


Рис. 1. Залежність математичного сподівання оцінки $E(\beta^*)$ відносного пеленгу від кута надходження радіосигналу

З наведеного графіку видно – уточнена зазначеним способом залежність $E(\beta_T^*)$ від величини відносного кута надходження радіосигналу має нелінійний характер, що свідчить про наявність нестабільної систематичної похибки при оцінюванні відносного пеленгу за лінійною, грубою моделлю $E(\beta_T^*)$, яка зростає по мірі відхилення від рівносигнального напрямку. Це у багатьох практичних випадках є однією з причин застосування моноімпульсних пристроїв лише для індикації точного наведення антени пеленгатора на ДРВп в процесі послідовного пеленгування.

Рішення (7) з урахуванням (9) дає вираз для знаходження величини дисперсії точної оцінки відносного пеленгу $D(\beta_T^*)$, яке з урахуванням нелінійного члена ряду Тейлора, матиме вигляд [5]:

$$D(\beta_T^*) = \frac{\lambda_S^2}{2\pi^2 d^2 q^2 \cos^2 \beta} \left(1 + \frac{1}{q^2} \left[\frac{\lambda_S}{\pi d \cos \beta} \times \left(\frac{\lambda_S}{4\pi d \cos \beta} + \frac{2\text{tg}2\phi}{\cos^3 2\phi} - \text{tg}2\phi \right) - \frac{\text{tg}\beta \text{tg}2\phi}{\cos \beta} + \text{tg}^2 2\phi \left(\frac{2,25}{\cos^6 2\phi} - \frac{4}{\cos^3 2\phi} + 2,25 \right) \right] \right) \quad (10)$$

Графік залежності дисперсії $D(\beta^*)$ від кута надходження радіосигналу β відносно рівносигнального напрямку, побудований за виразами (5 і 10), наведено на рис. 2, де суцільною лінією показано залежність дисперсії грубої оцінки у лінійному наближенні $D(\beta_T^*)$, а пунктирною – з урахуванням нелінійного члена ряду Тейлора – точної оцінки $D(\beta_T^*)$.

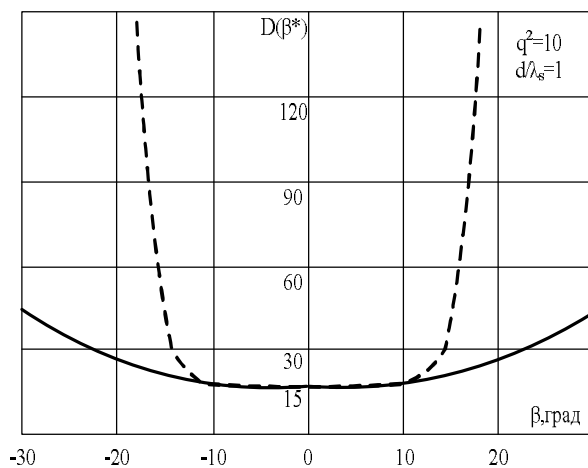


Рис. 2. Залежність дисперсії оцінки $D(\beta^*)$ відносного пеленгу від кута надходження радіосигналу

Характер отриманих залежностей свідчить, що лінійна апроксимація визначення дисперсії оцінок відносного пеленгу дійсна лише у невеликому секторі навколо рівносигнального напрямку, як і було передбачено раніше. Уточнена за нелінійною складовою ряду Тейлора залежність дисперсії має більш виражені межі робочої ділянки сектору пеленгування, де похибки пеленгування мінімальні, що у свою чергу може бути індикатором лінійної ділянки дискримінаційної характеристики. З урахуванням наведеного, в подальшому можна казати про грубий і точний тракти пеленгування з відповідними дискримінаційними (пеленгаційними) характеристиками (ДХ), які реалізуються програмними засобами пристрою.

Аналіз залежності дисперсії оцінок пеленга $D(\beta^*)$ у грубому (β_T^*) та точному (β_T^*) трактах, розрахованих за виразом (9) для відношення сиг-

нал/шум за потужністю $q^2=10$ (рис. 2), показує, що на ДХ точного тракту існують кутові інтервали навколо точок розриву функцій $\text{tg}2\phi$, де $D(\beta_T^*)$ швидко зростає до безкінечності. Це свідчить про суттєве погіршення точності пеленгування і втрату працездатності тракту точного пеленгування на цих ділянках через недостовірність отриманих оцінок точного пеленгу β_T^* . В [5] показано, що для мінімізації похибок вимірювання відносного пеленгу доцільно використовувати додаткову зворотну, котангенціальну ДХ, яка формується програмно в спецобчислювачі. В цьому разі формується додатковий точний канал вимірювання β_T^* з уточненою дисперсією оцінок пеленгу:

$$D^\nabla(\beta_T^*) = \frac{\lambda_S^2}{2\pi^2 d^2 q^2 \cos^2 \beta} \left(1 + \frac{1}{q^2} \left[\frac{\lambda_S}{\pi d \cos \beta} \left(\frac{\lambda_S}{4\pi d \cos \beta} + \frac{2\text{tg}(2\phi + \pi/2)}{\sin^3 2\phi} + \text{tg}(2\phi + \pi/2) \right) + \frac{\text{tg}\beta}{\cos \beta} \text{tg} \left(2\phi + \frac{\pi}{2} \right) + \text{tg}^2(2\phi + \pi/2) \left(\frac{2,25}{\sin^6 2\phi} + \frac{4}{\sin^3 2\phi} + 2,25 \right) \right] \right) \quad (11)$$

Як приклад, за виразами (5, 10, 11) в середовищі MathCAD проведені розрахунки величини дисперсії оцінок пеленгу у грубому і точному трактах пеленгатора за умови, що $\lambda_H^* = 3\text{cm}$; $d/\lambda = 3$; $q^2 = 10$; $\phi = (\pi d \cdot \sin \beta) / \lambda_H$.

Результати розрахунків надані у вигляді графічних залежностей, наведених на рис. 3, де залежність $D^\nabla(\beta_T^*)$ показана пунктиром.

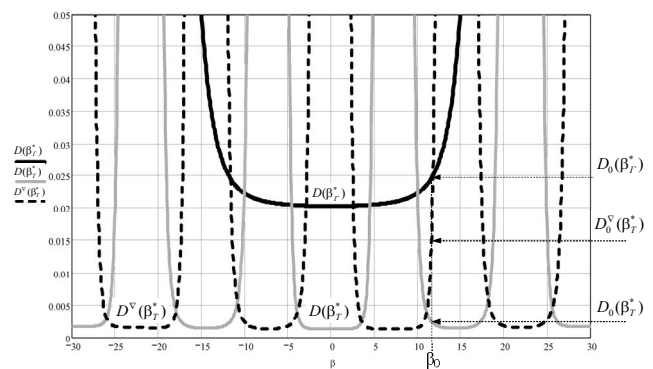


Рис. 3. Залежність дисперсії оцінок пеленгу у грубому і точному трактах пеленгатора

З наведеного видно, що при програмному використанні додаткової ДХ дисперсія оцінки пеленгу набуває мінімальних значень саме на тих ділянках, де оцінка пеленгу за допомогою основної ДХ недостовірна або неможлива. Це у свою чергу свідчить про доцільність використання значень $U_T(\beta)$ і $U^\nabla(\beta)$, як показників надійності відліків пеленгу, отриманих

на певних ділянках ДХ точного тракту, з подальшим програмним вибором з них більш достовірного значення β_T^* .

Крім того, необхідно відмітити, що завдяки програмному використанню додаткової оберненої ДХ та вибору точних оцінок пеленгу з мінімальною дисперсією, результуюча дисперсія у тракті точного пеленгування набуває більш гладкого характеру і величин, близьких до мінімальних значень.

Висновки

1. Завдання вимірювання параметрів джерел радіовипромінювань є задачею оцінювання параметрів розподілу щільності імовірності за даними вибірки вхідної випадкової статистики.

2. При радіомоніторингу, що відбувається в умовах часткової або повної невизначеності, отримуються не значення параметрів вхідних сигналів, а їх оцінки, які повинні задовольняти умовам Крамера-Рао і бути незміщеними, ефективними та оптимальними.

3. Незміщеність, ефективність та оптимальність оцінок повинна оцінюватися за величинами математичного сподівання і дисперсії параметрів джерел радіовипромінювань, які матимуть мінімальні значення.

4. Мінімальні значення математичного сподівання і дисперсії параметрів джерел радіовипромінювань можна отримати тільки при коректному опису внутрішніх параметрів пристроїв радіомоніторингу. В багатьох випадках лінійна апроксимація внутрішніх параметрів призводить до великих похибок вимірювання і втрати незміщеності, ефективності та оптимальності статистичних оцінок сигналів.

5. Наведений підхід до аналізу статистичних оцінок параметрів, які підлягають апроксимації з використанням їх розкладу в ряд Тейлора, дає можливість підвищити точність визначення математичного сподівання і дисперсії оцінок. Його застосування, що розглянуто на прикладі пеленгування джерел радіовипромінювань моноімпульсними пеленгаторами,

може забезпечити програмну мінімізацію математичного сподівання і дисперсії апаратно отриманих оцінок та бути поширено на визначення цілого ряду енергетичних, частотно-часових і просторових оцінок параметрів будь-якої радіотехнічної системи.

Список літератури

1. Радзиевский, В.Г. Теоретические основы радиоэлектронной разведки / В.Г. Радзиевский, А.А. Сирота. – М.: Радиотехника, 2004. – 432 с.
2. Рембовский, А.М. Радиомониторинг: задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашимхин, В.А. Козьмин; Под ред. А.М. Рембовского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 492 с.
3. Ільницький, А.І. Статистичні характеристики інформаційних ознак джерел випромінювання при радіомоніторингу телекомунікаційних мереж / А.І. Ільницький, О.І. Бурба, О.О. Пасічник // Управляющие системы и машины. - 2016. - № 6. - С. 48-58.
4. Галкин, В.А. Основы программируемого конфигурируемого радио / В.А. Галкин – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 375 с.
5. Войтко, В.В. Спосіб двоканального фазового моноімпульсного пеленгування джерел радіовипромінювання станціями радіомоніторингу / В.В. Войтко, А.І. Ільницький, А.А. Казаров // Деклараційний патент № 107503 на корисну модель U 2015 12210 – Бюл.№11, 10.06.2016.
6. Войтко, В.В. Пристрій двоканального однобазового моноімпульсного вимірювання пеленгу на джерело радіовипромінювання станціями радіомоніторингу на несучій частоті вхідних сигналів / В.В. Войтко, А.І. Ільницький, А.А. Казаров // Деклараційний патент № 122275 на корисну модель U 2017 08068 – Бюл.№24, 26.12.2017.
7. Родс, Д.Р. Введение в моноимпульсную радиолокацию / Пер. с англ. Б.М.Герасимова, Под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: Сов.радио, 1960 – 160 с.
8. Леонов, А.И. Моноимпульсная радиолокация / А.И.Леонов, К.И.Фомичев – М.: Сов. радио, 1970.-392 с.
9. Денисов, В.П. Фазовые радиопеленгаторы: Монография / В.П. Денисов – Томск: Томский гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2002. – 251 с.

Надійшла до редколегії 26.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К.С. Козелкова, Державний університет телекомунікацій, Київ.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ НЕСМЕЩЕННОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ РАДИОМОНИТОРИНГЕ ТЕЛЕКОМУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ И СИСТЕМ

А.И. Ильницкий, О.И. Бурба

Статья посвящена рассмотрению особенностей получения статистических оценок параметров источников радиозлучения и характеристик их несмещенности, эффективности и оптимальности в процессе ведения радиомониторинга с моноимпульсным определением относительного пеленга радиотехнических элементов телекоммуникационных систем.

Ключевые слова: статистические оценки, точность пеленгования, источник радиозлучения, радиомониторинг, моноимпульсное пеленгование, телекоммуникационные системы, несмещенность, эффективность, оптимальность.

STATISTICAL ESTIMATIONS OF THE NON-DISPLACEMENT AND EFFICIENCY OF EMISSIONS SOURCE PARAMETERS AT RADIONITORING OF TELECOMMUNICATION NETWORKS AND SYSTEMS

A.I. Ilnitskiy, O.I. Burba

The article is devoted to the consideration of the features of obtaining statistical estimates of the parameters of radio emission sources and the characteristics of their non-displacement, efficiency and optimality in the process of radiomonitoring with a monopulse determination of the relative bearing of radio engineering elements of telecommunication systems.

Keywords: statistical estimation, accuracy of direction finding, source of radio emissions, radio monitoring, monopulse direction finding, telecommunication systems, non-displacement, efficiency, optimality.

O.V. Kalvatynsky

Center of the special information receiving and processing and the navigating field control

STUDY OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF DIFFERENT ANTENNAS FOR THE RECEIVING OF SPECIAL INFORMATION FROM THE SATELLITES TYPE OF CUBESAT FOR REMOTE SENSING OF THE EARTH

The **subject matter** of the article is the radio links of the target information of the space remote sensing systems (Earth remote sensing) from spacecraft of the CUBESAT type. The aim is to study the effectiveness of receiving antennas of different diameters (5 and 12 m), namely, changing the information receiving zone. The **goal**: to develop a mathematical model for determining the minimum reception angles of the target information, taking into account the directional pattern and the flaps of the maximum of the diagram from the direction to the receiving station. Determine the minimum angles of the receiving location of the target information with a given error probability per bit of information ($< 10^{-7}$) under the condition of different types of on-board transmitting antennas and receive antennas of different diameters. The **methods** used are: synthesis, mathematical modeling and graphical analysis of the results obtained. The following **results** are obtained. When using a transmitting helical antenna, the minimum reception angles with a given error probability per bit of information $< 10^{-7}$ are less by 10^0 than using a patch antenna. But the value of signal to noise ratio (S/N) when using a helical antenna is dominated by a patch antenna at elevation angles greater than 64^0 , subject to rotation in the direction of the receiving station. When using reflectors with a diameter of 5 m, it is possible to receive information with a specified error probability only for elevation angles greater than 23.5^0 . Thus, the use of reflectors with a diameter of 12 m will significantly increase the possibilities for surveying the Earth's surface due to a longer session of receiving special information. **Conclusions.** Analysis of the technical characteristics of modern on-board components of spacecraft like CUBESAT has demonstrated the promise of using such spacecraft for environmental monitoring. The study of the CUBESAT satellite radio link was carried out taking into account the directional pattern of the on-board transmitting antenna of the target radio link, using a mathematical model created by the author. Using a patch antenna in comparison with a helix antenna makes it possible to extend the information receiving area with specified quality indicators by 10^0 by the elevation angle. Comparison of receiving stations with an antenna diameter of 5 and 12 m indicates the prospects of using reflectors of antenna systems with a diameter of 12 m, which are in Ukraine. The use of ground antennas with a reflector diameter of 12 m will allow receiving special information at minimum elevation angles of 12^0 under the conditions of the calculations (orbit height, on-board transmitter power, data transfer speed).

