

Запорізький національний технічний університет



# Радіоелектроніка Інформатика Управління

**1(26)'2012**

## Науковий журнал

Виходить двічі на рік

Видається з березня 1999 року

Зареєстрований **29 січня 2003 року**  
Державним комітетом інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України.  
Свідоцтво – серія **KB № 6904**

*Засновник і видавник – Запорізький національний технічний університет*

Запоріжжя, ЗНТУ

2012

**ISSN 1607-3274**

Постановою президії ВАК України № 1-05/4 від 26.05.2010 р. журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (скорочена назва – РІУ), який видається з 1999 року, включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук та фізико-математичних наук (радіофізики).

Журнал є донором журналу «Telecommunications and Radio Engineering», який видається в США.

Інтернет-сторінка журналу: <http://journal.zntu.edu.ua/ric/index.php?page=index>.

Статті, що публікуються в журналі, реферуються в базах даних та РЖ ВІНІТІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Журнал РІУ міститься у міжнародній базі наукових видань Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>), електронна копія журналу розміщена на сайті Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського НАН України у розділі «Наукова періодика України» за адресою: <http://nbuv.gov.ua/portal/>.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

### **РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

**Головний редактор** – д-р техн. наук Піза Д. М. [Piza D. M.]

**Заст. головного редактора** – канд. техн. наук Дубровін В. І. [Dubrovin V. I.]

**Члени редколегії:**

д-р техн. наук Андрієнко П. Д. [Andriyenko P. D.] Україна

д-р фіз.-мат. наук Горбань О. М. [Gorban O. M.] Україна

д-р фіз.-мат. наук Горр Г. В. [Gorr G. V.] Україна

д-р техн. наук Гостев В. І. [Gostev V. I.] Україна

д-р фіз.-мат. наук Дробахін О. О. [Drobakhin O. O.] Україна

д-р техн. наук Карпуков Л. М. [Karpukov L. M.] Україна

д-р техн. наук Кирилов В. І. [Kirilov V. I.] Білорусія

д-р фіз.-мат. наук Корніч Г. В. [Kornich G. V.] Україна

д-р техн. наук Кулік А. С. [Kulik A. S.] Україна

д-р техн. наук Малафеев С. І. [Malafeev S. I.] Росія

д-р фіз.-мат. наук Матюшин В. М. [Matyushin V. M.] Україна

д-р фіз.-мат. наук, проф. Марковська-Качмар У. [Markowska-Kaczmar U.] Польща

к-т фіз.-мат. наук Олещук В. О. [Ph. D. Oleshchuk V. O.] Норвегія

д-р фіз.-мат. наук Онуфрієнко В. М. [Onufrienko V. M.] Україна

д-р фіз.-мат. наук Погосов В. В. [Pogosov V. V.] Україна

д-р техн. наук Потапенко Е. М. [Potapenko E. M.] Україна

д-р техн. наук Толок В. О. [Tolok V. O.] Україна

д-р фіз.-мат. наук Чумаченко В. П. [Chumachenko V. P.] Україна

д-р техн. наук Шарпанських О. А. [Sharpanskykh O. A.] Голландія

Рекомендовано до видання вченого радою Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ), протокол № 06 від 27.02.2012 р.

Рукописи проходять незалежне рецензування з залученням провідних фахівців, за результатами якого редакційна колегія приймає рішення про опублікування.

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом ЗНТУ.

**Адреса редакції:** 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, редакція журналу «РІУ».

Тел: (061) 769-82-96 – редакційно-видавничий відділ

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: [rvv@zntu.edu.ua](mailto:rvv@zntu.edu.ua)

---

## ЗМІСТ

РАДІОФІЗИКА.....	7
<i>Gorbenko V. I., Gorban A. N.</i> THERMAL DECOMPOSITION OF INDIUM PHOSPHIDE IN VACUUM AND ATOMIC HYDROGEN ENVIRONMENT.....	7
<i>Никонов А. Ю., Небеснюк О. Ю., Шмалий С. Л., Никонова З. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ.....	11
РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	14
<i>Петрова Е. В., Фурманова Н. И. Фарафонов А. Ю.</i> РАЗРАБОТКА УПРОЩЕНОГО АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ППФ НА ШПИЛЕЧНЫХ РЕЗОНАТОРАХ С ОТВЕРСТИЯМИ В ЭКРАНИРУЮЩЕМ СЛОЕ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В ПРОГРАММЕ ANSOFT HFSS .....	14
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕлювання.....	19
<i>Гостев В. И.</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕХРЕЖИМНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЬЮ В TCP/IP СЕТЯХ.....	19
<i>Кулик А. С., Пищухина О. А., Ключок А. Ю.</i> МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ОШИБОК ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ.....	59
<i>Гофман Е. О., Олійник А. О., Субботін С. О.</i> СКОРОЧЕННЯ БАЗ ЛІНГВІСТИЧНИХ ПРАВИЛ НА ОСНОВІ ДЕРЕВ РОЗВ'ЯЗКІВ.....	27
<i>Мельникова Н. І.</i> МОДЕлювання ЕКСПЕРТНИХ СИСТЕМ ПРИЗНАЧЕННЯ ЛІКУВАННЯ.....	63
<i>Ільяшенко М. Б., Голдобин А. А.</i> РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОИСКА ИЗОМОРФИЗМА ГРАФОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ.....	31
<i>Сабо И. И., Толок В. А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О ШТАМПЕ В ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ.....	70
<i>Лисицкая И. В.</i> СРАВНЕНИЕ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ СУПЕРБЛОКОВ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ ШИФРОВ.....	37
<i>Чапланова Е. Б.</i> ОПЕРАЦИОННАЯ СПЕЦИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТНО- РЕЛЯЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ.....	75
<i>Баркалов А. А., Мальчева Р. В., Солдатов К. А.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ СХЕМЫ АВТОМАТА МУРА, РЕАЛИЗУЕМОЙ В БАЗИСЕ ПЛИС.....	44
<i>Хомченко А. Н., Мотайлло А. П.</i> ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛОГ ИНТЕГРАЛА ПУАССОНА ДЛЯ ШАРА.....	79
<i>Высоцина О. С., Данич В. Н., Пархоменко В. П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ARENA.....	82
<i>Кошевої Н. Д., Сухобрус Е. А.</i> СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	53

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	86
<i>Дейнеко А. О., Плісс І. П., Бодянський Є. В.</i>	
КОМБІНОВАНЕ НАВЧАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ НЕЙРО-ФАЗЗІ СИСТЕМИ.....	86
<i>Romanuke V. V.</i>	
OPTIMAL STRATEGIES CONTINUUM FOR PROJECTING THE FOUR-MOUNT CONSTRUCTION UNDER INTERVAL UNCERTAINTIES WITH INCORRECTLY PRE-EVALUATED TWO LEFT AND ONE RIGHT ENDPOINTS.....	92
<i>Субботин С. А.</i>	
КОНСТРУИРУЕМЫЕ ПРИЗНАКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ СТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ.....	96
<i>Ткаченко Р. О., Машевська М. В.</i>	
НЕЙРОНЕЧІТКА СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СИНТЕЗУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКА РІВНЯ БЮКОМФОРТУ.....	103
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	107
<i>Вершина О. І., Киричек Г. Г.</i>	
МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПДТРИМКИ НАВЧАННЯ.....	107
<i>Різун Н. О., Тараненко Ю. К.</i>	
МОБІЛЬНА СИСТЕМА КОМП'ЮТЕРНОГО ТЕСТУВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ ВНЗ.....	129
<i>Кулик А. С., Лученко О. А., Фирсов С. Н.</i>	
АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ.....	112
<i>Хаханов В. И., Чумаченко С. В., Литвинова Е. И., Гузь О. А.</i>	
ИНФРАСТРУКТУРА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СИСТЕМ.....	134
<i>Левікін В. М., Костенко О. П., Петріченко О. В.</i>	
РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ СИСТЕМНИХ ВИМОГ ДО РІШЕННЯ МАРКЕТИНГОВИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ.....	123
ТЕОРІЯ І МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....	141
<i>Александрова Т. Е.</i>	
ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РОБАСТНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ.....	141
<i>Лозинський А. О., Демків Л. І.</i>	
СИНТЕЗ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗІ ЗМІННИМИ ВАГОВИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ.....	144
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	148
<i>Бушер В. В.</i>	
ОПТИМАЛЬНЫЕ АСТАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ДРОБНЫМИ ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ.....	148
<i>Козырев В. Г.</i>	
РЕДУЦИРОВАННОЕ ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ.....	151
ABSTRACTS. REFERENCES.....	157