Keywords: spacecraft, CUBESAT, remote sensing of the Earth, onboard transmitter, receiving station, minimum angles of the information receiving area.

Introduction

Modern trends in the development of space systems aimed at reducing the weight of spacecraft. According to NASA reports [1, 2], operators of space systems are interested in operating low-orbit spacecrafts devices with a mass of less than 180 kg. But a great interest in commercial operators of space systems arises in the use of devices created using CUBESAT technology. This is due to the low cost of developing, creating, launching and operating such on-board devices. At the same time, the low mass of the CUBESAT (up to 10-12 kg) induces the use of radio circuits with a lower power of the on-board transmitter at a high data rate (more than 200 Mbit / s) and a given error probability of the received information $BER = 10^{-7}$. Therefore, it is expedient to study the efficiency of using the most common receiving antennas with different reflector diameters from 5 to 12 m in order to estimate the minimum angles of the information receiving site with a given error probability $BER < 10^{-7}$. An important factor for estimating the minimum angles of the receiving area is the form of the beam antenna transmission pattern (shape, maximum gain, etc.). The directivity pattern of the on-board transmit antenna affects the minimum an-

gles of the receiving position of information from the space system, therefore, accordingly affects the amount of information received from on-board devices.

In [3], the radio link budget is calculated to assess the possibility of receiving information from a CUBESAT type of developed and created by PLANET LAB, but there is no analysis of the minimum angles of the place where information is received from the spacecraft. In [4] different types of transmitting antennas are proposed, but there are no studies of the effectiveness of there are. In the PLANET LAB radio link, the DVB-S2 standard is used, but there is no information on the efficiency of using different types of modulation and coding for these systems [5].

The purpose of the article is to investigate the effectiveness of using ground antenna systems with different reflector diameters for receiving target information from the PLANET LAB in various modulations and data rates. The studies take into account the characteristics of the radiation pattern of the transmitting onboard antenna. The research is based on the technical characteristics of the X - band transmitters, which are designed for a CUBESAT type satellite, provided that the DVB - S2 standard is used and the technical characteristics of existing receiving stations.

The main part

According to [3], since 2013 more than 200 satellites "CUBESAT" type, most of which are commercial, have been put into orbit. The operators of space systems have a serious problem in implementing the reception of information from these spacecraft, the reason of which is the lack of the necessary number of ground receiving stations. In particular, in [7] it is indicated that for a high-quality information reception, stations with a reflector diameter of 5 m are needed. But it is interesting that there are no theoretical studies on the feasibility of using receiving antennas with a large diameter and efficiency of use.

For these studies, knowledge of the technical characteristics of the onboard transmission equipment is necessary. It is known that the French company SYR-LINKS [1] has developed and created a number of transmitters for high-speed data transmission in the X-band for microsattellites and nanosatellites. According to [6], the transmitter PLANETLAB has the characteristics given in Table. 1:

Table 1

Characteristics
of the on-board transmitter of the X-band

The name of the characteristic	Value
Transmitter power, W	2
Carrier frequency, MHz	8133; 8200
Width of the spectrum of the signal, MHz	66,84
Data transfer standard	DVB-S2

It is known [7] that on-board transmitting antennas can be used both with a path microstrip (Fig. 1, a) and helix (Fig. 1, b).

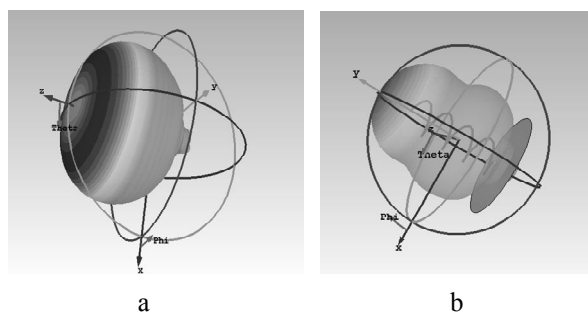


Fig. 1. 3D models of directional diagrams of X-band onboard antenna transmitters: a – with a path microstrip, b – with a helix

Figure 1 shows the directional diagrams of on-board transmitting antenna systems created by simulation in the CST Studio software for CUBESAT in the X-band. Figure 1a shows a patch stripline antenna. Figure 1b shows a helix antenna. The simulation was performed to obtain the dependence of the gain from the angles of rotation (*Theta* and *Phi*) to take into account the outlet of the transmission antenna from the direction to the sampling station. Then the equivalent isotropically radiated power can be written as [5]:

$$\text{EIRP}(\text{Theta}, \text{Phi}) = P_t + G_t(\text{Theta}, \text{Phi}) - L_{\text{fid}}, \quad (1)$$

where P_t – power of the on-board transmitter; $G_t(\text{Theta}, \text{Phi})$ – gain of the on-board antenna system in the direction of the receiving station; L_{fid} – damping of the feeder of the transmission line.

The signal strength at the input of the receiving system in a logarithmic form taking into account the angles of rotation is determined as [6]:

$$C_p(\text{Theta}, \text{Phi}) = \text{EIRP}(\text{Theta}, \text{Phi}) - L_0 - L_{\text{atm}} - L_{\text{pol}}, \quad (2)$$

where L_0 – fading in free space; L_{atm} – Attenuation associated with atmospheric precipitation (snow, rain, etc.); L_{pol} – Polarization losses, which depend on the type of polarization (in circular polarization in low-orbit space systems, with losses of 2 dB [8]).

We will write the equation of radio communication in logarithmic form as [9]:

$$E_s/N_0(\text{dB}) = C_p(\text{Theta}, \text{Phi}) + G_{\text{st}} - 10 \cdot \log(k \cdot T_{\text{sys}} \cdot \Pi), \quad (3)$$

where C_p – the signal strength at the input of the receiving system; G_{st} – Gain of the receiving antenna; k – Boltzmann constant; T_{sys} – Noise temperature of the receiving system; Π – the frequency band in which the transmission of information is carried out;

For mirror antenna systems, the coefficient is defined as [7]:

$$G_{\text{st}} = \eta \cdot (\pi \cdot D/\lambda)^2, \quad (4)$$

where η – the coefficient of the used area, which usually has a value of 0.5-0.65; D – Diameter of the reflector of the antenna system; λ – Wavelength.

Define attenuation in a free space, by the [7]:

$$L_0 = 20 \times \log(4\pi \cdot d/\lambda), \quad (5)$$

where d – the distance to the spacecraft;

Define the distance to the spacecraft using the expression [5]:

$$d = R_e \left(\left((R_e + h)^2 / R_e^2 - \cos^2(\beta) \right)^{1/2} - \sin(\beta) \right), \quad (6)$$

where R_e – the radius of the Earth; h – Orbit height; β – The angle of the receiving station;

Using expressions (1-6) it is possible to determine the dependence of the E_s/N_0 on the angle of the site, with known characteristics of the on-board transmitting equipment, receiving station and the orbital altitude of the spacecraft. For information transfer, the DVB-S2 [4] standard is used. The calculated dependences of the E_s/N_0 from the elevation angle of the receiving of the spacecraft with different types of antennas are shown in Fig. 2.

That is, when using the transmitting helical antenna [1], the minimum reception angles with a given probability $\text{BER} < 10^{-7}$ are less by 10^0 than using a patch antenna, it decreases the information reception zone. But the value of the E_s/N_0 when using a helical antenna is dominated by the patch antenna at elevation angles of greater than 34^0 , subject to rotation towards the receiving station.

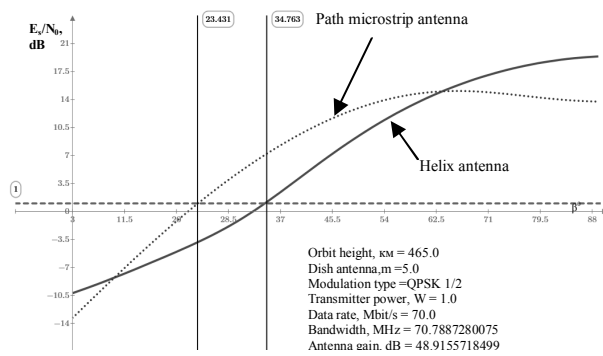


Fig. 2. Dependencies of the ratio E_s/N_0 on the elevation angle for the two types of on-board transmit antennas

Let us compare the dependence of the ratio E_s/N_0 on the elevation angle of the spacecraft with the reflector diameters of the receiving antenna of 5 m and 12 m and on-board path mikrostrip antenna. For this we carried out a simulation, the results of which are shown in Fig. 3.

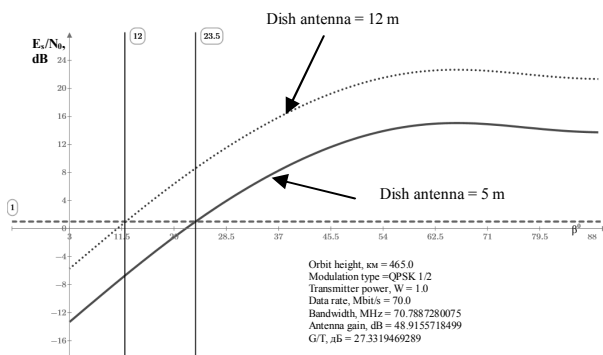


Fig. 3. Dependencies of E_s/N_0 on the elevation angle for two types of reflectors of receiving antennas with on-board path mikrostrip antenna

Analysis of simulation results shows that when using reflectors with a diameter of 12 m, special information with a specified value of $BER < 10^{-7}$ can be received from the 12° minimum angles, and when using reflectors with a diameter of 5 m - only for elevation angles greater than 23.5° . Thus, the use of reflectors with a diameter of 12 m will significantly increase the possibilities for surveying the Earth's surface due to a longer session of receiving special information.

Let us compare the dependence of the ratio E_s/N_0 on the elevation angle of the spacecraft with the reflector diameters of the receiving antenna of 5 m and 12 m and on-board helix antenna. For this we carried out a simulation, the results of which are shown in Fig. 4.

Analysis of simulation results shows that when using reflectors with a diameter of 12 m, special information with a specified value of $BER < 10^{-7}$ can be received from the 15.7° minimum elevation angles, and when using reflectors with a diameter of 5 m - only for elevation angles greater than 34.6° . Thus, the use of reflectors with a diameter of 12 m will significantly increase the possibilities for surveying the Earth's surface due to a longer session of receiving special information.

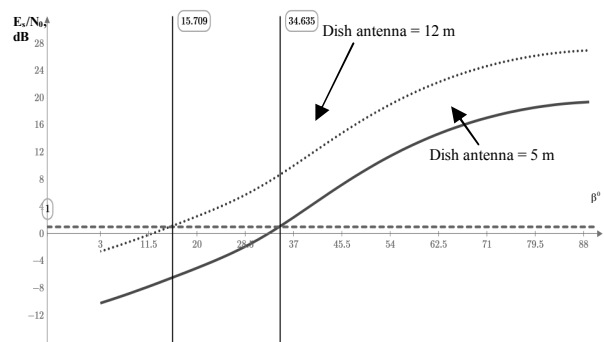


Fig. 4. Dependencies of E_s/N_0 on the elevation angle for two types of reflectors of receiving antennas with on-board helix antenna

Conclusions

1. Analysis of the technical characteristics of modern on-board components of spacecraft like CUBESAT has shown the promise of using such spacecraft for environmental monitoring.
2. Investigation of the CUBESAT satellite radio was carried out taking into account the directional pattern of the on-board transmitting antenna of the target radio link using a mathematical model created by the author.
3. Using a patch antenna in comparison with a helix antenna allows to expand the zone of reception of information with the given quality indicators by 10^0 by the elevation angle.
4. Comparison of receiving stations with an antenna diameter of 5 m and 12 m indicates the prospects of using reflectors with a diameter of 12 m, which are on the domestic territory and are operated in Ukraine.
5. The use of ground station with a reflector diameter of 12 m will allow receiving special information at minimum elevation angles of 12° under the conditions of the calculations (orbit height, on-board transmitter power, data transfer speed).

References

1. *Small spacecraft technology. State of the art. Mission design division staff Ames research center, Moffett Field. California: July 2014.*
2. *TM space data link protocol. Recommendation for space data system standards. CCSDS. 130.1-G-2. Green book. Washington, D.C.: CCSDS, November 2012.*
3. *Cubesat communications system table. Mode of access: World Wide Web <https://www.klofas.com/comm-table/>*
4. *Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2), ETSI EN 302 307 V1.2.1: European Telecommunications Standards Institute, Mart 2009.*
5. *Louis J. Satellite Communications Systems Engineering Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance / Louis J. Ippolito Jr. California: A JOHN WILEY & SONS, INC., 2008. – 396 p.*
6. *Planet Labs Specifications: Spacecraft Operations & Ground Systems. Mode of access: World Wide Web <http://>*

//www.rsgis.ait.ac.th/main/wpcontent/uploads/Planet-Labs-Spacecraft-Ops.pdf

7. Ziener, Rodger E. Principles of communication : systems, modulation, and noise / Rodger E. Ziener, William H. Tranter. – Seventh edition, California: A JOHN WILEY & SONS, INC., 2014. – 746 p.

8. Nguyen H. A first course in digital communication. / Nguyen H., Shwedik // UK Cambridge university press – 2009. 564 p.

9. Roddy. D. Satellite communication. Fourth edition. / Roddy D. // New York: McGraw-Hill – 2006. 656 p.

Надійшла до редколегії 5.02.2018

Рецензент: доктор технічних наук, доцент Фриз Сергій Петрович, начальник кафедри Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РІЗНИХ АНТЕНН ДЛЯ ОТРИМАННЯ СПЕЦІАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТИПУ CUBESAT ДЛЯ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

О.В. Кальватинський

Предметом вивчення в статті є радіолінії цільової інформації космічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з космічних апаратів (КА) типу CUBESAT. **Метою** є дослідження ефективності застосування приймальних антен різного діаметру (5 та 12 м), а саме зміни зони прийому інформації. **Завдання:** розробити математичний апарат визначення мінімальних кутів приймання цільової інформації з врахуванням діаграми спрямованості та відвороту максимуму діаграми від напрямку на приймальну станцію. Визначити мінімальні кути місця приймання цільової інформації з заданою ймовірністю похибки на біт інформації ($<10^{-7}$) при умові різних типів бортових передавальних антен та приймальних антен з різним діаметром рефлектора. Основними застосовуваними **методами** є: синтез, математичного моделювання та графічного аналізу отриманих результатів. Отримані такі **результати**. При використанні передавальної спіральної антени, мінімальні кути місця прийому із заданою ймовірністю похибок на біт інформації $<10^{-7}$ на 10° менші ніж при використанні патч – антени, що зменшує зону прийому інформації. Але значення С/Ш при використанні спіральної антени при кутах місця більших 64° переважає патч - антену, при умові повороту в напрямку на приймальну станцію. При використанні рефлекторів з діаметром 5 м можливе приймання інформації тільки при кутах місця більше $23,5^\circ$. Таким чином використання рефлекторів з діаметром 12 м значно збільшить можливості по зйомці Земної поверхні за рахунок більш тривалого сеансу прийому спеціальної інформації. **Висновки.** Аналіз технічних характеристик сучасних бортових складових елементів КА типу CUBESAT показав перспективність використання таких КА для моніторингу навколишнього середовища. Дослідження радіолінії КА CUBESAT проводилися з врахуванням діаграми спрямованості бортової передавальної антени цільової радіолінії за допомогою математичної моделі створеної автором. Використання патч – антени порівняно зі спіральною антеною дозволяє розширити зону прийому інформації з заданими показниками якості на 10^0 по куту місця. Порівняння приймальних станцій з діаметром антени 5 та 12 м вказує на перспективність використання рефлекторів з діаметром 12 м, які знаходяться на території України. Використання наземних антен з діаметром рефлектора 12 м дозволить здійснювати прийом спеціальної інформації при мінімальних кутах місця 12° при умовах взятих до розрахунків (висота орбіти, потужність бортового передавача, швидкість передачі даних).

Ключові слова: космічний апарат, CUBESAT, дистанційне зондування Землі, бортовий передавач, приймальна станція, мінімальні кути місця прийому інформації.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ АНТЕНН ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ С КА ТИПА CUBESAT ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А.В. Кальватинський

Предметом изучения в статье являются радиолинии целевой информации космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с космических аппаратов (КА) типа CUBESAT. **Целью** является исследование эффективности применения приемных антенн различного диаметра (5 и 12 м), а именно изменения зоны приема информации. **Задача:** разработать математический аппарат определения минимальных углов приема целевой информации с учетом диаграммы направленности и отворотов максимума диаграммы от направления на приемную станцию. Определить минимальные углы места приема целевой информации с заданной вероятностью ошибки на бит информации ($<10^{-7}$) при условии различных типов бортовых передающих антенн и приемных антенн с различным диаметром. Основными применяемыми **методами** являются: синтез, математического моделирования и графического анализа полученных результатов. Получены следующие **результаты**. При использовании передающей спиральной антенны минимальные углы места приема с заданной вероятностью ошибок на бит информации $<10^{-7}$ на 10° меньше, чем при использовании патч - антенны. Но значение С/Ш при использовании спиральной антенны преобладает патч - антенну при углах места больше 64° , при условии поворота в направлении на приемную станцию. При использовании рефлекторов диаметром 5 м возможно принимать информацию с заданной вероятностью ошибок только при углах места больше $23,5^\circ$. Таким образом, использование рефлекторов диаметром 12 м значительно увеличит возможности по съемке Земной поверхности за счет более длительного сеанса приема специальной информации. **Выводы.** Анализ технических характеристик современных бортовых составляющих элементов КА типа CUBESAT показал перспективность использования таких КА для мониторинга окружающей среды. Исследование радиолинии КА CUBESAT проводилось с учетом диаграммы направленности бортовой передающей антенны целевой радиолинии, с помощью математической модели созданной автором. Использование патч - антенны по сравнению со спиральной антенной позволяет расширить зону приема информации с заданными показателями качества на 10^0 по углу места. Сравнение приемных станций с диаметром антенны 5 и 12 м указывает на перспективность использования рефлекторов антенных систем диаметром 12 м, которые находятся в Украине. Использование наземных антенн с диаметром рефлектора 12 м позволит осуществлять прием специальной информации при минимальных углах места 12° при условиях взятых расчетах (высота орбиты, мощность бортового передатчика, скорость передачи данных).

Ключевые слова: космический апарат, CUBESAT, дистанционное зондирование Земли, бортовой передатчик, приемная станция, минимальные углы места приема информации.

В.Д. Карлов¹, Ю.В. Кириченко², А.Н. Артеменко³, О.В. Бесова¹

¹ Харківський національний університет Воздушних Сил імені І. Кожедуба, Харків

² Національний науковий центр Харківський фізико-технічний інститут, Харків

³ Генеральний штаб Вооруженных Сил Украины, Киев

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ ПЛАЗМЕННОЙ АНТЕННЫ С АЗИМУТАЛЬНО-НЕСИММЕТРИЧНЫМИ БЕГУЩИМИ ВОЛНАМИ ТОКА

Теоретически и численно исследуется плазменная антенна с азимутально-несимметричной бегущей волной, работающей на гармонике с азимутальным номером $m=1$. Плазма, в которой учтены электрон атомные столкновения, предполагается холодной и изотропной. Исследуется зависимость диаграмм направленности от плотности плазмы, геометрических параметров плазменного цилиндра и частоты электрон атомных столкновений. Коэффициенты затухания, обусловленные столкновениями, находятся из дисперсионного уравнения. Найдены минимальные значения плотности плазмы, при которых нормированные диаграммы направленности являются остронаправленными и имеют главный лепесток, расположенный под нулевым углом к оси антенны. Показаны преимущества антенны с несимметричной волной с $m=1$ по сравнению с антенной, работающей на азимутально-симметричной моде.

Ключевые слова: плазменная антенна бегущей волны, антенна осевого излучения, линейная антенна, ограниченная плазма, несимметричные поверхностные волны в плазме, электрон атомные столкновения в плазме, диаграмма направленности.

Введение

В литературе широко обсуждается возможность использования ограниченной низкотемпературной плазмы в качестве антенн [1-4]. В этих работах показано, что при достаточно высокой плотности плазменный столб имеет дисперсионные свойства, близкие к металлическим антеннам. В работе [4] аналитически показано, что азимутально-несимметричная гармоника бегущей волны тока с $m=1$, в отличие от симметричной волны и волн с $m>1$, дает излучение линейной антенны с нормированной диаграммой направленности (НДН), имеющей максимум под нулевым углом к ее оси. В этой же работе получены формулы для углового распределения излучения в дальней зоне, численный анализ которых позволяет детально проанализировать зависимость НДН от параметров антенны и плазмы.

Постановка задачи

В работе исследуются линейные антенны бегущей волны тока с $m=1$. Антенна представляет собой столб холодной изотропной плазмы с потерями, обусловленными электрон атомными столкновениями. В [3, 4] показано, что влияние достаточно тонкой цилиндрической оболочки, окружающей плазму, на НДН мало. Поэтому она в настоящей работе не учитывается. Исследуется зависимость НДН от плотности плазмы, геометрических параметров плазменного цилиндра, длины излучаемой волны. Учитываются также столкновения электронов с нейтральными атомами, чего не было сделано в [4].

Несимметричные волны в плазменном столбе с учетом столкновений

В работе рассматривается открытый цилиндрический плазменный столб радиуса a , неограниченный в продольном направлении (рис. 1).

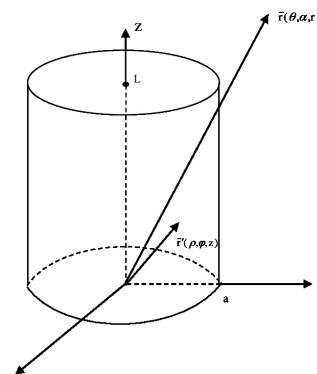


Рис. 1. Цилиндрический плазменный столб

Несимметричные с $m \geq 1$ волны в таком плазменном столбе представляют собой гибридные ЕН волны, содержащие все шесть компонент электромагнитного поля. Они имеют следующую зависимость от цилиндрических координат (ρ, φ, z) , показанных на рис. 1, и времени t :

$$\vec{E}, \vec{H} = \vec{E}(\rho), \vec{H}(\rho) \exp(i(k_z z + m\varphi - \omega t)), \quad (1)$$

где k_z – постоянная распространения, m – номер азимутальной гармоники.

Компоненты поля (1) в цилиндрических координатах выражаются через аксиальные составляющие

щие электрического и магнитного полей с помощью хорошо известных формул, которые приведены, например, в [5]. Сшивая тангенциальные составляющие электрического и магнитного полей на границе плазма – вакуум, получаем следующее дисперсионное уравнение:

$$\left\{ (\kappa_0 a) K_m(\kappa_0 a) I_m'(ka) - (ka) K_m'(k_0 a) I_m(ka) \right\} \times \\ \times \left\{ \varepsilon_p \cdot (\kappa_0 a) K_m(\kappa_0 a) I_m'(ka) - (ka) K_m'(k_0 a) I_m(ka) \right\} = \\ = \left\{ \frac{mk_z k (1 - \varepsilon_p)}{\kappa \kappa_0} \right\}^2 K_m^2(\kappa_0 a) I_m^2(ka), \quad (2)$$

$$\text{где } \kappa_0 = \sqrt{k_z^2 - k^2}, \quad \kappa = \sqrt{k_z^2 - k^2 \varepsilon_p}, \quad (3)$$

$k^2 = \omega^2 / c^2$, $I_m(x)$, $K_m(x)$ – модифицированные функции Бесселя, $I_m'(x)$, $K_m'(x)$ – их производные по аргументу x , ε_p – диэлектрическая проницаемость холодной плазмы с учетом электрон атомных столкновений

$$\varepsilon_p = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + iv)} = \varepsilon_p' + i\varepsilon_p'', \quad (4)$$

$$\varepsilon_p' = 1 - \omega_p^2 / (\omega^2 + v^2), \quad \varepsilon_p'' = \omega_p^2 v / (\omega(\omega^2 + v^2)). \quad (5)$$

где v – частота столкновений электронов с атомами, $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m_e}$ – плазменная частота, n_e – плотность электронов плазмы в см^{-3} , e и m_e – заряд и масса электрона.

Полагая $m=0$ в уравнении (2), получаем два дисперсионные уравнения для симметричных Н- и Е- волн, из которых только последняя может существовать в плазменном столбе. Дисперсионное уравнение для нее имеет вид

$$\left\{ \varepsilon_p (\kappa_0 a) K_0(\kappa_0 a) I_1(ka) + (ka) K_1(\kappa_0 a) I_0(ka) \right\} = 0. \quad (6)$$

В (6) учтены соотношения $I_0'(x) = I_1(x)$, $K_0'(x) = -K_1(x)$. При выводе уравнений (2,6) учтено, что аксиальные составляющие полей (1) определяются соотношениями $E_z(\rho) = A I_m(\kappa \rho)$, $H_z(\rho) = B I_m(\kappa \rho)$, где A, B постоянные.