---

# CONTENTS

RADIOPHYSICS.....	7
<i>Gorbenko V. I., Gorban A. N.</i> THERMAL DECOMPOSITION OF INDIUM PHOSPHIDE IN VACUUM AND ATOMIC HYDROGEN ENVIRONMENT.....	7
<i>Nikonov A. Y., Nebesnjuk O. J., Shmaly S. L., Nikonova Z. A.</i> RESEARCH OF FEATURES THE FORMATION OF DEFECTS IN HIGHLY ALLOYING SILICON DURING IRRADIATED.....	11
RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	14
<i>Petrova K. V., Furmanova N. I., Farafonov A. Y.</i> DEVELOPMENT OF SIMPLIFIED ALGORITHM FOR THE DESIGN OF MICROSTRIP BAND-PASS ON HAIRPIN RESONATORS FILTERS WITH SLOTS IN THE GROUND PLANE ON THE ELECTRODYNAMICS ANALYSIS IN ANSOFT HFSS.....	14
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....	19
<i>Gostev V. I.</i> DESIGNING OF AN THREE-REGIME FUZZY CONTROLLER FOR SYSTEMS OF ACTIVE QUEUE MANAGEMENT IN TCP/IP NETWORKS.....	19
<i>Gofman Ye., Oliinyk A., Subbotin S.</i> LINGUISTIC RULES BASES REDUCTION BASED ON DECISION TREES.....	27
<i>Il'yashenko M. B., Goldobin A. A.</i> GRAPH-SUBGRAPH ISOMORPHISM PROBLEM SOLVING FOR DESIGNING SPECIAL COMPUTERS.....	31
<i>Lysytska I. V.</i> COMPARING ON EFFECTIVENESS OF SUPERBOXES SOME MODERN SIPHERS.....	37
<i>Barkalov A. A., Malcheva R. V., Soldatov K. A.</i> OPTIMIZATION OF MOORE FINITE STATE MACHINE IMPLEMENTED ON THE PROGRAMMABLE LOGIC....	44
<i>Kirichenko L. O., Demerchan K. A., Kayali E., Habachyova A. Yu.</i> MODELING TELECOMMUNICATIONS TRAFFIC USING STOCHASTIC MULTIFRACTAL CASCADE PROCESS....	48
<i>Koshevoy N. D., Sukhobrus E. A.</i> THE COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS OF A MULTILEVEL MULTIFACTOR EXPERIMENT PLANS.....	53
<i>Kulik A. S., Pishchukhina O. A., Klochok A. Yu.</i> MODELS AND ALGORITHMS FOR FINDING ERRORS WHILE SOLVING TASKS USING COMPUTER-ASSISTED LEARNING.....	59
<i>Melnykova N. I.</i> MODELING OF EXPERT SYSTEM ASSIGNMENT TREATMENT.....	63
<i>Sabo I. I., Tolok V. O.</i> MODELLING THE STAMP PROBLEM IN TWO- DIMENSIONAL FORMULATION.....	70
<i>Chaplanova E.</i> OPERATING SPECIFICATIONS OF THE OBJECT- RELATIONAL DATA MODEL.....	75
<i>Khomchenko A. N., Motailo A. P.</i> DISCRETE ANALOGUE OF THE POISSON INTEGRAL FOR A BALL.....	79
<i>Vysochyna O. S. Danich V. N., Parkhomenko V. P.</i> MANUFACTURING PROCESSES MODELING OF INDUSTRIAL ENTERPRISES BY MEANS OF ARENA SYSTEM SIMULATION.....	82

---

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	86
<i>Deineko A. A., Pliss I. P., Bodyanskiy Ye.</i>	
EVOLVING NEURO-FUZZY SYSTEM COMBINED LEARNING.....	86
<i>Romanuke V. V.</i>	
OPTIMAL STRATEGIES CONTINUUM FOR PROJECTING THE FOUR-MOUNT CONSTRUCTION UNDER INTERVAL UNCERTAINTIES WITH INCORRECTLY PRE-EVALUATED TWO LEFT AND ONE RIGHT ENDPOINTS.....	92
<i>Subbotin S. A.</i>	
CONSTRUCTED FEATURES FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF STATIONARY TIMING SIGNALS.....	96
<i>Tkachenko R., Mashevska M.</i>	
NEURO-FUZZY SYSTEM FOR AUTOMATION SYNTHESIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR EVALUATING AN INDEX OF LEVEL OF BIOCOMFORT.....	103
PROGRESSIV INFORMATICS TECHNOLOGIES.....	107
<i>Vershina A. I., Kirichek G. G.</i>	
MODEL SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT FOR LEARNING.....	107
<i>Kulik A. S., Luchenko O. O., Firsov S. N.</i>	
ALGORITHMIC SOFTWARE OF DIAGNOSE AND SERVICEABILITY OF ATTITUDE AND STABILIZATION SATELLITE SYSTEM RESTORATION MODULES.....	112
<i>Rizun N. O., Taranenko Y. K.</i>	
MOBILE SYSTEM OF COMPUTER TESTING AS THE INSTRUMENT OF INTENSIFICATION OF STUDY PROCESS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS....	129
<i>Hahanov V. I., Chumachenko S. V., Litvinova E. I., Guz O. A.</i>	
DIAGNOSIS INFRASTRUCTURE FOR SOFTWARE- HARDWARE SYSTEMS.....	134
<i>Levykin V. M., Kostenko O. P., Petrichenko O. V.</i>	
METHOD DEVELOPMENT FOR SYSTEM DEMANDS ASSESSMENT TO THE DECISION OF MARKETING TASKS FOR INFORMATION SYSTEMS PROJECTING.....	123
TEORY AND METHODS CONTROL OF AUTOMATIC CONTROL.....	141
<i>Alexandrova T. Ye.</i>	
PARAMETRIC SYNTHESIS OF ROBUST OPTIMAL STABILIZERS OF MOVING OBJECTS.....	141
<i>Lozynsky A. O., Demkiv L. I.</i>	
SYNTHESIS OF MULTICRITERIAOPTIMAL CONTROLWITH VARIABLEWEIGHTS.....	144
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	148
<i>Busher V. V.</i>	
OPTIMAL ASTATIC CONTROL WITH FRACTIONAL ORDER INTEGRAL-DIFFERENTIAL REGULATORS....	148
<i>Kozyrev V. G.</i>	
MULTI-TIME-SCALE TERMINAL CONTROL OF MOTOR AXIS ANGULAR VELOCITY.....	151
ABSTRACTS. REFERENCES.....	157

# РАДІОФІЗИКА

## РАДІОФІЗИКА

### RADIOPHYSICS

УДК 621.315.5:544.03

Gorbenko V. I.<sup>1</sup>, Gorban A. N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. in physics, associate professor, Classical Private University

<sup>2</sup>D.Sc. in physics, professor, first vice-rector, Classical Private University

## THERMAL DECOMPOSITION OF INDIUM PHOSPHIDE IN VACUUM AND ATOMIC HYDROGEN ENVIRONMENT

The thermal decomposition of indium phosphide has been investigated by Auger-electron spectroscopy and mass-spectroscopy. Scanning electron microscopy has been used for study of indium islands growth on surface of the compound semiconductor. The role of atomic hydrogen in processes of decomposition and growth of metallic islands was determined by comparing with these processes under vacuum.

**Key words:** indium phosphide, atomic hydrogen, thermal decomposition, scanning electron microscopy.

### INTRODUCTION

It is now well established that the interaction of atomic hydrogen with clean InP surface leads to a decomposition of the substrate [1–3]. There are two successive stages of the interaction. During first interaction stage H-atoms binds covalently to the substrate and saturates surface unit cells [1, 4]. The second interaction stage leads to a decomposition of the substrate [2]. Auger Electron Spectroscopy (AES) measurements have shown that the ratio of the intensities of the P(120eV) and In(410eV) peaks decrease during the exposure of indium phosphide in atomic hydrogen. The confirmation of a metal presence on the surface was given by Photoemission Yield Spectroscopy (PYS), too. The adsorption stage of the interaction and the decomposition stage are contiguous at doses of hydrogen exposition about  $5 \times 10^3$ – $10^4$  L. In accordance with estimations in [1] the number of hydrogen atoms reaching the sample during an exposition  $10^4$  L is  $10^{15}$  atoms/cm<sup>2</sup>. The techniques based on high frequency discharge in wet hydrogen allows to obtain  $10^{14}$ – $10^{15}$  H-atoms per cm<sup>3</sup> and its flow to sample surface about  $10^{19}$ – $10^{20}$  atoms·s<sup>-1</sup>·cm<sup>-2</sup>.

The aim of this report is to present the investigation results of influence of high concentration of atomic hydrogen on the decomposition and the metallization process of indium phosphide.

### EXPERIMENTAL

The vacuum equipment and experimental conditions have been described in details elsewhere[5]. We recall that the

expositions of InP samples have been carried out in a specially designed vacuum chamber (reactor). To this chamber via diaphragm the monopole mass spectrometer MX7304A (produced by «SELMI», Ukraine) was connected. Such construction gives an opportunity to record a real-time mass spectra of the gas components. The wet hydrogen fed a discharge vessel, which was connected to the reactor. The hydrogen was excited by high-frequency discharge. During experiments the normal working pressure of gases in the reactor was at the level of 10...25 Pa and a base pressure in the spectrometer chamber was of about  $10^{-5}$  Pa. The maximal concentration of atomic hydrogen was at the level of  $10^{15}$  cm<sup>-3</sup>.

The samples were cut from *n*-type InP single crystals ( $n=1,1 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> (111)). The standard surface preparations before exposition to the gas mixture in reactor were chemical polishing in a bromine-methanol etchant and successive rinsing in bidistilled and deionised water. During exposition the distance between the discharge and semiconductor sample was about 20 cm that produced conditions for termalization and deionization of gas particles moving from the discharge to the sample.

### RESULT AND DISCUSSION

**Decomposition.** The effect of the high-intensity flow of hydrogen atoms on the decomposition of indium phosphide has been investigated by mass spectrometric method.

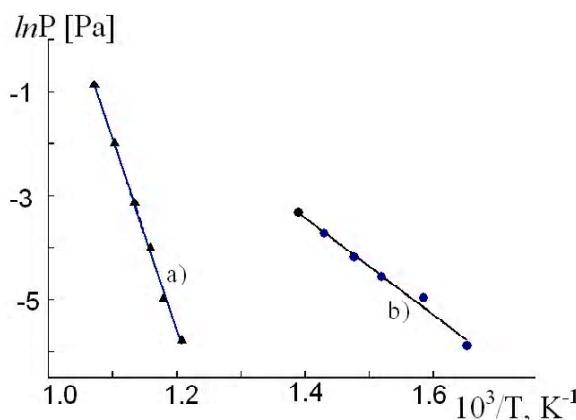
The experiments showed that the heating of InP surface up to 800K in hydrogen environment without discharge did

not change the composition of the system gas phase. At higher temperature the diphosphorus molecules were detected. None of the gas hydrogen-phosphorus species were discovered up to 1000 K.

The dependence of diphosphorus partial pressure as function of temperature was similar to that observed during a dissociation of indium phosphide in vacuum. The dependence depicted as Arrhenius plots is shown on fig. 1 curve (a). From the slope of the curve (a) we have found that the enthalpy of reaction  $\text{InP}_{(\text{sol})} \rightarrow \text{In}_{(\text{sol})} + 1/2\text{P}_{2(\text{gas})}$  at 298 K is about 36,9 kcal/mole. It is close to the standard value for this reaction [6]. Probably, the decomposition of indium phosphide in such system is caused by a simple dissociation of the compound.