Столкновения электронов с атомами вызывает затухание волн, которое проявляется в том, что волновой вектор k_z в (1) становится комплексным $k_z = k_z' + i k_z''$. Соответственно аргументы функций $I_m(x)$, $K_m(x)$ также будут комплексными. Уравнение (2) выведено при следующих условиях: $\omega < \omega_p$, $k_z' > k$. В настоящей работе предполагается, что затухание волн, обусловленное столкновениями, мало. Поэтому малыми будут следующие параметры:

$$v/\omega \ll 1, \quad k_z'' / k_z' \ll 1. \quad (7)$$

Ограничиваясь линейными по параметрам (7) членами, получим из (3) формулы

$$\kappa_0 = \kappa_0' + i\kappa_0'', \quad \kappa_0' = \sqrt{k_z'^2 - k^2}, \quad \kappa_0'' = k_z' k_z'' / \kappa_0',$$

$$\kappa = \kappa' + i\kappa'', \quad \kappa' = \sqrt{\kappa_0'^2 + \omega_p^2 / c^2},$$

$$\kappa'' = \left(k_z' k_z'' - k^2 \omega_p^2 v / (2\omega^3) \right) / \kappa'.$$

$$\varepsilon_p' = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad \varepsilon_p'' = \frac{\omega_p^2 v}{\omega^3}$$

Из условий (7) следуют также неравенства

$$\frac{\kappa_0''}{\kappa_0'} \ll 1, \quad \frac{\kappa''}{\kappa'} \ll 1, \quad \frac{\varepsilon_p''}{|\varepsilon_p'|} \ll 1. \quad (8)$$

Условия (8) означают, что мнимые части аргументов функций $I_m(x)$, $K_m(x)$ малы по сравнению с действительными. Это позволяет разложить уравнение (2) по малым мнимым частям аргументов, выделить в нем действительную и мнимую части и получить два уравнения. Первое из них получается заменой $\kappa_0 \rightarrow \kappa_0'$, $\kappa \rightarrow \kappa'$, $\varepsilon_p \rightarrow \varepsilon_p'$ в (2) и является дисперсионным уравнением, решение которого дает зависимость $\omega = \omega(k_z')$. Второе уравнение дает такое выражение для коэффициента затухания k_z'' :

$$ak_z'' = \frac{v \kappa_0'}{\omega k_z'} \frac{t_2 t_{10} + t_3 (t_7 - t_9 y_0) - y_0 t_5 t_6}{t_1 t_{10} - t_3 t_8 - t_6 t_4 - (t_3 t_9 + t_6 t_5) \kappa_0' / \kappa'}, \quad (9)$$

$$\text{где } t_1 = \kappa_0' / \kappa' \cdot (K_m I_m' - K_m' I_m / y_1) + \\ + \left((x_1 / (ak_z')^2 - 1 / x_1) K_m K_m' \right) I_m,$$

$$t_2 = \left(K_m I_m' - \frac{1}{y_1} K_m' I_m \right) y_0 + K_m I_m,$$

$$t_3 = x_1 K_m I_m' - y_1 K_m' I_m,$$

$$t_4 = (K_m + x_1 K_m') I_m' - y_1 K_m'' I_m,$$

$$t_5 = x_1 K_m I_m'' - K_m' (y_1 I_m' + I_m),$$

$$t_6 = \varepsilon_p' x_1 K_m I_m' - y_1 K_m' I_m, \quad t_7 = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} x_1 K_m I_m'$$

$$t_8 = \varepsilon_p' I_m' (K_m + x_1 K_m') - y_1 K_m'' I_m,$$

$$t_9 = \varepsilon_p' x_1 K_m I_m'' - K_m' (y_1 I_m' + I_m),$$

$$t_{10} = 2 \left(\frac{m(ak)(ak_z') \omega_p^2}{x_1 y_1 \omega^2} \right)^2 K_m I_m, \quad y_0 = \frac{(ak)^2 \omega_p^2}{2\omega^2 y_1}.$$

В формулах для t_i ($i=1...10$) функция K_m зависит от аргумента $x_1 = ak_0'$, а функция I_m от $y_1 = ak'$.

Ети аргументи не указаны для краткости изложения. Аналогично из уравнения (6) получается дисперсионная зависимость $\omega = \omega(k'_z)$ и формула для коэффициента затухания k''_z для симметричной E-волны.

$$ak''_z = \frac{v k'_0}{\omega k'_z} \frac{y_0 s_2 - s_3}{s_1 + s_2 k'_0 / k'}, \quad (10)$$

где $s_1 = \epsilon'_p I'_0 (K_0 + x_1 K'_0) - y_1 K_0 I_0$,
 $s_2 = \epsilon'_p x_1 K_0 I_0 - K'_0 (y_1 I'_0 + I_0)$, $s_3 = x_1 \frac{\omega_p^2}{\omega^2} K_0 I_0$

Излучение плазменной антенны

Для нахождения углового распределения излучения плазменного столба исходим из формулы для запаздывающего векторного потенциала

$$\vec{A}(\vec{r}, t) = \frac{1}{c} \int d^3 r' \frac{\vec{j}(\vec{r}', t')}{R}, \quad (11)$$

где $R = |\vec{r} - \vec{r}'|$, $t' = t - \frac{1}{c} R$, $\vec{j}(\vec{r}', t') = \sigma \vec{E}(\vec{r}', t')$. (12)

В формуле (11) переменная интегрирования $\vec{r}'(\rho, \phi, z)$ принадлежит плазменному цилиндру, а $\vec{r}(\alpha, \theta, r)$ - точка наблюдения (рис.1). В формуле (12) σ - проводимость плазмы, $\vec{E}(\vec{r}', t')$ - поле волны в плазменном столбе. Магнитное поле $\vec{H}(\vec{r}, t)$ излучения в дальней зоне получается из (11). Формула для него имеет вид

$$\vec{H}(\vec{r}, t) = \frac{ik\sigma}{c} \frac{\exp(i(kr - \omega t))}{r} \times \int d^3 r' [\vec{e}_r \times \vec{E}(\vec{r}')] \exp(-ik(\vec{r}'\vec{e}_r)), \quad (13)$$

где $\vec{e}_r = \vec{r} / r$. Вычисляя вектор Пойнтинга в дальней зоне с помощью соотношения (13), находим угловое распределение излучения.

Для несимметричных волн в антенне угловое распределение определяется в нулевом порядке по параметрам (8) формулой:

$$\frac{dP}{d\Omega} = |A|^2 \frac{L^2 ck^4}{32\pi} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \exp(-2k''_z L) \Psi_1(\theta) \Psi_2(\theta), \quad (14)$$

где $\Psi_1(\theta) = \frac{\sin^2 X(\theta) + \text{sh}^2(0.5Lk''_z)}{X^2(\theta) + (0.5Lk''_z)^2}$, (15)

$$X(\theta) = 0.5kL(\xi - \cos\theta),$$

$$\xi = ck'_z / \omega(k'_z) - \text{замедление волны в антенне},$$

$$\Psi_2(\theta) = \cos^2 \theta (f_1 - mf_2)^2 + f_3 (\sin^2 \theta f_3 + \sin 2\theta (f_1 - mf_2)) + (mf_4 - f_5)^2; \quad (16)$$

$$f_1 = \frac{1}{k'^2} \int_0^a d\rho \rho J'_m(\tilde{\rho}) \left(-k'_z k I'_m(k'\rho) + \frac{mk}{\rho} Q I_m(k'\rho) \right); \quad (17)$$

$$f_2 = \frac{1}{k'^2} \int_0^a d\rho \rho \frac{J_m(\tilde{\rho})}{\tilde{\rho}} \left(\frac{mk'_z}{\rho} I_m(k'\rho) - Q k k' I'_m(k'\rho) \right); \quad (18)$$

$$f_3 = \int_0^a d\rho \rho J_m(\tilde{\rho}) I_m(k'\rho); \quad (19)$$

$$f_4 = \frac{1}{k'^2} \int_0^a d\rho \rho \frac{J_m(\tilde{\rho})}{\tilde{\rho}} \left(-k'_z k' I'_m(k'\rho) + Q \frac{mk}{\rho} I_m(k'\rho) \right); \quad (20)$$

$$f_5 = \frac{1}{k'^2} \int_0^a d\rho \rho J'_m(\tilde{\rho}) \left(\frac{mk'_z}{\rho} I_m(k'\rho) - Q k k' I'_m(k'\rho) \right). \quad (21)$$

В формулах (17-21) приняты следующие обозначения: $\tilde{\rho} = k\rho \sin\theta$, $J_m(x)$ - функция Бесселя, $J'_m(x)$ - ее производная по аргументу x , $Q = -iH_z(\rho) / E_z(\rho) = -iB / A$. Величина Q определяется формулой

$$\frac{Q}{a} = \frac{k' K'_m(k'_0 a) I_m(k' a) - \epsilon'_p k'_0 K_m(k'_0 a) I'_m(k' a)}{mk'_z k (1 - \epsilon'_p) K_m(k'_0 a) I_m(k' a)}.$$

Отметим, что при малом замедлении ξ и достаточно больших длинах волн излучения λ , когда выполняются условия

$$\xi - 1 \ll 1, \quad a \ll \lambda, \quad (22)$$

справедливо соотношение $Q \approx -1$, Это означает, что компоненты поля волны $E_z(\rho)$ и $H_z(\rho)$ близки по амплитуде и сдвинуты по фазе на $\pi / 2$, так как

$$H_z(\rho) / E_z(\rho) \approx -i.$$

Функция $\Psi_1(\theta)$ (15) описывает угловое распределение излучения однородной по поперечному сечению линейной антенны [6, 7]. Она зависит от материала антенны только посредством зависимости от замедления ξ . Функция $\Psi_2(\theta)$ (16) определяется действительной частью диэлектрической проницаемости ϵ'_p , то есть внутренней структурой плазменной антенны.

Для углового распределения в случае симметричных волн получается в нулевом порядке по параметрам (8) соотношение

$$\frac{dP}{d\Omega} = |A|^2 \frac{L^2 ck^4}{32\pi} \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^4 \times \exp(-2k''_z L) \Psi_1(\theta) \Psi_3(\theta), \quad (23)$$

где $\Psi_3(\theta) = (\cos\theta f_6 + \sin\theta f_5)^2$, (24)

$$f_6 = \frac{k'_z}{k'} \int_0^a d\rho \rho J_1(\tilde{\rho}) I_1(k'\rho), \quad (25)$$

$$f_7 = \int_0^a d\rho \rho J_0(\tilde{\rho}) I_0(\kappa' \rho). \quad (26)$$

Для симметричных волн внутренняя структура плазменной антенны описывается функцией $\Psi_3(\theta)$. Из формул (22-24) следует, что излучение под углом $\theta = 0$ отсутствует. Соотношения (14,22) позволяют найти нормированные диаграммы направленности.

Результаты вычислений

В работе [4] выполнен аналитический анализ диаграмм направленности при условиях (22). Показано, что угловая зависимость НДН антенны с азимутально-симметричной волной имеет один хорошо выраженный лепесток с низким уровнем боковых лепестков. При этом максимум НДН приходится на угол θ , отличный от нуля. Показано также, что при тех же условиях волна с $m=1$ дает излучение с однолепестковой НДН, имеющей максимум при $\theta=0$. В настоящей работе проведен численный анализ НДН для гармоник с $m=0,1$ в зависимости от замедления волны ξ , геометрических параметров антенны, длины излучаемой волны и частоты электрон атомных столкновений.

Угловое распределение излучения сильно зависит от замедления волны в антенне ξ , которое в свою очередь определяется плотностью плазмы n_e . При этом оказывается, что при больших ξ , когда условия (22) не выполняются, НДН для гармоник с $m=0,1$ имеют много лепестков, среди которых нельзя выделить один главный. Для волн с $m=0$ и $m=1$ существуют свои характерные значения плотности плазмы n_{e0} такие, что при $n_e \geq n_{e0}$ диаграммы направленности имеют один хорошо выраженный лепесток с малым уровнем боковых лепестков. Поэтому для анализа НДН важно знать зависимость замедления волны от плотности плазмы.

Вычисления с параметрами $a = 1$ см, $L = 100$ см, $\lambda = 10$ см., $m=1$ дали следующие результаты. На рис.2 представлена зависимость величины $\lg(\xi-1)$ от $\lg(n_e)$.

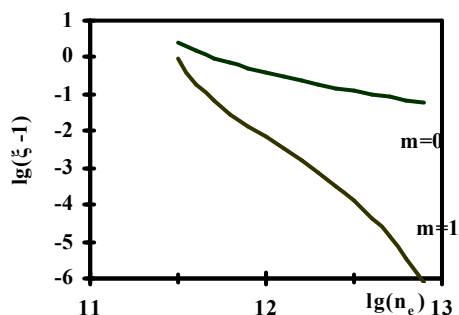


Рис. 2. Зависимость замедления ξ волны в плазменной антенне от плотности плазмы для гармоник с $m = 0,1$

Видно, что замедление ξ волны с $m=1$ намного быстрее приближается к 1, чем замедление азимутально симметричной волны. Поэтому антенна с гармоникой $m=1$ дает излучение с хорошо выраженной направленностью при n_e , меньших, чем антенна с гармоникой $m=0$. Другими словами гармоника с $m=1$ при увеличении n_e намного быстрее приближается по своим дисперсионным свойствам к металлической антенне, чем антенна с $m=0$. Из рис. 2 видно, при $n_e \approx 8 \cdot 10^{12}$ см⁻³ фазовая скорость несимметричной волны с $m=1$ отличается от скорости света в пятом знаке после запятой. Примерно такое же отличие от скорости света имеют волны в металлической антенне в дециметровом диапазоне излучения.

На рис. 3 – 5 представлены НДН для антенны с приведенными выше параметрами a, L, λ и с плотностью плазмы $\lg(n_e) = 11.8$ для следующих значений параметра ν/ω , характеризующего затухание волны в плазме: $\nu/\omega = 0, 0,1$ и $0,4$ соответственно.

Видно, что излучение направлено вдоль оси антенны и имеет очень малый уровень боковых лепестков. Главный лепесток при $\nu/\omega = 0$ является узким и имеет полуширину равную примерно 13° .

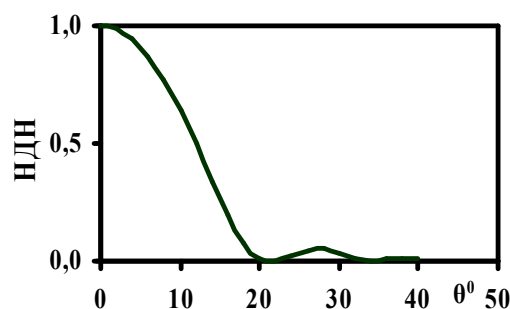


Рис. 3. Нормированная диаграмма направленности для $m=1, a=1$ см, $L=100$ см, $\lambda=10$ см, $\lg(n_e) = 11.8, \nu/\omega = 0$

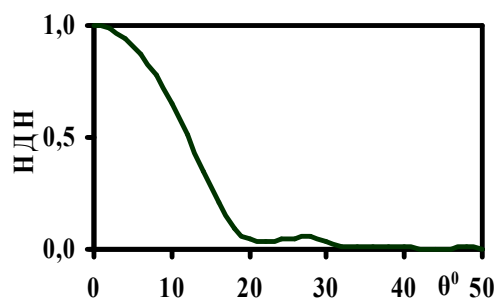


Рис. 4. Нормированная диаграмма направленности для $m=1, a=1$ см, $L=100$ см, $\lambda=10$ см, $\lg(n_e) = 11.8, \nu/\omega = 0,1$

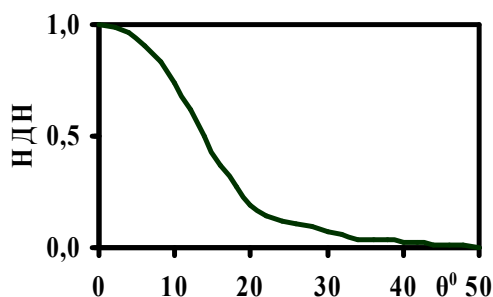


Рис. 5. Нормированная диаграмма направленности для $m=1$, $a=1$ см, $L=100$ см, $\lambda=10$ см, $\lg(n_e)=11.8$, $v/\omega=0.4$

В то же время излучение антенны при той же плотности плазмы с аксиально-симметричной гармоникой тока является многолепестковым с плохо выраженной направленностью.

Анализ показал, что для приведенных выше параметров и для несимметричной волны с $m=1$ величина $\lg(n_{e0})=11.7$.

Это значение плотности n_{e0} примерно в 50 раз меньше, чем для симметричной волны. Таким образом, хорошо направленное излучение при $m=1$ можно получить при значительно меньших плотностях плазмы n_e , чем в случае симметричной гармоники.

Из рис. 3,4,5 видно, что влияние затухания на НДН сводится к исчезновению нулей интенсивности излучения и уширению основного лепестка. Эти особенности характерны для линейных антенн бегущей волны [6, 7 - 12]. Дополнительный анализ показывает [9 - 12], что влияние параметра v/ω на плазменную антенну ослабляется с ростом плотности плазмы. В частности, увеличивается расстояние l_0 вдоль антенны, на котором волна затухает в e раз. Величина l_0 определяется соотношением $l_0=1/k_z''$. При плотности $\lg(n_e)=11.8$ для $v/\omega=0.1$ и для $v/\omega=0.4$ величина l_0 равна 162 см и 40 см соответственно. При плотности плазмы $\lg(n_e)=11.9$ величина l_0 равна 367 см. при $v/\omega=0.1$, а при $v/\omega=0.4$ l_0 равно 92 см. То есть затухание несимметричной волны с $m=1$ уменьшается с ростом плотности плазмы. Отметим также, что при заданном параметре v/ω несимметричная волна с $m=1$ затухает слабее, чем симметричная. Влияние параметра v/ω на диаграммы направленности ослабляется с ростом плотности плазмы. Это влияние намного слабее для гармоники с $m=1$, чем для гармоники с $m=0$. Отметим, что НДН слабо зависит от плотности плазмы при $n_e \geq n_{e0}$. Так при изменении $\lg(n_e)$ от 11.8 до 12.7 полуширина НДН $\Delta\theta$ изменяется от 13° до 17° , то есть всего лишь на 4° .

Представляет также интерес поведение НДН в зависимости от длины антенны. Вычисления с па-

раметрами $a=1$ см, $\lambda=10$ см, $\lg(n_e)=11.8$, для $v/\omega=0$ показали, что при уменьшении L от 100 см до 60 см полуширина НДН $\Delta\theta$ увеличивается от 13° до 18° . Поэтому за счет некоторого увеличения полуширины НДН можно значительно уменьшить длину плазменной антенны. При $L=20$ см полуширина равна $\Delta\theta=32^\circ$.

В работе [8] показано, что рабочая плотность плазмы в антенне может быть уменьшена при увеличении ее радиуса и пропорциональном увеличении длины излучаемой волны λ . Для примера, в настоящей работе были проведены вычисления для антенны с такими параметрами: $a=2$ см, $L=100$ см, $\lambda=20$ см. На рис. 6 приведены соответствующие зависимости $\lg(\xi-1)$ от $\lg(n_e)$ для $m=0$ и $m=1$. Видно, что при $m=1$ замедление ξ приближается к 1 при значительно меньших значениях плазмы, чем при $m=0$. В частности, оказывается, что для такой антенны $\lg(n_{e0})=11.1$. То есть характерное значение плотности n_{e0} , для антенны с $a=2$ см. оказывается в 4 раза меньше, чем для антенны с $a=1$ см. Зависимость НДН от плотности плазмы слаба и в этом случае. Однако полуширина $\Delta\theta$ главного лепестка больше примерно на 7° , чем для антенны с $a=1$ см. Уровень боковых лепестков мал. Для уменьшения $\Delta\theta$ следует увеличивать длину антенны L . Однако значительное увеличение L до значений больших 100 см вряд ли целесообразно с практической точки зрения.

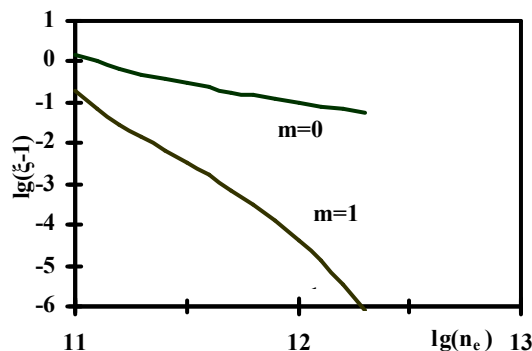


Рис. 6. Зависимости $\lg(\xi-1)$ от $\lg(n_e)$ для $m=0$ и $m=1$

Приведенные в работе исследования линейной плазменной антенны, работающей на гармонике волны тока $m=1$, показали следующие преимущества ее по сравнению с антенной, у которой волна тока является азимутально-симметричной. Рабочая плотность плазмы антенны с $m=1$ значительно меньше, чем антенны с $m=0$. По своим дисперсионным свойствам она намного ближе к металлической антенне, чем антенна с $m=0$. Антенна с $m=1$ излучает в строго осевом направлении. Для такой антенны НДН слабее зависит от потерь энергии в плазме, обусловленных столкновениями электронов с атомами, чем для антенн с $m=0$.

Выводы

Теоретически и численно исследуются диаграммы направленности плазменной антенны с азимутально-несимметричной бегущей волной, работающей на гармонике с $m=1$. Плазма, в которой учтены электрон атомные столкновения, предполагается холодной и изотропной. Исследуется зависимость диаграмм направленности от плотности плазмы, геометрических параметров плазменного цилиндра и частоты электрон атомных столкновений. Показаны преимущества антенны с несимметричной волной, у которой $m=1$, по сравнению с антенной, работающей на азимутально-симметричной волне. В частности, рабочая плотность плазмы антенны с $m=1$ значительно меньше, чем антенны с $m=0$. По своим дисперсионным свойствам она намного ближе к металлической антенне, чем антенна с $m=0$. Антенна с $m=1$ излучает в строго осевом направлении. Для такой антенны НДН слабее зависит от потерь энергии в плазме, обусловленных столкновениями электронов с атомами, чем для антенн с $m=0$.

Список літератури

1. Истомин Е.Н. Плазменный несимметричный вибратор с возбуждением поверхностной волной / Истомин Е.Н., Карфидов Д.М., Минаев И.М., Рухадзе А.А. // Физика плазмы – 2006. - т. 32, №5 - С.423-435.
2. Alexeff I. Experimental and theoretical results with plasma antennas / Alexeff I., Anderson T., Parameswaran S. et al // IEEE Transaction on plasma science. – 2006.- Vol. 34, No. 2.- P.166-172.
3. Кириченко Ю.В. Плазменная антенна бегущей волны / Кириченко Ю.В., Лонин Ю.Ф., Онищенко И.Н. //

Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, №. 11. – С.35–39.

4. Кириченко Ю.В. Плазменная антенна осевого излучения / Кириченко Ю.В., Лонин Ю.Ф., Онищенко И.Н. // Радиотехника и электроника. – 2014.- т. 59, №.3. – С.1–7.
5. М.В. Кузелев. Плазменная релятивистская электроника / М.В. Кузелев., А.А. Рухадзе, П.С. Стрелков.- М.: МГТУ, 2002, – 542 с.
6. Волтер К. Антенны бегущей волны / Волтер К. - М.: Энергия, 1970, – 448 с.
7. Особливості використання плоского шару плазми з малим вигином в антенних системах / В.Д. Карлов, Ю.В. Кириченко, А.С. Кійко // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – Х. : ХНУПС. – 2017. – Вип. 4(53). – С.97 – 102.
8. Кириченко Ю.В. СВЧ излучение цилиндрического плазменного столба / Кириченко Ю.В., Лонин Ю.Ф., Онищенко И.Н. // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2014.- т. 54, №.10. – С.54-59.
9. Карлов В. Д. Характеристики эхо-сигналов декаметрового диапазона радиоволн при их многолучевом распространении / В. Д. Карлов, Ю. А. Сырык, А. В. Тугай // Системи озброєння і військова техніка. – Х. – ХУПС. – 2011. – №. 2(26). – С. 134-137.
10. Jenn D.C. Plasma antennas: Survey of Techniques and the Current State of the Art. Naval Postgraduate School, Prepared for SPAWAR PMW 189. San Diego. 2003. 27 p.
11. Rayner J.P., Whichello A.P., Cheetham A.D. 2004, 'Physical characteristics of plasma antennas' IEEE Transaction on plasma science. 32, P. 269-281.
12. Borg G.G., Harris J.H., Martin N.M., Thorncraft D. Plasmas as antennas: theory, experiment and application. Physics of Plasmas, V.7. №5, pp. 2198-2202, 2000.

Надійшла до редколегії 12.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ДІАГРАМ СПРЯМОВАНОСТІ ПЛАЗМОВОЇ АНТЕНИ З АЗИМУТНО-НЕСИМЕТРИЧНИМИ ХВИЛЯМИ СТРУМУ, ЩО БІЖАТЬ

В.Д. Карлов, Ю.В. Кириченко, А.М. Артеменко, О.В. Бесова

Теоретично та чисельно досліджується плазмова антена з азимутально-несиметричною хвилею, що біжить, яка працює на гармоніці з азимутним номером $m = 1$. Плазма, в якій враховані електрон атомні зіткнення, передбачається холодною та ізотропною. Досліджується залежність діаграм спрямованості від щільності плазми, геометричних параметрів плазмового циліндра і частоти електрон атомних зіткнень. Коефіцієнти згасання, обумовлений зіткненнями, знаходяться з дисперсійного рівняння. Знайдено мінімальні значення щільності плазми, при яких нормовані діаграми спрямованості є гостронаправленою і мають головну пелюстку, яка розташована під нульовим кутом до осі антени. Показано переваги антени з несиметричною хвилею з $m = 1$ в порівнянні з антеною, що працює на азимутально-симетричній моді.

Ключові слова: плазмова антена хвилі, що біжить, антена з випромінюванням вісі, лінійна антена, обмежена плазма, несиметричні поверхневі хвилі в плазмі, електронно атомні зіткнення в плазмі, діаграма спрямованості.

FEATURES OF FORMING OF DIAGRAMS OF ORIENTATION OF PLASMA AERIAL WITH AZIMUTHAL-ASYMMETRICAL PROGRESSING WAVES OF CURRENT

V. D. Karlov, Yu. V. Kirichenko, A. N. Artemenko, O. V. Besova

Theoretically and numerically, a plasma antenna with an azimuth-asymmetric traveling wave working on a harmonic with an azimuth number $m = 1$ is studied. Plasma, in which electron-atom collisions are taken into account, is assumed to be cold and isotropic. The dependence of the directivity diagrams on the plasma density, the geometric parameters of the plasma cylinder, and the frequency of electron collisions are investigated. The attenuation coefficients due to collisions are found from the dispersion equation. The minimum values of the plasma density are found at which the normalized radiation patterns are highly directional and have a main lobe located at a zero angle to the antenna axis. The advantages of an antenna with an asymmetric wave with $m = 1$ are shown in comparison with an antenna operating in an azimuthally symmetric mode.

Keywords: traveling wave plasma antenna, antenna of axial radiation, linear antenna, limited plasma, asymmetric surface waves in plasma, electron atomic collisions in plasma, directional diagram.

Л.М. Сакович, Г.Я. Криховецький, Я.Е. Небесна

Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації

Національного технічного університету України

“Київський політехнічний інституту імені Ігоря Сікорського”, Київ

ОЦІНКА ВПЛИВУ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАНЬ НА ЧАС ВИКОНАННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАСОБІВ СПЕЦІАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

У статті запропонований підхід до кількісної оцінки впливу метрологічної надійності засобів вимірювань на час виконання вимірювань значень параметрів засобів спеціального зв'язку при їх технічному обслуговуванні. У відомих роботах цю обставину не враховують, що веде до заниження необхідного часу визначення реального технічного стану засобів спеціального зв'язку. Приведено приклад використання отриманих результатів для кількісної оцінки збільшення часу вимірювань значень параметрів радіостанції малої потужності при її технічному обслуговуванні.

Ключові слова: засоби виміральної техніки, метрологічна надійність, засоби спеціального зв'язку.

Вступ

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Засоби спеціального зв'язку (ЗСЗ) безперервно удосконалюються в напрямку підвищення значень показників якості, що веде до збільшення кількості їх елементів [1], але час технічного обслуговування (ТО) залишається без змін. Рекомендації щодо вибору засобів виміральної техніки (ЗВТ) для ТО та поточного ремонту ЗСЗ і військової техніки зв'язку приведено в [2,3], але без врахування впливу метрологічної надійності. Питання метрологічної надійності ЗВТ окремо розглянуто в [4, 5], а її вплив на час поточного ремонту кількісно оцінюється в [6, 7]. Щомісяця виконують ТО-1 і щорічне ТО-2 ЗСЗ з інструментальною оцінкою їх реального технічного стану, але при цьому не враховують вплив метрологічної надійності ЗВТ на час виконання робіт.