The exciting of hydrogen by high-frequency discharge added the atomic hydrogen to the system. The exposition of indium phosphide at maximum concentration of the atomic hydrogen caused a drastic change of the process of indium phosphide decomposition. The temperature of the beginning of the decomposition was lower than that for vacuum or molecular hydrogen medium. In our experiments this temperature for both vacuum and unexciting hydrogen was close to 800K and it was reduced by 230 K in the presence of atomic hydrogen. Moreover, in mass spectra both the phosphine and the diphosphorus were observed simultaneously. It is really nothing new to find the  $\text{PH}_3$  molecules in the systems similar to H/InP. But an appearance of diphosphorus in gas phase at such a low temperature as 570 K was detected for the first time. Finally, the figure 1(b) shows the dependence of diphosphorus partial pressure in the system with atomic hydrogen. Both a shift of the curve to low temperatures and a change of the curve slope are evident. In this case the enthalpy of reaction  $\text{InP}_{(\text{sol})} \rightarrow \text{In}_{(\text{sol})} + 1/2\text{P}_{2(\text{gas})}$  at 298K was estimated as 9,32 kcal/mole that is strongly differed from the standard value.

It has been experimentally established that during thermal dissociation of indium phosphide the  $\text{P}_2$  and  $\text{P}_4$  species are



**Fig. 1.** Dependence of diphosphorus partial pressure as function of temperature:

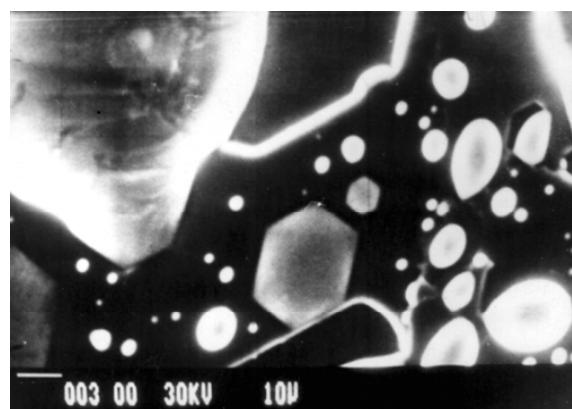
- a) during InP dissociation in vacuum or molecular hydrogen;
- b) during InP exposition in hydrogen environment with concentration of H-atoms about  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$

initially forming because they are thermodynamic preferable and P-atoms have enough high surface diffusivity [6]. For treatments of InP with atomic hydrogen HREELS measurements have shown the binding covalently of atomic hydrogen to both P-atom and In-atom on the surface [3, 4]. The saturation of surface by atomic hydrogen leads to a breaking of the bonds between In and neighbouring P-atoms. Probably such interaction of atomic hydrogen with surface atoms is able to cause a releasing of phosphorus atoms similar to a thermal treatment in vacuum. We are thinking that the weakening of In-P bonds by hydrogen interaction with surface is a reason of decreasing both a temperature of InP decomposition and an enthalpy of InP dissociation reaction.

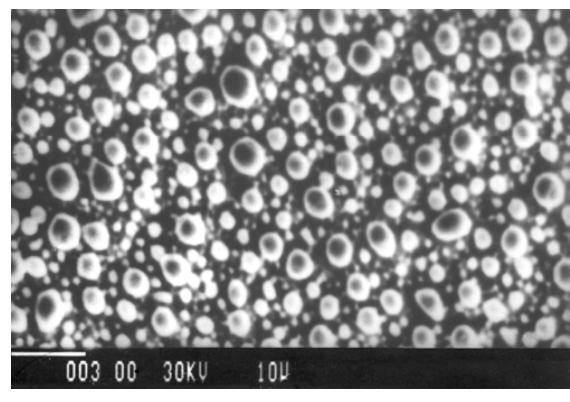
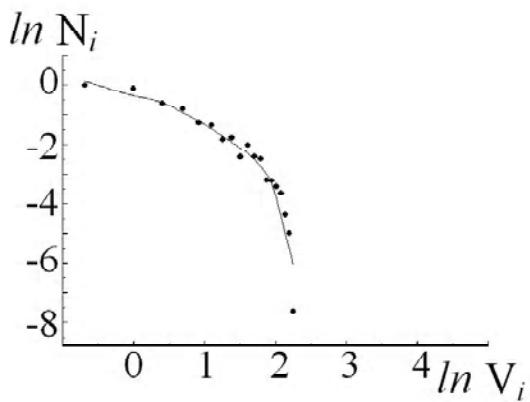
**Growth of Indium Islands.** The influence of hydrogen atoms on the process of the indium islands growth has been investigated by a comparing with In-islands growth during InP dissociation in vacuum. The scanning electron microscopy method has been used.

The fig. 2 shows the main features of InP surface (111) after the dissociation in vacuum: hexahedral shaped indium islands (label 1); a simple drop with a spherical form (label 2); a drop which has been formed from hexahedral islands (label 3); and the label 4 marks a hexahedral area which was emptied after transition of an indium island from hexahedral to sphere-like shape. On surface of some samples the islands with triangular shape have been observed too. Probably the growth on the (111) surface of triangular and hexahedral islands is conditioned by dislocations of the semiconductor crystal. At a dislocation core the atoms are weaker bound than atoms in the crystal. Therefore the phosphorus atoms of the dislocation core are able to desorb at the lowest temperature that causes an initial nucleation of indium islands at dislocation. That explains a forming of shapes of the islands similar to shapes of etching pits.

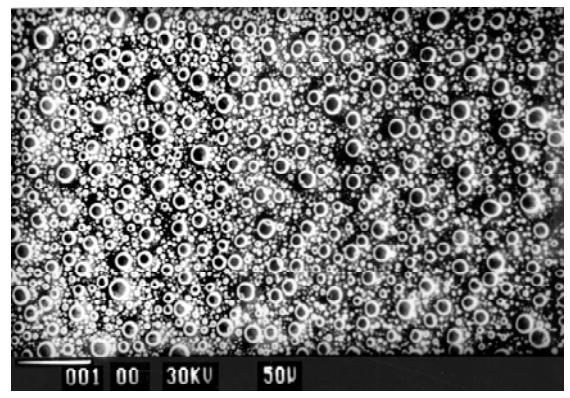
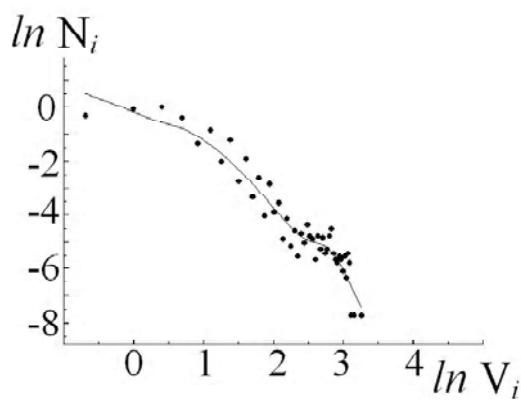
Different from that the decomposition of indium phosphide in hydrogen with high concentration of atomic component leads to a forming only spherical islands (fig. 3, a-d).



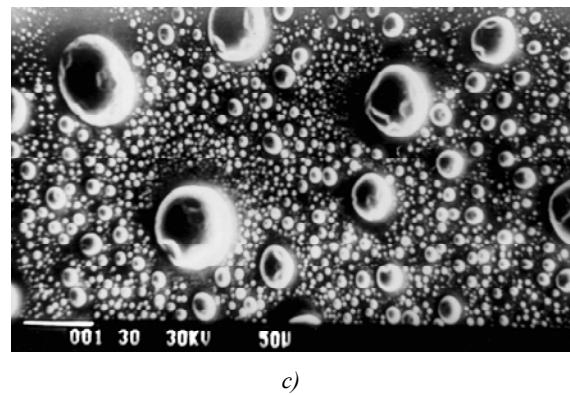
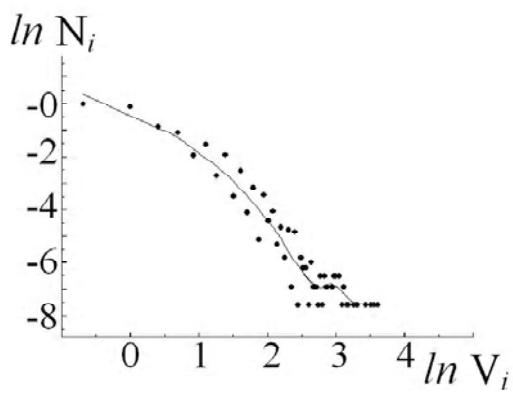
**Fig. 2.** InP (111) surface after dissociation in vacuum. The temperature of treatment is about 800 K



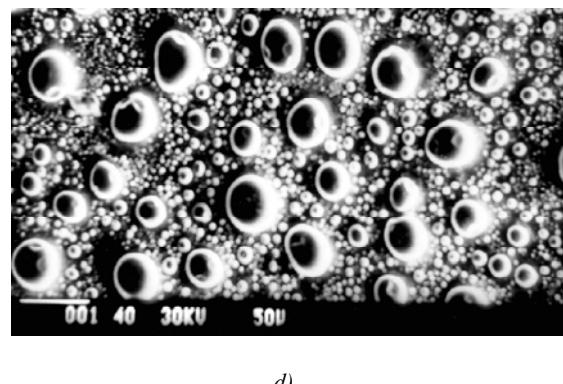
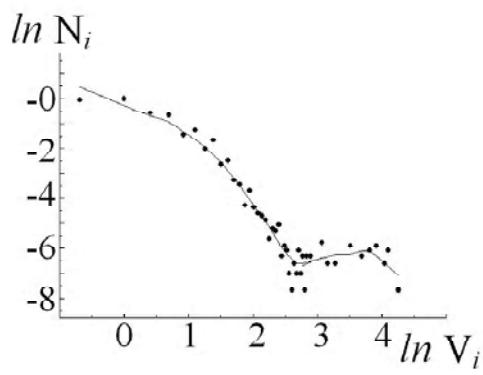
a)



b)



c)



d)

**Fig. 3.** InP (111) surface after exposition in atomic hydrogen. At left from them the experimental islands size distributions are shown with correspondence to micrographs

Never on such samples the straight-sided islands have not been observed. It is clear that the dislocations do not play a visible role in the process of an interaction of H-atoms with InP surface. The micrographs on fig. 3 are highlighting steps of islands evolution during atomic hydrogen exposition of InP sample.

The first step is incubation not shown on micrographs here. The step duration is depended on temperature of sample and environment. The incubation step comes to an end by formation of small indium drops (for example fig. 3, a). At high density of atomic hydrogen flow to a surface the beginning of islands appearance is very difficult to determine exactly. On the left from fig. 3, a the typical distribution of islands sizes at start of growth is shown. The sizes of islands form a short range with clear restriction on the right.

The subsequent InP expositions in atomic hydrogen are leading to a spreading of this restriction. Some casual chosen islands grow much faster others. On the distribution in the range of greatest sizes there is a small group which is gradually separating from its basic part. As well as in a case of InP dissociation in vacuum a coalescence is one of the reasons of appearance of large islands. The other reason is non-uniformity of a flow of hydrogen atoms to various areas of a surface. The homogeneity of H-atoms flow is upsetting after forming of metal subsystem on the sample surface. Really the metallic islands catalyze the recombination reaction of hydrogen atoms to molecule. Therefore the forming of indium islands leads to increasing of gradient of the atomic hydrogen concentration near to the sample surface. During recombination act the energy about 4,3 eV is produced. With a combination of an intensive flow of H-atoms it can give the additional heating of islands and cause the enhancing process of decomposition. Really the metallic islands catalyze the recombination reaction of hydrogen atoms to molecule. Therefore the forming of indium islands leads to increasing of gradient of the atomic hydrogen concentration near to the sample surface. During recombination act the energy about 4,3 eV is produced. With a combination of an intensive flow of H-atoms it can give the additional heating of islands and cause the enhancing process of decomposition. Any island that has larger size than nearest neighbours is able to change the gradient of H-atoms concentration and more intensive flow of H-atoms is forming to this island. It is clear such island grows faster than its neighbours at the same time the growth of neighbours is depressed more and more. Fig. 3 c, d and enclosed distributions illustrate such behavior of islands.

## CONCLUSION

The role of atomic hydrogen in the processes of indium phosphide decomposition and growth of indium islands on InP(111) surface has been studied. The increasing of concentration of atomic hydrogen in gas phase causes a decreasing of minimal temperature of the indium phosphide decomposition. During decomposition the species  $P_2$ ,  $P_4$  and  $PH_3$  are forming. The enthalpy of reaction

$InP_{(sol)} \rightarrow In_{(sol)} + 1/2 P_{2(gas)}$  is strongly decreased in the presence of atomic hydrogen. The catalytic properties of indium to the reaction of recombination of hydrogen atoms are influencing on process of island growth. The steps of island evolution during atomic hydrogen exposition of InP sample have been established.

## REFERENCES

1. M'hamedi, O. Interaction of atomic hydrogen with cleaved InP. I. The adsorption stage / M'hamedi O., Proix F., Sebenne C. A. // Journal of Vacuum Science and Technology A. – 1988. – Vol. 6, № 2. – P. 193–198.
2. Proix, F. Interaction of atomic hydrogen with cleaved InP. II. The decomposition stage / Proix F., M'hamedi O., Sebenne C. A. // Journal of Vacuum Science and Technology A. – 1988. – Vol. 6, № 2. – P. 199–203.
3. Proix, F. Dissociation effects of H and  $H_2^+$  on clean III–V compounds / Proix F. // Physica B. – 1991. – № 170. – P. 457–468.
4. Schaefer, J. A. Atomic hydrogen – a local probe for interface characterization / Schaefer J. A. // Surface Science. – 1987. – № 189/190. – P. 127–136.
5. Gorbenko, V. Oxidation and metallization in  $H_2/H_2O/InP$  system / Gorbenko V., Shvets J., and Gorban A. // Proceedings of the Twenty-Seventh State-of-The-Art Program On Compound Semiconductors (SOTAPCS XXVII) by editors S. N. G.Chu, D. N. Buckley, K. Wada et. al. Vol. 9721. – The Electrochemical Society, Pennington, 1997. – P. 375–381.
6. Panish, M. B. Phase equilibria and vapor pressures of the system In+P / Panish M. B., Arthur J. R. // J. Chem. Thermodynamics. – 1970. – vol. 2, № 3. – P. 299–318.

Стаття надійшла до редакції 16.11.2011.

Горбенко В. І., Горбань А. Н.

ТЕРМІЧЕСКАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ФОСФИДА ИНДІЯ В ВАКУУМЕ И В СРЕДЕ С АТОМАРНЫМ ВОДОРОДОМ

Исследование термической декомпозиции фосфида индия и изменения морфологии поверхности выполнено при помощи Оже-электронной спектроскопии, масс-спектроскопии и сканирующего электронного микроскопа. Влияние атомарного водорода на процесс декомпозиции фосфида индия, возникновение и рост островков индия определено благодаря сравнению с подобными процессами в условиях вакуума.

**Ключевые слова:** фосфид индия, атомарный водород, термическая декомпозиция, сканирующая электронная микроскопия.

Горбенко В. І., Горбань О. М.

ТЕРМІЧНА ДЕКОМПОЗИЦІЯ ФОСФІДУ ІНДІЮ У ВАКУУМІ ТА В СЕРЕДОВИЩІ З АТОМАРНИМ ВОДНЕМ

Термічна декомпозиція фосфіду індію у вакуумі та в середовищі з атомарним воднем

Дослідження термічної декомпозиції фосфіду індію та морфологічних змін поверхні проводилось за допомогою Оже-електронної спектроскопії, мас-спектроскопії та скануючого електронного мікроскопа. Вплив атомарного водню на процес декомпозиції фосфіду індію, виникнення та ріст індієвих островків визначено завдяки порівнянню з подібними процесами в умовах вакууму.

**Ключові слова:** фосфід індію, атомарний водень, термічна декомпозиція, скануюча електрона мікроскопія.

Никонов А. Ю.<sup>1</sup>, Небеснюк О. Ю.<sup>2</sup>, Шмалий С. Л.<sup>3</sup>, Никонова З. А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Инженер Запорожской государственной инженерной академии

<sup>2, 3</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорожской государственной инженерной академии

<sup>4</sup>Канд. техн. наук, профессор Запорожской государственной инженерной академии

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ В ВЫСОКОЛЕГИРОВАННОМ КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

В статье приведены результаты экспериментального исследования механизмов взаимодействия высокоэнергетического излучения с кремнием.

**Ключевые слова:** излучение, легирующие примеси, концентрация.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Применение высокоэнергетических излучений для локального легирования кремния заключается в возможности модифицировать тонкие поверхностные слои без изменения свойств объема (матрицы), нагревать и даже плавить локальные участки, формировать различные метастабильные состояния.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известно, что наличие значительных концентраций неконтролируемых примесей в кремнии (кислород, углерод и др.) приводит к состоянию, когда влияние легирующей примеси в образовании стабильных радиационных дефектов трудно определить [1].

### ЦЕЛЬ СТАТЬИ

Экспериментальное исследование механизмов взаимодействия высокоэнергетического излучения с кремнием, чтобы выбором его оптимальных параметров снизить или вообще исключить структурные несовершенства, влияющие на работу создаваемых приборов.

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как правило, кристаллы с концентрациями легирующих примесей  $10^{13} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$  содержат  $10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-3}$  кислорода, углерода и др. Последние могут являться эффективными стоками для первичных дефектов. С ростом уровня легирования кристаллов взаимодействие первичных радиационных дефектов с неконтролируемыми примесями может существенно изменяться как с точки зрения образования стабильных радиационных нарушений, так и рекомбинации первичных дефектов на неконтролируемых примесях. К тому же механизмы взаимодействия первичных дефектов с легирующими примесями могут существенно проявляться лишь при больших концентрациях последних.

При концентрациях легирующей примеси, больших  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , наблюдается падение активности введения дефектов с уровнями  $E_c - 0,17, E_c - 0,24, E_\nu + 0,34, E_\nu + 0,21 \text{ эВ}$ , что хорошо видно из табл. 1 и рис. 1.

Авторами подтверждено экспериментально, что по мере увеличения уровня легирования кристаллов значительно возрастает начальная скорость удаления носителей  $\delta_n, \delta_p$ .

Как видно из рис. 2, при концентрациях носителей  $n_0, p_0 \leq 10^{15} \text{ см}^{-3}$   $\delta_n$  и  $\delta_p$  определяются введением указанных центров. При концентрациях носителей, существенно больших  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ , введение рациональных дефектов не определяет скорость удаления носителей.

Рост скорости удаления носителей с увеличением концентрации легирующих примесей не определяется изменением зарядового состояния первичных радиационных дефектов с  $E = E_\nu + 0,05 \text{ эВ}$ .

При концентрации носителей больше  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  в кремнии процессы аннигиляции первичных нарушений не определяются температурой облучения, т.к. они не зависят от  $T_{\text{обл}}$  в области  $78 \div 300 \text{ К}$ .