Формулювання мети статті Мета статті – кількісна оцінка впливу метрологічної надійності ЗВТ на виконання вимірювань значень параметрів ЗСЗ під час їх ТО.

Виклад основного матеріалу

Метрологічна надійність – це властивість ЗВТ функціонувати при збереженні метрологічних та інших показників у заданих межах і режимах роботи [4,5]. Внаслідок старіння елементної бази, вироблення технічного ресурсу, завершення періоду нормальної експлуатації та переходу ЗВТ до граничного стану зростає вплив їх метрологічної надійності на час виконання вимірювань значень параметрів ЗСЗ з метою оцінки їх реального технічного стану в процесі ТО. Це ускладнює планування роботи фахівців ремонтних органів тому, що час виконання вимірювань значень параметрів ЗСЗ перевищує приведений

в інструкціях з експлуатації і технічного обслуговування окремих зразків.

Особливість експлуатації ЗВТ обумовлена забезпеченням їх безвідмовності, переважно за прихованими метрологічними відмовами. Негативні наслідки використання ЗВТ з метрологічними відмовами можуть бути надзвичайно великими і важко передбачуваними. В якості показників метрологічної надійності ЗВТ використовують імовірність $P_i(\tau)$ збереження значень метрологічних характеристик у заданих межах протягом міжповірного інтервалу τ [4, 5].

Необхідний рівень метрологічної надійності суттєво залежить від сфери застосування ЗВТ і обирається з умови забезпечення необхідної ефективності обслуговуваних технічних пристроїв. Як правило, цей рівень для робочих ЗВТ становить 0,85...0,90, а для зразкових 0,90...0,99 [5-7].

Кількісно імовірність збереження значень метрологічних характеристик ЗВТ в конкретних умовах експлуатації можливо оцінити за виразом [5-7]:

$$P_i(\tau) = 1 - m \cdot K_M \cdot K_C,$$

де еквівалентна кількість відмов при експлуатації

$$m = \frac{\tau \cdot K_B}{T},$$

K_M – частка метрологічних характеристик, охоплених вбудованим контролем;

K_C – статистична оцінка коефіцієнта прихованих відмов, яка характеризує частку метрологічних відмов;

K_B – середній коефіцієнт використання ЗВТ;

T – наробіток на відмову.

Значення τ отримують зі керівних документів метрологічного забезпечення обслуговуваних технічних об'єктів або із технічного опису ЗВТ.

Відомо, що фахівець ремонтного органу безпосередньо займається ТО та відновленням ЗСЗ 900 годин на протязі року [8]. В такому разі коефіцієнт використання ЗВТ на пункті технічного обслуговування та ремонту кількісно дорівнює

$$K_B = \frac{900}{8760} = 0,103.$$

За результатами аналізу технічного стану та інструкцій з експлуатації конкретних зразків ЗВТ визначають K_M .

Значення K_C залежне від призначення ЗВТ і при відсутності статистичних даних результатів експлуатації приладів – аналогів визначають за усередненими показниками [5-9], які змінюються від 0,1 при вимірюванні напруги до 0,24 при вимірюванні параметрів електронних радіоламп і напівпровідникових приладів.

Наробіток на відмову ЗВТ також беруть зі статистичних даних, а при їх відсутності із технічного опису приладів.

Середнє квадратичне відхилення оцінки імовірності збереження значень метрологічних характеристик ЗВТ розраховують за виразом [5-7]:

$$\sigma = m \cdot K_M \sqrt{K_C \cdot (0,15 \cdot K_C + 1/m)}.$$

Час виконання вимірювань значень параметрів ЗСЗ при їх ТО дорівнює

$$T_{TO} = \sum_{j=1}^N T_{nnj},$$

де T_{nnj} – час перевірки параметра j на відповідність вимогам,

N – загальна кількість параметрів ЗСЗ, що перевіряють під час ТО.

З врахуванням метрологічної надійності ЗВТ отримуємо

$$T_{nn} = \frac{t_n + t_0 / \prod_{i=1}^n P_i}{\prod_{i=1}^n P_i(\tau)}$$

де t_n – час підготовки ЗВТ та збирання схеми вимірювання;

t_0 – час оцінки результату вимірювання параметра;

P_i – ймовірність правильної оцінки результату вимірювань [7];

n – кількість ЗВТ для оцінки значення параметра.

Розглянемо використання приведених результатів на прикладі ЗВТ, що використовують під час ТО найбільш масових ЗСЗ – радіостанцій малої потужності Р - 173 [10].

Результати кількісної оцінки показників метрологічної надійності ЗВТ, що використовують при ТО Р – 173, приведено в табл. 1.

Таблиця 1
Кількісна оцінка показників метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки

ЗВТ	τ , год	K_M	K_C	$P_i(\tau)$	σ
Г4 - 116	5000	0,3	0,20	0,989	0,187
В3 - 41	4000	1,0	0,10	0,978	0,148
Ч3 - 54	3000	0,5	0,16	0,976	0,217
В7 - 15	4000	1,0	0,10	0,978	0,148
Д - 5014	2000	1,0	0,23	0,899	0,319
Г3 - 102	5000	0,3	0,20	0,989	0,187
СК3 - 43	5000	0,1	0,16	0,997	0,054

В цьому випадку найменш надійним є прилад Д – 5014, а найбільш надійним СК3-43.

Кількісна оцінка часу вимірювання параметрів Р-173 з врахуванням метрологічної надійності ЗВТ приведено в табл. 2.

Таблиця 2

Перелік операцій
щодо вимірювання параметрів радіостанцій Р-173 під час технічного обслуговування

№	Параметр	ЗВТ	р	Час вимірювання	
				Згідно інструкції	З врахуванням надійності
1.	Чугливість приймача	Г4-116 В3-41	3хв	0,725 0,834	25 хв 28 хв
2.	Нестабільність частоти	Ч3-54	10хв	0,9993	22 хв 23 хв
3.	Потужність передавача	В7-15 Э9-4А	3хв	0,85 -	18 хв 19 хв
4.	Струм споживання	Д5014	2хв	0,95	10 хв 12 хв
5.	Девіація частоти	Г3-102 СК3-43	7хв	0,834 0,9993	15 хв 17 хв
Загальний час виконання					90 хв 99 хв

В такому разі реальний час вимірювання параметрів радіостанцій Р-173 з врахуванням метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки на 10% перевищує приведений в інструкції з її технічного обслуговування [10].

Висновки

1. Врахування метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки при оцінці часу виконання технічного обслуговування засобів спеціального зв'язку суттєво підвищує точність розрахунків необхідного часу на проведення вимірювань значень параметрів.

2. Отримані результати доцільно використовувати при плануванні роботи фахівців ремонтних органів під час оцінки реального технічного стану засобів спеціального зв'язку в процесі їх технічного обслуговування.

3. Подальші дослідження слід направити на оцінку впливу метрологічної надійності засобів вимірювальної техніки на показники якості відновлення засобів спеціального зв'язку з аварійним та бойовим походженнями.

Список літератури

1. Срохін В.Ф. Прогнозування основних характеристик перспективних радіостанцій силових структур / В.Ф. Срохін, В.М. Равський // *Зв'язок*. – 2005. – №3. – С. 61–64.
2. Кузнецов І.Б. Організація метрологічного забезпечення військ (сил): навч. посібн. / І.Б. Кузнецов, П.М. Ябловський. – К.: НУОУ, 2009. – 356 с.
3. Яковлев М.Ю. Підхід до вибору засобів вимірювальної техніки військового призначення для метрологічного обслуговування військової техніки зв'язку / М.Ю. Яковлев, С.В. Рижов // *Військово-технічний збірник Академії СВ*. – 2014. – №1(10). – С. 118 – 127.

4. Ким К.К. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника : учебное пособие / К.К. Ким. – СПб.: Питер, 2008. – 368 с.

5. Кононов В.Б. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО : навч. посібн. / В.Б. Кононов, С.В. Водолажко, С.В. Коваль, А.М. Науменко, І.І. Кондрашова. – Х.: ХНУПС, 2017. – 288 с.

6. Рижов С.В. Метод обґрунтування мінімально припустимого значення ймовірності оцінки результату перевірки параметрів / С.В. Рижов, Л.М. Сакович // *Вісник НТУУ “КПІ”. Серія Приладобудування*. – 2017. – Вип. 54(2). – С. 96 – 106.

DOI: [https://doi.org/10.20535/1970.54\(2\).2017.119562](https://doi.org/10.20535/1970.54(2).2017.119562).

7. Яковлев М.Ю. Удосконалення методу завдання вимог до мінімально припустимого значення ймовірності правильної оцінки результату виконання перевірки під час діагностування / М.Ю. Яковлев, С.В. Рижов, Л.М. Сакович, П.Л. Аркушенко // *Наука і техніка Повітряних сил Збройних Сил України*. – 2017. – №4(29). – С. 137 – 142.

8. Сакович Л.М. Моделювання роботи апаратної технічного забезпечення / Л.М. Сакович, І.М. Гиренко // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. – №1 (28). – 2017. – К.: Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського. – С. 47 – 52.

9. Коваленко А.А. Сучасний стан та тенденції розвитку комп'ютерних систем об'єктів критичного застосування / А.А. Коваленко, Г.А. Кучук // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – Полтава. ПНТУ, 2018. – Вип. 1(47). – С. 110-113.

10. Радиостанция Р-173. Техническое описание и инструкция по эксплуатации: ШИ 1.101.027 ТО. – М.: Воениздат, 1986. – 78 с.

Надійшла до редколегії 18.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук. проф. В.В. Козловський, Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ НА ВРЕМЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СРЕДСТВ СПЕЦИАЛЬНОГО СВЯЗИ

Л.Н. Сакович, Г.Я. Крыховецкий, Я.Э. Небесная

В статье предложен подход к количественной оценке влияния метрологической надежности средств измерений на время выполнения измерений значений параметров средств специальной связи при их техническом обслуживании. В известных работах это обстоятельство не учитывают, что ведет к занижению необходимого времени определения реального технического состояния средств специальной связи. Приведены пример использования полученных результатов для количественной оценки увеличения времени измерений значений параметров радиостанции малой мощности при ее техническом обслуживании.

Ключевые слова: средства измерительной техники, метрологическая надежность, средства специальной связи.

EVALUATION OF METROLOGICAL RELIABILITY OF MEASURING INSTRUMENTS FOR THE DURATION OF MAINTENANCE OF COMMUNICATION SPECIAL

L.M. Sakovich, G.Ya. Krichovetsky, Ya.E. Nebesna

The article proposes the approach to the quantitative assessment of the influence of metrological reliability of measuring instruments on the time of measuring the values of the parameters of the means of special communication during their maintenance. In known works, this circumstance is not taken into account, which leads to the understatement of the necessary time to determine the real technical state of means of special communication. An example of the use of the obtained results for the quantitative estimation of the increase in the time of measurement of the parameters of the radio station of low power during its maintenance is given.

Keywords: means of measuring technique, metrological reliability, means of special communication.

В.М. Семенов, В.І. Слюсар, І.І. Слюсарь

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

КВАЗИФРАКТАЛЬНА ДІЕЛЕКТРИЧНА РЕЗОНАТОРНА АНТЕНА НА ОСНОВІ ПАРАЛЕЛЕПЕДА

В роботі наведено пропозиції щодо реалізації діелектричних резонаторних антен на основі квазіфрактальних структур, що характеризуються відсутністю рекурсивного повторення. В якості базового елемента запропоновано використання паралелепіпеда. З метою визначення впливу геометрії на просторово-частотні характеристики антени проведено моделювання за допомогою пакету електродинамічного моделювання Ansoft HFSS. На основі введених допущень досліджувались амплітудна частотна характеристика та коефіцієнт стоячої хвилі. На основі аналізу моделей геометрії антени визначені оптимальні варіанти компоновки центрального та периферійних елементів.

Ключові слова: амплітудна частотна характеристика, діаграма спрямованості, квазіфрактал, фрактал, Ansoft HFSS, DRA, VSWR.

Вступ

Зростання ролі персональних засобів комунікацій значно підвищило інтерес до антенних систем, які здатні реалізовувати багатодіапазонність та широкосмуговість функціонування і, що не менш важливо, придатні до розміщення у корпусах будь-яких форм та розмірів.

Однак, на тлі тенденції мініатюризації телекомунікаційних систем, при зменшенні розмірів антен необхідно забезпечувати належний рівень їх характеристик. У даному випадку досить перспективними є технології діелектричних резонаторних антен (Dielectric Resonator Antenna, DRA) [1], які завдяки всеспрямованості задовольняють вимогам до мобільних пристроїв. Із діелектричних матеріалів можуть формуватися різноманітні об'ємні фігури (сфери, напівсфери, циліндри, паралелепіпеди, конуси, усічені конуси та ін.). Такі малогабаритні антени забезпечують зручне та маловитратне рішення завдань, які постають перед розробниками систем зв'язку, у першу чергу комерційних бездротових пристроїв [2].

В свою чергу, при проектуванні багатодіапазонних антен з малими габаритами, високим коефіцієнтом підсилення та всебічною направленістю використовують фрактальний підхід [3÷6]. Його перевагою є простий алгоритм формування геометрії антен. Однак, аналітичний опис параметрів антен неевклідової геометрії є досить складним через те, що їх характеристики визначаються, виходячи зі зміни геометричної форми антени або кількості елементів з задалегідь важко прогнозованими результатами [7]. Як наслідок, розрахунок фрактальних антен проводиться переважно методами чисельного моделювання.