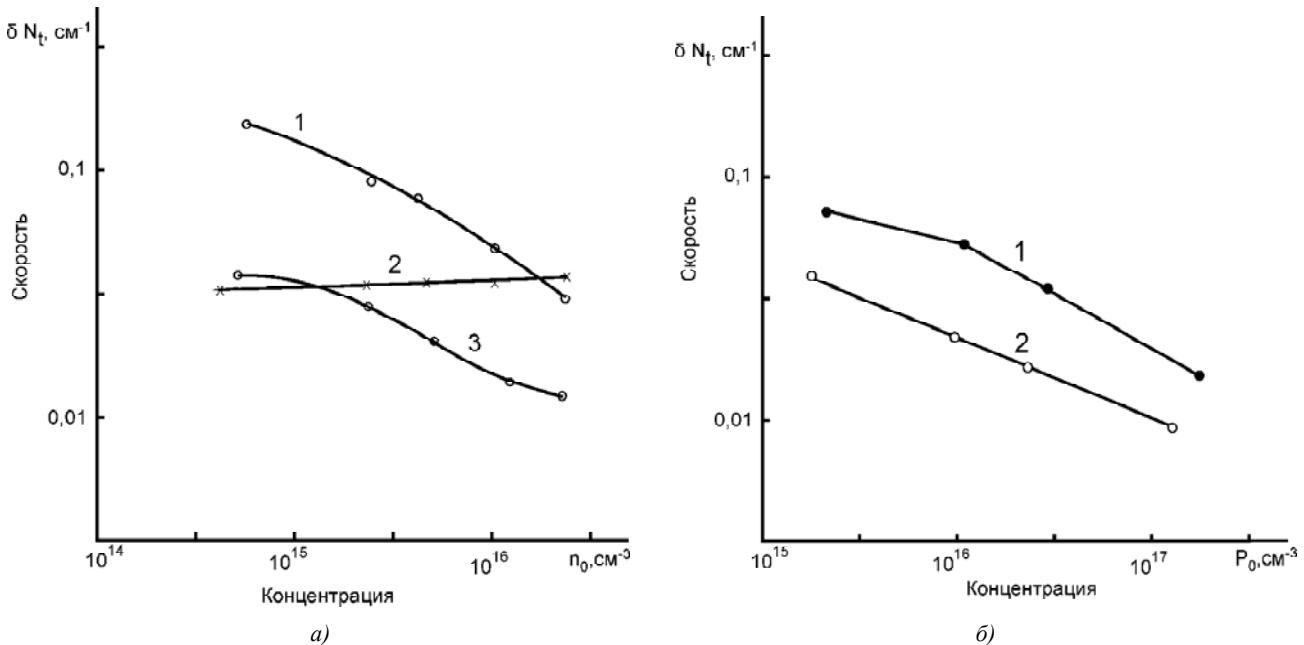
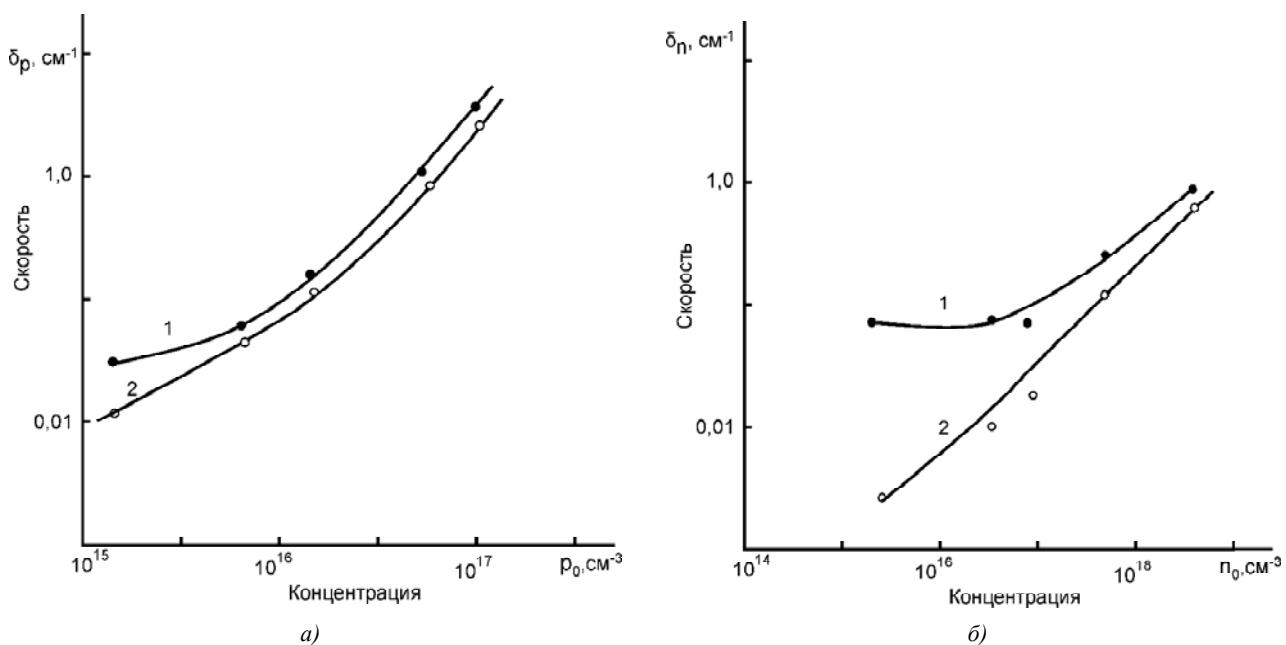
Анализ сведений о природе радиационных дефектов [2–6] показывает, что в состав радиационных дефектов входят вакансии. При сравнении концентрированных зависимостей скорости удаления носителей и введения радиационных нарушений (рис. 1, 2) экспериментально установлено, что уменьшение потока вакансий на образование дефектов с указанными уровнями не определяет рост скорости удаления носителей при  $n_0, p_0 > 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Авторы отмечают, что компенсация высоколегированного кремния обусловлена введением нового типа радиационных дефектов с глубоким уровнем. Причём зависимости скорости удаления носителей от концентрации легирующей примеси при  $n_0, p_0 > 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  или положение уровня Ферми, измеренное при 78 К, дают рост эффективности введения новых компенсирующих центров от уровня легирования кристаллов.

С ростом концентрации легирующих примесей наряду с взаимодействием первичных радиационных нарушений с неконтролируемыми примесями начинает конкурировать процесс захвата первичных дефектов атомами легирующей примеси. Возможность такого захвата может быть обусловлена наличием зарядов у взаимодействующих компонентов. Междоузельные атомы в *n*- и *p*-кремни выступают как акцепторы и доноры, соот-

Таблица 1. Енергетический спектр и сечения захвата основных носителей  $n$ - и  $p$ -высоколегированном кремни

Материал базы	$E_C(v) \pm E$ эВ	$\delta_{n(p)} \cdot 10^2$ см $^2$
$n$ -кремний	$E_C - 0,17$	4,3
	$E_C - 0,24$	3,6
	$E_C - 0,41$	—
$p$ -кремний	$E_V + 0,21$	1,8
	$E_V + 0,34$	1,1

Рис. 1. Зависимость скорости введения дефектов в  $n$ -кремни (a) и  $p$ -кремни (b) от концентрации носителей при облучении электронами ( $E_0 = 7$  МэВ,  $T_{\text{обл.}} = 300$ К):a) 1 –  $E_C - 0,17$  эВ; 2 –  $E_C - 0,41$  эВ; 3 –  $E_C - 0,24$  эВ б) 1 –  $E_V + 0,34$  эВ; 2 –  $E_V + 0,21$  эВРис. 2. Экспериментальная зависимость начальной скорости удаления носителей в  $p$ -кремни (a) и  $n$ -кремни (b) от концентрации носителей при облучении электронами ( $E_0 = 7$  МэВ,  $T_{\text{обл.}} = 300$ К)  $T_{\text{изм.}}$ : 1 – 78К; 2 – 300К

ветственno. Если участники реакции обладают зарядами, то радиус взаимодействия, определяемый электростатическим потенциалом, составляет  $r_{\text{EH}} \approx 50 \text{ \AA}$ .

В этом случае с ростом уровня легирования кристаллов возрастает вероятность захвата подвижного междуузельного атома заряженным атомом легирующей примеси. В тоже время сходство концентрационных зависимостей скоростей удаления носителей в *n*- и *p*-кремни дает возможность предположить, что вакансии в *p*-кремнии в условиях облучения подвижны при 78 К. В таком случае, при отсутствии аннигиляции первичных радиационных дефектов при  $n_0, p_0 > 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и уменьшении скорости введения дефектов вакансационного типа, возможно образование комплексов (примесный атом-междоузлие) + вакансия. Первоначальным актом, в силу большей подвижности междуузельных атомов, является их взаимодействие с примесью, с последующим захватом вакансии.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, дефектообразование в высоколегированном кремнии характеризуется следующим:

- аннигиляция первичных радиационных дефектов практически отсутствует при  $n_0, p_0 < 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и  $T \leq 300 \text{ K}$ ;
- введение известных вакансационных комплексов не определяет скорость удаления носителей при концентрациях  $n_0, p_0 >> 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;
- компенсация кремния при больших концентрациях легирующих примесей обусловлена введением комплексов: легирующая примесь-междоузлие, либо (легирующая примесь-междоузлие)+вакансия, дающих глубокие уровни в запрещенной зоне ( $E_i > 1/2 E$ );
- совершенствование способов локального легирования с целью снижения структурных несовершенств высоколегированного кремния позволит разрабатывать полупроводниковые приборы без ущерба для их структурных и электрофизических характеристик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Емцев, В. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках / В. В. Емцев, Т. В. Машовец ; под ред. профессора С. М. Рывкина. – М. : Радио и связь, 1981. – 248 с.
2. Щербачев, К. Д. Особенности образования радиационных дефектов в слое кремния структур «кремний на изоляторе» / К. Д. Щербачев, В. Т. Бублик, В. Н. Мордкович // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Т. 45, вып. 6. – С. 754–758.
3. Вавилов, В. С. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах / В. С. Вавилов, Н. А. Ухин. – М. : Атомиздат, 1969. – 312 с.
4. Томпсон, М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах, пер. с англ. / М. Томпсон. – М. : Мир, 1971. – 368 с.
5. Пагава, Т. А. Два канала отжига дивакансий в облученных кристаллах кремния *n*-типа. / Т. А. Пагава, Н. Т. Бжалава, Н. И. Майсурадзе [та ін.] // Український фізичний журнал. – 2010. – Т. 55, № 11. – С. 1195–1200.
6. Стась, В. Ф. Термоакцепторы в облученном кремнии / В. Ф. Стась, И. В. Антонова, Е. П. Неустроев [и др.] // Физика и техника полупроводников. – 2000. – Т. 34, вып. 2. – С. 162–167.

Стаття надійшла до редакції 29.06.2011.  
Після доробки 16.11.2011.

Ніконов А. Ю., Небеснюк О. Ю., Шмалій С. Л., Ніконова З. А.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ В ВИСОКОЛЕГОВАНОМУ КРЕМНІЇ ПРИ ОПРОМИНЕННІ

У статті наведені результати експериментального дослідження механізмів взаємодії високогенергетичного випромінювання з кремнієм.

**Ключові слова:** випромінювання, легуючі домішки, концентрація.

Nikonov A. Y., Nebesnjuk O. J., Shmaly S. L., Nikonova Z. A.  
RESEARCH OF FEATURES THE FORMATION OF DEFECTS IN HIGHLY ALLOYING SILICON DURING IRRADIATED

In the article the results of experimental research mechanisms interaction high-energy radiation on silicon.

**Key words:** radiation, doping impurity, concentration.

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

## РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОММУНИКАЦІИ

### RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.372.852.001.11

Петрова Е. В.<sup>1</sup>, Фурманова Н. И.<sup>2</sup>, Фарафонов А. Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Магістр Запорізького національного технічного університета

<sup>2</sup>Асистент, аспірант Запорізького національного технічного університета

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університета

#### РАЗРАБОТКА УПРОЩЕННОГО АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ППФ НА ШПИЛЕЧНЫХ РЕЗОНАТОРАХ С ОТВЕРСТИЯМИ В ЭКРАНИРУЮЩЕМ СЛОЕ НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА В ПРОГРАММЕ ANSOFT HFSS

Проведен анализ микрополосковых полоснопропускающих фильтров (ППФ) на шпилечных резонаторах меандровой формы со щелью в экранирующем слое. Проведены расчеты геометрических параметров ППФ на шпилечных резонаторах на основе фильтров-прототипов низких частот. Построена модель шпилечного ППФ с отверстиями в экранирующем слое и проведена ее оптимизация. В ходе исследования разработан упрощенный алгоритм проектирования конструкции данного типа фильтров.

**Ключевые слова:** полоснопропускающий фильтр, связанная линия, щель в экранирующем слое, шпилечные резонаторы, центральная частота.

Развитие систем радиолокации, радионавигации и телекоммуникаций требует создания сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств в короткие сроки и с постоянным увеличением требований к их характеристикам. В данных устройствах часто используются традиционные фильтры на параллельных связанных микрополосковых линиях, которые имеют ряд недостатков. Данные фильтры имеют паразитную полосу пропускания на частоте  $2f_0$  и из-за больших габаритных размеров конструкции фильтра становится невозможным рациональное использование площади подложки. В случаях, когда имеются ограничения по размерам фильтра, целесообразнее использовать конструкцию фильтров на шпилечных резонаторах. Существует множество конструкций шпилечных фильтров.

Современными исследователями были предложены следующие конструкции фильтров, позволяющие получить желательные характеристики фильтра: повышенную селективность фильтра на шпилечных резонаторах с помощью введения дополнительной емкостной связи [1]; широкую полосу пропускания (до 1 ГГц) с помощью из-

менения угла наклона между плечами звеньев классического фильтра на шпилечных резонаторах на  $75^\circ$  [2]; миниатюризацию телекоммуникационных устройств приема-передачи и создание изоляции между соседними проводниками фильтров посредством использования многослойной конструкции микрополосковых шпилечных фильтров [3]; уменьшение габаритных размеров фильтра и увеличение ширины микрополосковых линий в конструкции микрополоскового узкополосного шпилечного фильтра с использованием заземления в виде сквозных отверстий [4]. В работе [5] приведено сравнение фильтров на основе шпилечных резонаторов с перекрестными связями в виде каскада из четырех элементов. Рассмотренные фильтры имеют одну или две щели в экранирующем слое с различными видами связей между звеньями шпильки. В работе [6] был исследован микрополосковый фильтр на шпилечных резонаторах, а в статье [7] предлагается конструкция микрополоскового фильтра на связанных линиях с отверстиями в экранирующем слое.

В данной работе предлагается новая конструкция микрополоскового шпилечного фильтра с отверстиями в экранирующем слое. Данный тип конструкции фильтра имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными шпилечными фильтрами. Во-первых, отверстие в экранирующем слое способствует подавлению паразитной полосы пропускания и увеличению затухания в полосе заграждения, а также увеличению ширины полосы пропускания. Во-вторых, такая конструкция позволяет установить скоростное соответствие мод. В-третьих, использование шпилечных фильтров с отверстиями в экранирующем слое позволяет усилить электрическую связь между соседними резонаторами. В-четвертых, увеличивается ширина микрополосковых линий и расстояние между ними, что упрощает технологию изготовления и снижает требования к допускам. Основной проблемой при проектировании фильтров с отверстием в экранирующем слое является то, что не существует алгоритма пересчета его из традиционного фильтра.

Целью данной работы является создание упрощенного алгоритма для проектирования конструкции микрополосковых фильтров на шпилечных резонаторах со щелью в экранирующем слое на основе электромагнитного анализа фильтра, проведенного в системе Ansoft High Frequency Structure Simulator (HFSS).

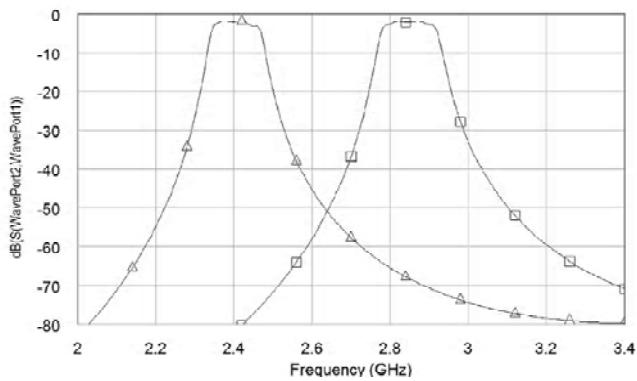
## 1. РАСЧЕТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В данной работе для расчета параметров полоснопропускающего фильтра на шпилечных резонаторах используется метод проектирования фильтров на связанных линиях на основе фильтров-прототипов нижних частот по методикам, предложенным в [8, 9, 10].

Геометрические параметры шпилечного ППФ, полученные на основе расчета фильтра-прототипа нижних частот, представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Геометрические параметры ППФ на шпилечных резонаторах

Параметры	Номер связанной линии		
	1 и 5	2 и 4	3
Ширина участка связанных линий $W_i$ , мм	0,4	0,49	0,5
Расстояние между участками связанных линий $S_i$ , мм	0,3	0,89	0,97
Длина участка связанных линий, $L_i$ , мм	10,33	10,23	10,22



**Рис. 1.** АЧХ микрополоскового ППФ на шпилечных резонаторах:

— АЧХ схемы с исходными размерами; — АЧХ модифицированной схемы

Фильтр реализуется на подложке из поликора марки ВК-100 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon=9,6$ , толщиной  $h=0,5$  мм и слоем металлизации толщиной  $t=5$  мкм. Данный фильтр предназначен для работы на центральной частоте 2,85 ГГц, ширина полосы пропускания 122 МГц.

Для получения амплитудно-частотной характеристики микрополоскового ППФ на шпилечных резонаторах была спроектирована электрическая схема фильтра с помощью группы схемотехнических модулей Schematics в системе Microwave Office от Applied Wave Research (AWR MWO). Из полученной АЧХ (рис. 1) видно, что центральная частота смешена по сравнению с центральной частотой исходной структуры, предложенной в [6], на 440 МГц и составляет 2,41 ГГц. Для смещения центральной частоты до необходимого значения была уменьшена длина участка связанных линий до 8,33 мм с помощью функции Tune системы AWR MWO.

Перерасчет геометрических размеров топологии традиционного микрополоскового шпилечного ППФ для конструкции с отверстиями в экранирующем слое был проведен с помощью программы MaxFCT, которая является собственной разработкой кафедры КТПР Запорожского национального технического университета. Данная программа базируется на квазистатическом анализе поперечного сечения микрополосковой топологии и генетическом алгоритме поиска решений. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Параметры микрополоскового шпилечного ППФ с отверстиями в экранирующем слое

Параметры	Номер связанной линии		
	1 и 5	2 и 4	3
Волновое сопротивление парных полуволн $Z_{oe}$ , Ом	67,31	52,65	51,46
Волновое сопротивление непарных полуволн $Z_{oo}$ , Ом	40,87	44,10	43,54
Ширина участка связанных линий $W_i$ , мм	0,608	0,793	0,806
Расстояние между участками связанных линий $S_1$ , мм	0,410	1,810	1,818
Ширина отверстия в экранирующем слое $S_2$ , мм	1,17	2,52	2,40

Для проведення електромагнітного аналізу, була построєна модель микрополоскового шпилечного ППФ с отверстиями в экранирующем слое, с использованием системы Ansoft HFSS (рис. 2). Длина щелей в экранирующем слое равна длине участков связанных линий.

Из полученной АЧХ (рис. 3) видно, что введение щели в экранирующий слой привело к изменению центральной частоты полосы пропускания, которая составляет 2,967 ГГц, поэтому необходимо провести ее корректировку.

Для получения необходимого значения центральной частоты, была проведена оптимизация конструкции данного фільтра с использованием метода генетического алгоритма, с помощью программы Optimetrics, которая

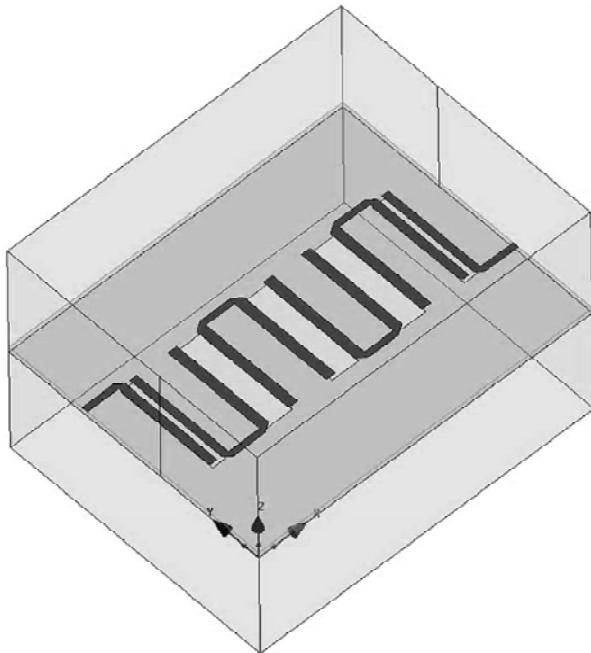


Рис. 2. Модель микрополоскового шпилечного фільтра с отверстиями в экранирующем слое

входить в состав системи HFSS. В данной работе переменной для оптимизации была выбрана длина участков связанных линий и длина отверстий в экранирующем слое  $L$ .