Мета роботи: розробка пропозицій щодо реалізації DRA на основі фрактального підходу.

Основна частина

Як відомо, основна відмінність фрактальних геометричних форм – це дробова розмірність, яка проявляється в рекурсивному повторенні, у зростаючому або зменшуваному масштабах, вихідних детермінованих або випадкових шаблонів антен. Згідно [5], на даний час, нараховується понад дві сотні фрактальних геометричних форм, що придатні для антенної техніки, і кількість їх зростає.

З іншого боку, питання впровадження квазіфрактальних структур [8], що характеризуються відсутністю рекурсивного повторення, в теоретичному плані поки що відпрацьовано недостатньо.

Як наслідок, в роботі запропоновано використання паралелепіпеда в якості базового елемента квазіфрактальної DRA. Спираючись на існуючий досвід проектування DRA [8], надалі, доцільно використовувати прикладний пакет електродинамічного моделювання – HFSS Ansoft [9]. При цьому, доцільно визначити вплив геометрії квазіфрактальної DRA на її просторово-частотні характеристики. Під час досліджень, з метою спрощення процесу моделювання, в якості допущень висунуті наступні положення.

1. Периферійні та центральні елементи виготовлені із однорідного діелектрика з відносною діелектричною проникністю $\epsilon = 50$.

2. Габарити елементів DRA однакові та забезпечують квазіфрактальну структуру: основа квадрат зі стороною 25 мм, та висота 50 мм. Габарити підкладки: квадрат зі сторонами 40 мм та висотою 3 мм.

3. Живлення антени забезпечується за допомогою провідника петльового вібратора, який розташований під нижньою основою центрального елемента DRA. Діаметр провідника 0,5 мм, а діаметр петлі – 10 мм.

4. Елементи антени не перекриваються у просторі або перекриваються частково.

5. Кожен периферійний елемент має лише одну точку дотику з центральним або множини таких точок, що утворюють локальну зону, забезпечуючи симетричну компоновку антени.

6. При синтезі компоновки антени не передбачається обертання периферійних елементів уздовж поздовжньої осі.

7. Результуюча діаграма спрямованості (ДС) повинна мати мінімальний рівень пелюсток зворотного випромінювання. Розрахунки параметрів антени проводяться з кроком 50 МГц.

8. Узгодження DRA з приймально-передавальним трактом за хвильовим опором та коефіцієнтом стоячої хвилі (Voltage Standing Wave Ratio, VSWR) не проводиться.

Таким чином, в якості базового елементу розглядався паралелепіпед (рис. 1). Надалі, аналізувався вплив на ДС антен та їх амплітудно-частотні характеристики (АЧХ) кількості периферійних елементів та їх взаємного розташування відносно центрального елементу.

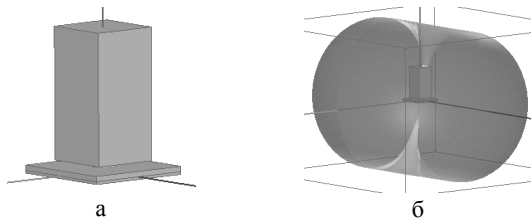


Рис. 1. Базовий елемент DRA на основі паралелепіпеда: а – схема живлення; б – ДС

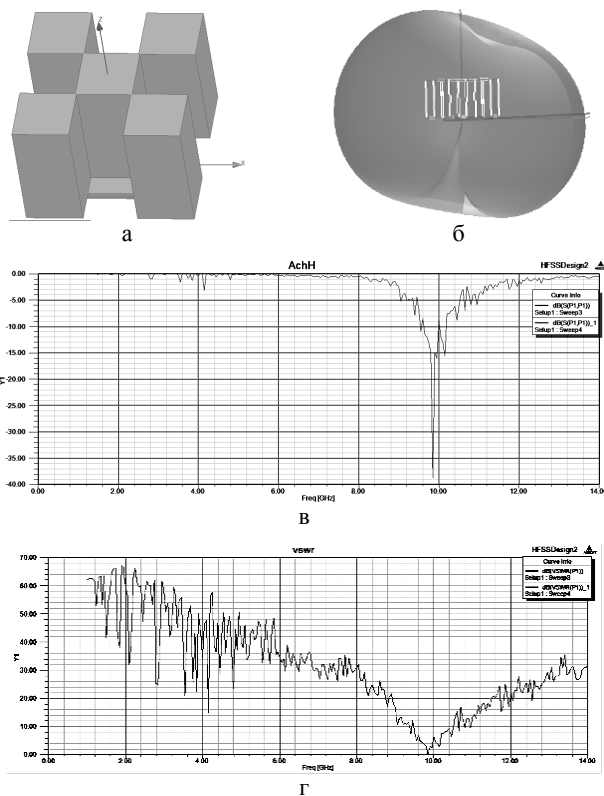


Рис. 2. Перший варіант квазіфрактальної DRA: а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

На основі введених допущень було досліджено кілька варіантів моделі DRA.

У першому варіанті (рис. 2) 4 діелектричних периферійних елементи перекривають центральний елемент на 0,5 мм. АЧХ такої антени (рис. 2, в) має виражену резонансну область між 9,6 і 10 ГГц, в якій ширина смуги пропускання антени є досить вузькою.

Як відомо, в реальних умовах величина VSWR суттєво залежить від частоти прийнятих сигналів, що легко пояснюється різними умовами узгодження антени та навантаження в широкому спектральному діапазоні.

Причиною тому є не тільки присутність реактивної складової внутрішнього опору антени, але й зміна самого активного компонента внутрішнього опору із частотою, викликана відмінностями в умовах протікання наведених струмів різної частоти по поверхні приймальної антени.

Чим вище частота струмів, тем менше вони проникають углиб провідного середовища, а саме від площі поперечного перетину провідника залежить, в остаточному підсумку, його провідність.

Тому, з величиною VSWR пов'язано один з методів визначення смуги пропускання антенної системи.

Згідно з таким підходом, під терміном «смуга пропускання антени» розуміють діапазон частот прийнятого сигналу, у межах яких величина VSWR не перевищує заданого рівня.

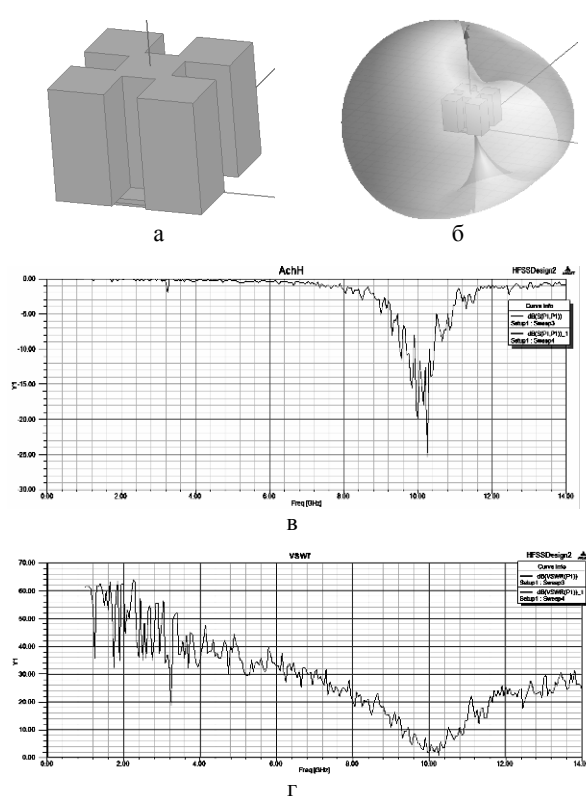


Рис. 3. Другий варіант квазіфрактальної DRA: а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

Слід також урахувати, що в якості VSWR при розрахунках смуги пропускання фігурує його інтегральне значення для всієї антенної конструкції. Справа в тому, що величина VSWR не є фіксованою для всіх ділянок антени та може мати істотні зміни, відповідно до варіації імпедансу антени в різних її точках, де проводяться відповідні виміри.

Другий варіант дослідженої конструкції містить 5 елементів зі взаємним розташуванням відповідно до рис. 3. У порівнянні з рис. 2, а, периферійні елементи перекривають кути центрального паралелепіпеда на 5 мм. Порівнявши отримані результати, нескладно

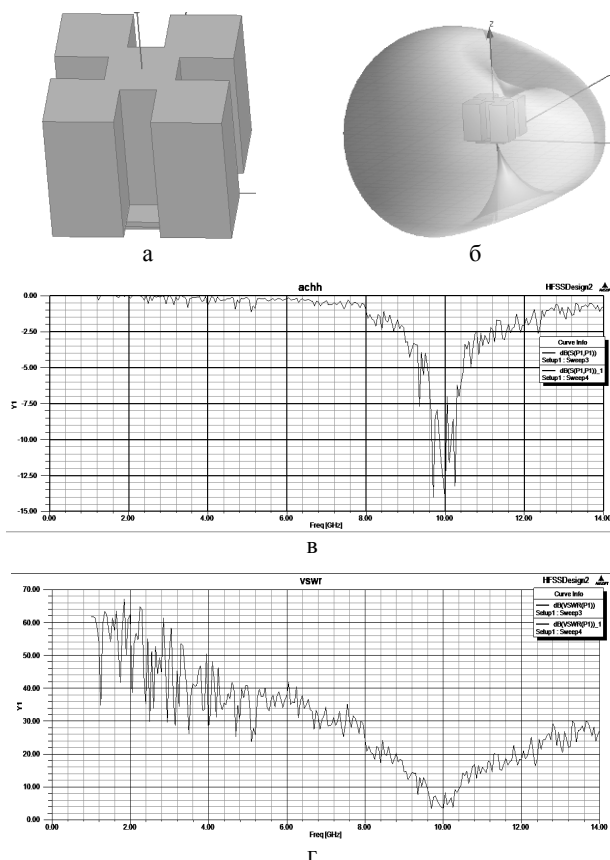


Рис. 4. 3-й варіант квазіфрактальної DRA:
а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

Разом з тим, досить великий крок по частоті при розрахунках (50 МГц) та відсутність узгодження DRA з приймально-передавальним трактом не дозволили на даному етапі отримати більш виразну картину розподілу резонансів. Однак, у відповідності з тлумаченням [10], у даному випадку доволі чітко відстежуються додаткові резонанси, які обумовлені зовнішніми габаритами квазіфрактальної основи антени, що сформовані бічними елементами.

Як і слід було очікувати, розширення смуги пропускання при зростанні перекриття паралелепіпедних елементів не може продовжуватися монотонно. Про це засвідчив наступний, 4-й варіант DRA, який відрізняється більш глибоким накладанням периферійних паралелепіпедів на центральний –

встановити, що збільшення занурення зовнішніх елементів антенної конструкції у центральне тіло призводить до розширення смуги пропускання антени через появу додаткових резонансів. Такий ефект цілком відповідає явищу, описаному в [10] на прикладі квазіфрактальної друкованої антени.

У 3-му варіанті DRA центральний елемент перекривається бічними елементами вже на 6 мм (рис. 4). У порівнянні з першим і другим варіантами, ширина смуги пропускання антени ще більше розширюється, оскільки додаткові резонанси розходяться на більшу відстань за частотою.

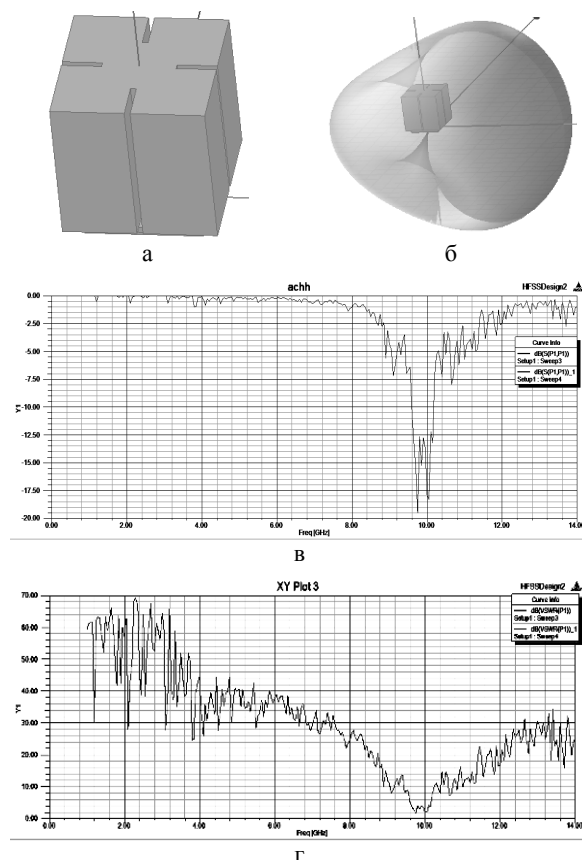


Рис. 5. 4-й варіант квазіфрактальної DRA:
а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

11,5 мм (рис. 5). Смуга пропускання АЧХ антени, при цьому, помітно зменшилася, оскільки інтервал за частотою між додатковими резонансами суттєво скоротився.

В даному випадку, на рівні -12,5 дБ смуга робочих частот перевищує 550 МГц у діапазоні 9,6÷10,2 ГГц. Таким чином, ретельно підбираючи інтервал взаємного накладання елементів DRA можливо віднайти компромісне рішення, яке задовольнить вимогам до максимально можливої смуги робочих частот. Відповідна оптимізаційна задача може бути вирішена і аналітично, однак використання пакету HFSS для цього є більш простим рішенням.

Стосовно наведених зображень 3D діаграм спрямованості слід вказати, що в усіх розглянутих

випадках вони відповідають граничним межах досліджуваного частотного діапазону.

Окрім аналізу впливу варіації конструктивного розташування паралелепіпедів у горизонтальній площині, в рамках описуваного дослідження було вивчено також вплив вертикального зсуву периферійних елементів відносно центрального тіла антени.