Установление изменяемой переменной осуществлялось путем замены значения длины участков связанных линий и длины отверстий в экранирующем слое на  $L$ . Для того, чтобы уменьшить диапазон принимаемых значений переменной  $L$ , и, тем самым, сократить время проведения процесса оптимизации, предварительно был проведен параметрический анализ. Также, для решения параметрических задач была создана целевая функция, которая описывает расположение частотных точек при построении АЧХ. После проведения параметрического анализа был запущен процесс оптимизации. Из полученного графика значений целевой функции относительно номера итерации было получено оптимальное значение длины участков связанных линий и щелей в экранирующем слое. Минимальному значению целевой функции соответствовало оптимальное значение  $L = 8,83$  мм, которое было получено на второй итерации из проведенных шестидесяти шести. Исходя из полученных результатов оптимизации, была перестроена модель исследуемого фільтра (изменена длина участков связанных линий) и проведен пересчет частотной характеристики (рис. 4).

Из полученной АЧХ видно, что центральная частота составила 2,85 ГГц, что соответствует исходным данным. Также видно, что при введении щели в экранирующий слой увеличилась ширина полосы пропускания исследуемого фільтра, которая составляет 160 МГц.

## 2. РЕЗУЛЬТАТИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для упрощения проектирования микрополосковых ППФ на шпилечных резонаторах с отверстиями в экранирующем слое, которые базируются на основе традиционных микрополосковых фільтров, предложен следующий алгоритм:

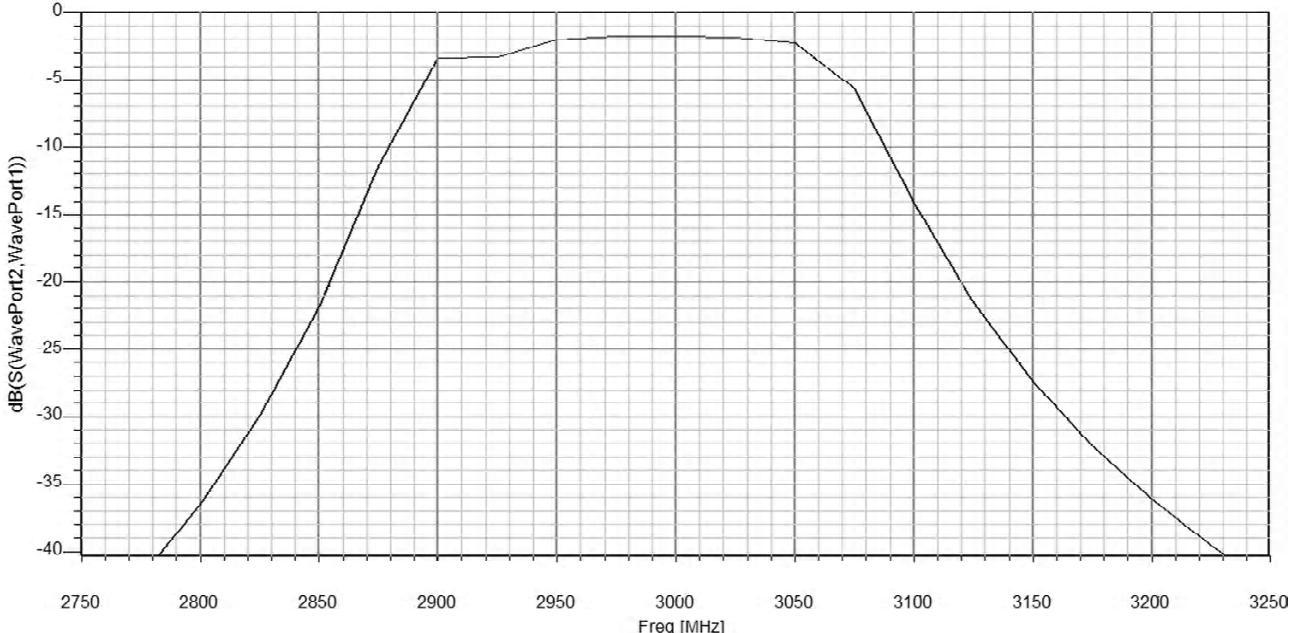
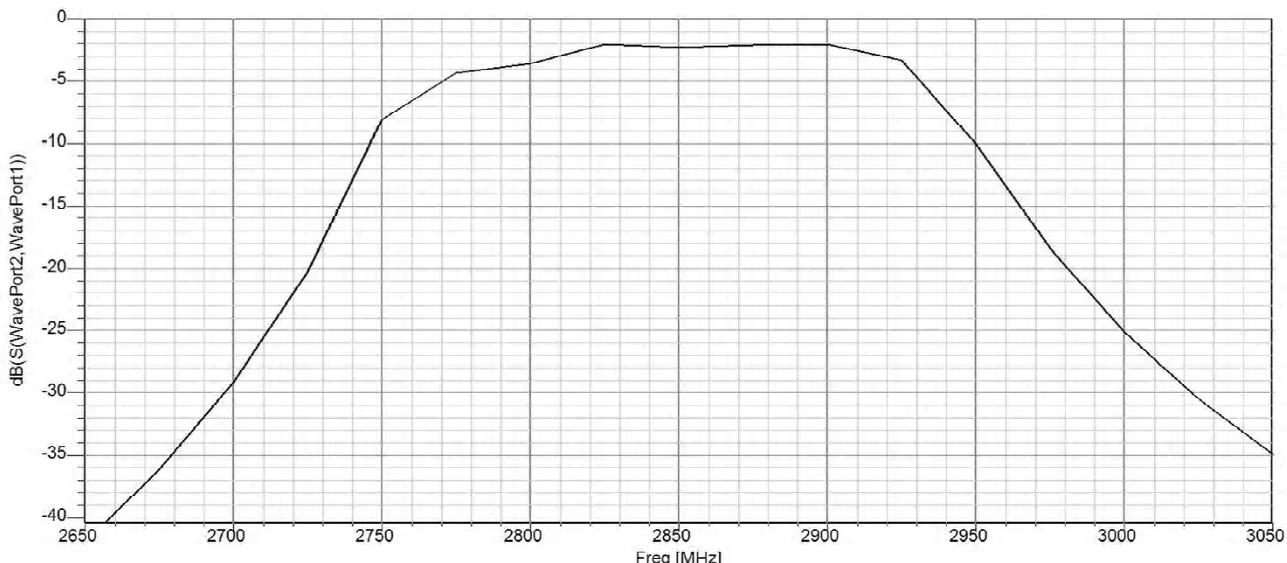


Рис. 3. АЧХ микрополоскового шпилечного фільтра с отверстиями в экранирующем слое



**Рис. 4.** АЧХ оптимизированного микрополоскового шпилечного фильтра с отверстиями в экранирующем слое

1. Расчет геометрических размеров топологии фильтров на связанных полуволновых резонаторах на основе фильтров-прототипов нижних частот по методикам, предложенным в [8, 9, 10].

2. Построение электрической схемы микрополоскового шпилечного фильтра с помощью группы схемотехнических модулей Schematics системы AWR MWO. Получение АЧХ микрополоскового шпилечного фильтра. Изменение длины связанных линий для смещения центральной частоты с помощью функции Tune системы AWR MWO.

3. Проведение расчетов геометрических размеров поперечного сечения топологии микрополоскового ППФ на шпилечных резонаторах с отверстиями в экранирующем слое с помощью программы MaxFCT.

4. Построение и электромагнитный анализ конструкции шпилечного ППФ с отверстиями в экранирующем слое в системе HFSS на основе результатов расчетов в программе AWR MWO (длина участка связанных линий) и программы MaxFCT (ширина микрополосковых линий, расстояние между ними и ширина отверстий в экранирующем слое).

5. Проведение оптимизации конструкции микрополоскового ППФ на шпилечных резонаторах с отверстиями в экранирующем слое с помощью программы Optimetrics в системе HFSS для получения необходимой АЧХ.

6. Построение микрополоскового шпилечного фильтра с отверстиями в экранирующем слое, проверка результатов.

Целью дальнейших исследований является исследование микрополосковых ППФ на шпилечных резонаторах с варьирующимися углами наклона плечей шпилечных резонаторов [2] с щелями в экранирующем слое.

## ВЫВОДЫ

Проведены расчеты геометрических параметров топологии микрополоскового шпилечного ППФ со щелью

в экранирующем слое. По полученным результатам спроектирована конструкция данного фильтра. Проведена оптимизация длины участков связанных линий и щелей в экранирующем слое. В ходе работы был создан упрощенный алгоритм для проектирования конструкции микрополосковых фильтров на шпилечных резонаторах со щелью в экранирующем слое, на основе электромагнитного анализа фильтра.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаев, М. Компактные микрополосковые фильтры с повышенной селективностью / М. Николаев // Современная электроника. – 2008. – № 1. – С. 28–30.
2. Lotfi Neyestanak, A. A., Enhanced Wide Band Microstrip Hairpin Filter / A. A. Lotfi Neyestanak // Journal of Mobile Communication. – 2009. – Vol. 3, № 3. – P. 59–61.
3. Sulaiman, A. Simple Multilayer Hairpin Bandpass Filter / A. Sulaiman, H. Mokhtar, H. Jusoh, H. Baba, A. Awang, F. Ain // European Journal of Scientific Research. – 2010. – Vol. 42, № 4. – P. 604–613.
4. Hasan, A. Novel Microstrip Hairpinline Narrowband Bandpass Filter Using Via Ground Holes / A. Hasan, A. E. Nadeem // Progress In Electromagnetics Research. – 2008. – № 78. – P. 393–419.
5. Militaru, N. Enhanced Couplings in Broadband Planar Filters with Defected Ground Structures / N. Militaru, M. G. Banciu, G. Lojewski // Romanian Journal of Information. – 2007. – Vol. 10, № 2. – P. 199–212.
6. Гипсман, А. И. Современные методы и результаты квазистатического анализа полосковых линий и устройств / А. И. Гипсман, В. М. Красноперкин, Г. С. Самохин, Р. А. Силин // Обзоры по электронной технике. Серия 1. Электроника СВЧ. Выпуск 1 (1602) – М. : ЦНИИ «Электроника», 1991. – 94 с.
7. Velazquez-Ahumada, M.-C. Parallel coupled microstrip filters with ground-plane aperture for spurious band suppression and enhanced coupling / M.-C. Velazquez-Ahumada, J. Martel, F. Medina // IEEE trans. on microwave theory and techniques. – 2004. – Vol. 52, № 3. – P. 1082 – 1086.
8. Маттей, Д. Л. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи, т. I / Д. Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс : пер с

- англ. ; под общ. ред. Л. В. Алексеева и Ф. В. Кушнира. – М. : Связь, 1971. – 440 с.
9. Малорацкий, Л. Г. Проектирование и расчет СВЧ элементов на полосковых линиях / Л. Г. Малорацкий, Л. Р. Явич. – М. : Сов. радио, 1972. – 232 с.
  10. Синтез микрополосковых полосовых фильтров на связанных линиях с отверстиями в экране / А. Ю. Фарафонов, А. Ю. Воропай, Л. М. Карпуков [та ін.] // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2009. – № 1 (20). – С. 41–44.