Модель антени у варіанті, наведеному на рис. 6, також містить 5 елементів, 4 з яких розташовані зверху центрального тіла. Із графіків видно, що результати подібні до 1-го варіанту розглянутої вище мо-

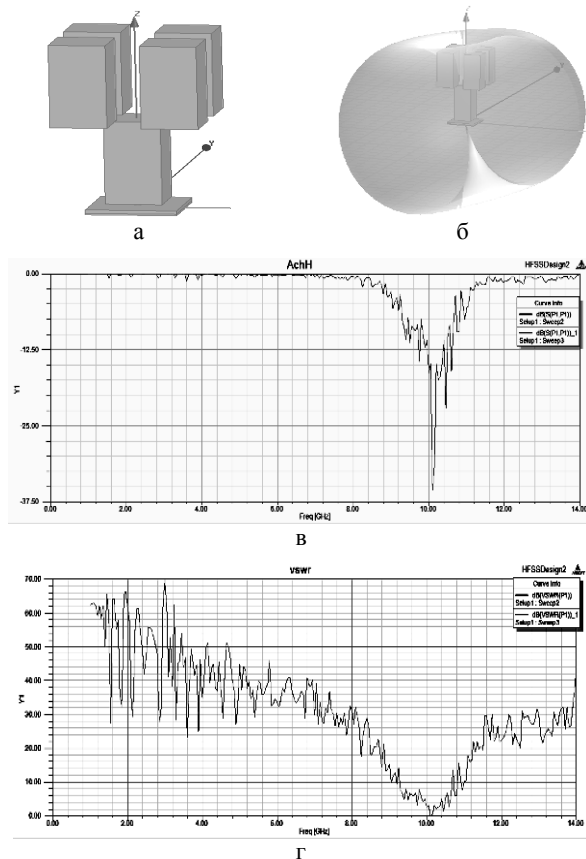


Рис. 6. 5-й варіант квазіфрактальної DRA:
а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

Порівняно з попередньою моделлю, діапазон робочих частот розширився. Чітко виражені перший та другий частотні резонанси мають майже однакові пікові значення.

Проаналізувавши розглянуті моделі антен, можливо підвести перший підсумок: розташування елементів антени, як і очікувалося, має значний вплив на її ДС та АЧХ.

При зміні розташування елементів по відношенню один до одного у вертикальній площині, дані на графіках АЧХ та ДС помітно різняться. Обґрунтованою можна вважати умову розташування всіх елементів у горизонтальній площині, що дозволяє отримати кращий результат і забезпечує наблизення результуючої ДС до однопроменевої.

делі: смуга пропускання АЧХ є досить вузькою, її пік приходить на другий резонанс, обумовлений габаритами зовнішніх елементів. При цьому в зоні області тривимірної ДС антени спостерігається значний провал.

Якщо опускати бічні елементи уздовж ребер центрального паралелепіпеда, картина буде змінюватися.

Для конструкції на рис. 7 бічні елементи розміщені вище центрального паралелепіпеда на відстань у півребра відносно основи та перекривають кути центрального елемента на 5 мм.

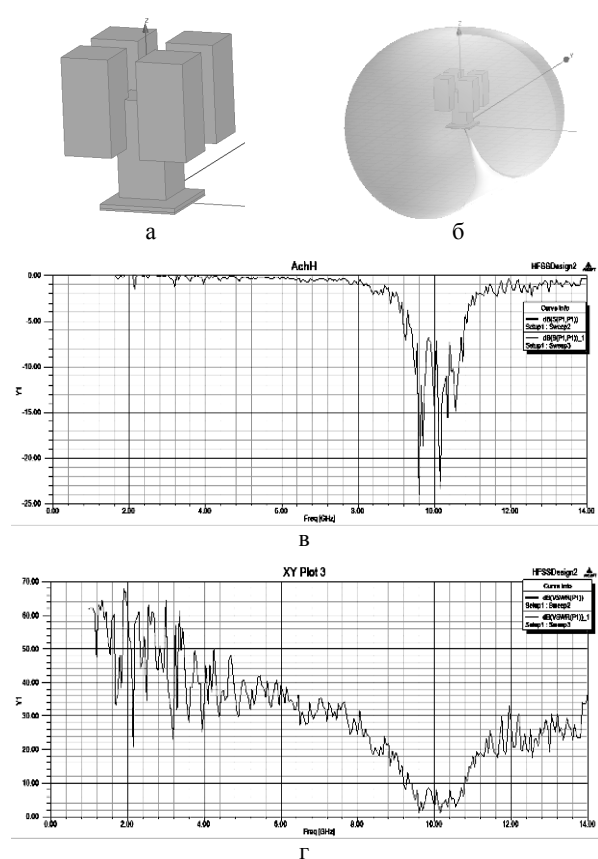


Рис. 7. 6-й варіант квазіфрактальної DRA:
а – схема живлення; б – ДС; в – АЧХ; г – VSWR

В цілому, отримані результати підтверджують адекватність попередньо зроблених припущень та висновків, що були зроблені в [10] для друкованих антен. Розміщення елементів DRA в горизонтальній площині дозволяє отримати більш якісні характеристики.

Як відомо, при проектуванні прагнуть зміщати резонансну частоту DRA в центр необхідної смуги пропускання.

В ідеалі, крива залежності величини VSWR по обидві сторони від резонансного мінімуму повинна бути симетричною.

Однак, на практиці, більш розповсюдженим є випадок несиметричності смуги пропускання відносно резонансу. Як наслідок, для оцінки частотних

властивостей антени доцільно використовувати поняття відносної смуги пропускання.

Висновки

Синтезовані варіанти моделі DRA на основі квазіфрактальних структур дозволяють розширити базу технічних рішень щодо реалізації мобільних додатків. Їх застосування дає змогу задовольнити вимоги щодо багатодіапазонності та широкосмуговості.

В подальшому, необхідно визначити геометричні параметри DRA для конкретних частотних діапазонів існуючих стандартів бездротових телекомунікаційних систем.

При цьому, доцільно виконати оцінку запропонованих компоновок моделі DRA з врахуванням обертання периферійних елементів уздовж поздовжньої осі, а також введення несиметричного перекриття периферійними елементами центрального.

Також, заслуговує уваги питання використання зазначених квазіфрактальних DRA на основі метаматеріалів [11] і в інтересах реалізації технологій цифрового діаграмоутворення [12] з врахуванням взаємного впливу антенних елементів цифрових антенних решіток.

Список літератури

1. Слюсар В.И. Диэлектрические резонаторные антенны. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2007. – № 2. – С. 28-37.
2. Слюсарь І.І. Імітаційна модель квазіфрактальної 3D-антени. / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Миколенко О.С. // *Проблеми інформатизації: Тези доповідей 5-ої міжнародної НТК, 13-15 листопада 2017 р.* – Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава. – С. 80.
3. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. / Слюсар В.И. // *Радиоаматор.* – 2002. – № 9. – С. 54-56.
4. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип “ломаных” антенн. Часть 1. / Слюсар В.И. // *Электроника: наука, технология, бизнес.* – 2007. – № 5. – С. 78-83.
5. Слюсар В.И. Фрактальные антенны. Принципиально новый тип «ломаных» антенн. Часть 2. / В.И. Слюсар // *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2007. – № 6. – С. 82-89.
6. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. / Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. – М.: Техносфера. – 2005. – С. 498-569.
7. Слюсарь І.І. Синтез фрактальних антен в пакеті MMANA [Електронний ресурс] / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Павлюк С.Ф., Кохан Л.І., Дерій Р.С. // *Новітні інформаційні системи та технології.* – Полтава: ПолтНТУ, 2017. – № 8. – Режим доступу: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PolNTU/3095>.
8. Миколенко О.С. Діелектрична резонаторна антена на основі усіченого конусу. [Електронний ресурс] / Миколенко О.С., Слюсар В.І., Слюсарь І.І. // *Новітні інформаційні системи та технології.* – 2017. – № 8. – Режим доступу: <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PolNTU/3096>.
9. Банков С.Е. Расчет антен и СВЧ структур с помощью HFSS Ansoft. / Банков С.Е., Курушин А.А. – М.: ЗАО «НПП «Родник», 2009. – 256 с.
10. Бабичев Д.А. Разработка и исследование микрополосковой антенны на основе фрактального подхода: дис. канд. техн. наук: 05.12.07 / Бабичев Д.А. – СПб., 2016. – 104 с.
11. Слюсарь І.І. Метаматеріали в антенах засобів мобільного зв'язку. / Слюсарь І.І., Слюсар В.І., Задорожний Р.Є. // *Проблеми інформатизації: Матеріали III-ої міжнародної НТК – Черкаси, ЧДТУ; Баку: ВА ЗС АР; Бельсько-Бяла: УТіГН; Полтава: ПолтНТУ, 2015.* – С. 54.
12. Слюсар В.И. Перспективные технологии антенных решеток для мобильных терминалов спутниковой связи. / Слюсар В.И. // *Технологии и средства связи.* – 2014. – № 4. – С. 64-68.

Надійшла до редколегії 19.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П.Є. Пустовойтов, Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава.

КВАЗИФРАКТАЛЬНАЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЗОНАТОРНАЯ АНТЕННА НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

В.Н. Семёнов, В.И. Слюсар, И.И. Слюсарь

В работе представлены предложения по реализации диэлектрических резонаторных антенн на основе квазіфрактальных структур, которые характеризуются отсутствием рекурсивного повторения. В качестве базового элемента предложено использование параллелепипеда. С целью определения влияния геометрии на пространственно-частотные характеристики антенны проведено моделирование с помощью пакета электродинамического моделирования Ansoft HFSS. На основе введенных допущений исследовались амплитудная частотная характеристика и коэффициент стоячей волны. На основе анализа моделей геометрии антенны определены оптимальные варианты компоновки центрального и периферийных элементов.

Ключевые слова: амплитудная частотная характеристика, диаграмма направленности, квазіфрактал, фрактал, Ansoft HFSS, DRA, VSWR.

QUASIFFRACTAL DIELECTRIC RESONATOR ANTENNA BASED ON PARALLELEPIPED

V.N. Semenov, V.I. Slyusar, I.I. Sliusar

The proposals for the implementation of dielectric resonator antennas based on quasi-fractal structures which are characterized by absence of recursive repetition. Parallelepiped is proposed as a basic element. In order to determine the influence of geometry on spatial-frequency characteristics of the antenna a simulation was carried out with the Ansoft HFSS software package. Based on these assumptions, frequency response and standing-wave ratio have been examined. Based on the analysis of antenna geometry models optimal configurations of core and peripheral were identified.

Keywords: amplitude frequency characteristic, beam pattern, quasifractal, fractal, Ansoft HFSS, DRA.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Андреев С.М.	105	Карлов В.Д.	158	Оберемок С.О.	44
Андрієвський В.А.	30	Качанов П.О.	111	Панкратов А.В.	48
Антошкін О.А.	111	Кириченко Ю.В.	158	Панченко В.І.	20
Артеменко А.М.	158	Кислиця С.Г.	9	Петренко О.Є.	39
Ахмед Ібрахим		Коваленко А.А.	73	Петрухін С.Ю.	126
Джабер Альзубайді	3	Коваль М.О.	77	Пісоцька Л.А.	59
Безрук В.М.	135	Кожушко Г.М.	9	Подліпаєв В.О.	91
Бесова О.В.	158	Козелков С.В.	14	Пупченко Д.В.	68
Бороздін М.К.	3	Криховецький Г.Я.	164	Романова Т.Є.	48
Бурба О.І.	149	Куцмус С.І.	30	Сакович Л.М.	164
Бутенко О.С.	114	Кучук Г.А.	73	Свиридов А.С.	87
Гайдабука В.Є.	126	Кучук Н.Г.	97	Семенов В.М.	167
Галаговець Ю.Ю.	30	Левченко Л.О.	120	Сідько О.С.	120
Галай В.М.	34	Лисенко І.В.	83	Скакаліна О.В.	24
Галиця В.І.	111	Литвяк О.М.	111	Слюсар В.І.	142, 167
Гейко Г.В.	20	Лукова-Чуйко Н.В.	77	Слюсарь І.І.	142, 167
Глухова Н.В.	59	Маковейчук О.М.	91	Солодченко К.Г.	63
Головняк Д.В.	30	Маракушин Д.І.	101	Стоян Ю.Є.	48
Горбань Г.В.	91	Матикін В.Б.	126	Тютюник В.В.	126
Горелик С.І.	114	Мезенцев М.В.	20	Федоров А.В.	30
Гороховатський В.О.	63, 68	Мельник Ю.В.	14	Хижняк І.А.	91
Гребеля Р.Є.	142	Мохамед Сааді Хасан	3	<i>Ходирєв О.І.</i>	39
Донець В.В.	97	Мусієнко А.П.	77	Худов Г.В.	91
Дорогобід В.П.	3	Небесна Я.Є.	164	Худов Р.Г.	91
Дубницький В.Ю.	39	Нечаусов А.С.	105	Чернявський І.Ю.	126
Єрмілова Н.В.	9	Нечаусов С.М.	73	Чугай А.М.	55
Иваненко С.А.	135	Нікітін А.А.	114	Шматков С.І.	97
Ільницький А.І.	149	Нос Р.С.	83	Янковська Д.О.	101
Кальватинський О.В.	154	Носков В.І.	20	Янковський О.А.	101

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 2 (48)

Відповідальна за випуск *К. С. Козелкова*Технічний редактор *Т. В. Уварова*Коректор *О. В. Морозова*Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*Оформлення обкладинки *І. В. Ільїна*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПП від 16.11.2012 р.

Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 21,5. Тираж 150 прим. Зам. 411-18

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (066) 706-18-30
Полтавський національний технічний університет імені Юрія КондратюкаВіддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис № 2480000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широїнівців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34

e-mail: bookfabrik@mail.ua