Стаття надійшла до редакції 19.01.2012.  
Після доробки 26.01.2012.

Петрова К. В., Фурманова Н. І., Фарафонов О. Ю.

РОЗРОБКА СПРОЩЕНОГО АЛГОРИТМУ ПРОЕКТУВАННЯ МІКРОСМУЖКОВИХ СПФ НА ШПИЛЬКОВИХ РЕЗОНАТОРАХ З ОТВОРАМИ В ЕКРАНУЮЧОМУ ШАРІ НА ОСНОВІ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОГО АНАЛІЗУ В ПРОГРАМІ ANSOFT HFSS

Проведений аналіз мікросмужкових смугопропускаючих фільтрів (СПФ) на шпилькових резонаторах меандрової форми зі щілиною в екрануючому шарі. Проведено розрахунки геометричних параметрів СПФ на шпилькових резонаторах на основі фільтрів-прототипів низьких частот. Побудована модель

шпилькового СПФ з отворами в екрануючому шарі та проведена її оптимізація. В ході дослідження розроблений спрощений алгоритм проектування конструкції даного типу фільтрів.

**Ключові слова:** смугопропускаючий фільтр, зв'язана лінія, щілина в екрануючому шарі, шпилькові резонатори, центральна частота.

Petrova K. V., Furmanova N. I., Farafonov A. Y.

DEVELOPMENT OF SIMPLIFIED ALGORITHM FOR THE DESIGN OF MICROSTRIP BAND-PASS ON HAIRPIN RESONATORS FILTERS WITH SLOTS IN THE GROUND PLANE ON THE ELECTRODYNAMICS ANALYSIS IN ANSOFT HFSS

Analysis of microstrip band-pass filters hairpin resonators meander shape with slots in the ground plane is presented. The calculations of the geometric parameters of the band-pass on hairpin resonator filters on the basis of prototype filters of reduce frequencies are presented. A model of the band-pass on hairpin resonator filters with slots in the ground plane has been designed and was used optimization. In research a simplified algorithm for the design process of this type of filters is proposed.

**Key words:** pass-band filter, coupled line, slots in the ground plane, hairpin resonators, center frequency.

# МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 62-55:681.515

Гостев В. И.

Д-р техн. наук, заведующий кафедрой Государственного университета информационно-коммуникационных технологий  
г. Киев

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРЕХРЕЖИМНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМ АКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДЬЮ В TCP/IP СЕТЯХ

Изложены вопросы проектирования трехрежимного нечеткого регулятора при идентичных треугольных функциях принадлежности с тремя термами для систем активного управления очередью в TCP/IP сетях и представлена принципиальная схема регулятора в системе MATLAB.

**Ключевые слова:** проектирование, нечеткий регулятор, функции принадлежности, активное управление очередью, TCP/IP сеть, MATLAB.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы непредсказуемый рост Интернета все более и более указывает на проблему борьбы с перегрузками. Явление перегрузок сети происходит, когда количество данных, введенных в сеть, больше чем количество данных, которые доставляются по назначению. Широко используется активное управление очередью пакетов. При пакетной передаче источники данных должны уменьшать скорость передачи при наличии потери пакетов. Для эффективной борьбы с перегрузками предложены фаззи-регуляторы (регуляторы, работающие на базе нечеткой логики) активного управления очередью. Проектирование таких регуляторов является сложным из-за эвристически вовлеченных в управление правил и функций принадлежности, отсутствия автоматических методов проектирования нечеткой базы знаний и настройки параметров регулятора. Поэтому параметры нечеткой системы управления обычно настраиваются посредством проб и ошибок с использованием эвристических методов и моделирования. Особые сложности возникают из-за широкого диапазона эксплуатационных условий, например, числа соединений, емкости связей, задержек распространения. При синтезе нечетких регуляторов наиболее часто используются треугольные функции принадлежности (ФП) для лингвистических величин. При расчете управляющих воздействий на выходе

нечеткого регулятора абсциссу «центра тяжести результирующей фигуры» определяют обычно приближенным методом численного интегрирования. В работах [1–8] по системам активного управления очередью с применением нечетких регуляторов не приводятся сведения по проектированию регуляторов, а в работе [1] изложены неправильные результаты выполнения и настройки регуляторов, хотя в этих работах отмечается, что нечеткий регулятор является одной из главных составляющих таких систем. В предлагаемой ниже работе на основе нового метода проектирования нечетких регуляторов, изложенного в работах [9–11], получены строгие аналитические выражения для управляющих воздействий на выходе трехрежимного нечеткого регулятора при идентичных треугольных функциях принадлежности с тремя термами. В качестве входных воздействий на регулятор, кроме ошибки системы, рассматриваются первая и вторая производные ошибки. Представлена принципиальная схема нечеткого регулятора и изложены вопросы настройки регулятора с проверкой правильности его работы.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

В данной работе рассмотрим нечеткий регулятор, структурную схему которого в интерактивной системе MATLAB можно представить в виде последовательного соединения трех блоков (см. рис. 1): **формирователя ве-**

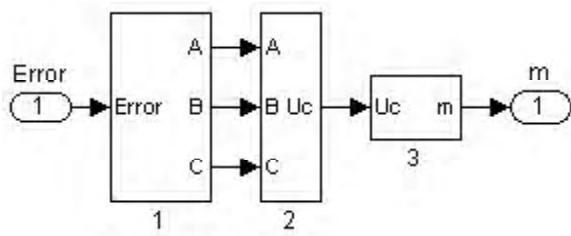


Рис. 1.

личин  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$  (блок 1), **блока сравнения величин**  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$  и **расчета**  $u_c$  (блок 2) и **блока нормировки** выходной переменной (блок 3) [10]. На вход регулятора поступают ошибка системы  $\theta$ , скорость изменения (первая производная) ошибки  $\dot{\theta}$ , ускорение (вторая производная) ошибки  $\ddot{\theta}$ ,  $m$  – выходная величина регулятора.

Блоки оценки первой (1-st drv) и второй (2-nd drv) производных от ошибки реализуют уравнения:

$$\begin{aligned}\dot{\theta}(t) &\approx \{\theta(kh) - \theta[(k-1)h]\} / h, \\ \ddot{\theta}(t) &\approx \{\dot{\theta}(kh) - \dot{\theta}[(k-1)h]\} / h,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $h$  – шаг квантования (шаг поступления информации на вход регулятора).

На универсальном множестве  $U = [-1, 1]$  заданы три нечетких подмножества, ФП которых для каждой лингвистической величины определяются по формулам:

$$\begin{aligned}\mu_1(u) &= \begin{cases} 1, & -1 \leq u \leq -a; \\ (a-u)/(2a), & -a \leq u \leq a; \\ 0, & a \leq u \leq 1; \end{cases} \\ \mu_2(u) &= \begin{cases} 0, & -1 \leq u \leq -a; \\ (a+u)/(2a), & -a \leq u \leq a; \\ 1, & a \leq u \leq 1; \end{cases} \\ \mu_3(u) &= \begin{cases} (a+u)/a, & -a \leq u \leq 0; \\ (a-u)/a, & 0 \leq u \leq a. \end{cases}\end{aligned}\quad (2)$$

При поступлении на нечеткий регулятор в какой-то момент времени значений входных переменных,  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$  и  $\ddot{\theta}^*$  с шагом квантования  $h$  осуществляется пересчет входных переменных в переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  на универсальное множество  $U = [-1, 1]$ . Пересчет фиксированного значения любой переменной  $x^* \in [x_{\min}, x_{\max}]$  в соответствующий элемент  $u^* \in [-1, 1]$  единого универсального множества (см. рис. 2) при фаззификации и дефаззификации определяется пропорцией:

$$(x_{\max} - x_{\min}) / 2 = (x^* - x_{\min}) / (u^* + 1),$$

откуда

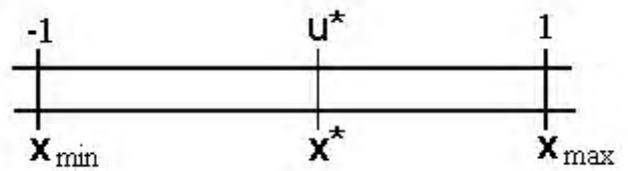


Рис. 2.

$$\left. \begin{aligned} u^* &= 2(x^* - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) - 1 \\ x^* &= (x_{\max} - x_{\min})(u^* + 1) / 2 + x_{\min} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Затем производится расчет значений ФП для этих переменных (см. рис. 3).

Точками на универсальном множестве отмечены возможные для какого-то момента времени значения переменных  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$ . Для упрощения нормировки (пересчета значений сигналов в значения элементов единого универсального множества) диапазоны изменения входных и выходного сигналов (параметров нечеткого регулятора) принимаем симметричными:

$$\begin{aligned}A_m &= \theta_{\max} = -\theta_{\min}; \quad B_m = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}; \\ C_m &= \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}; \quad D_m = m_{\max} = -m_{\min}.\end{aligned}$$

Тогда формулы для нормировки (пересчета) принимают вид:

$$\begin{aligned}u_1^* &= (\theta^* + A_m) / A_m - 1; \\ u_2^* &= (\dot{\theta}^* + B_m) / B_m - 1; \\ u_3^* &= (\ddot{\theta}^* + C_m) / C_m - 1.\end{aligned}\quad (4)$$

Лингвистическое правило управления нечеткого регулятора:

$$\begin{aligned}&\text{если } (\theta^* = a_1^j) \text{ и } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ и } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \text{ то} \\ &(m^* = a_c^j), j = \overline{1, 3},\end{aligned}\quad (5)$$

где  $a_1^j$ ,  $a_2^j$  и  $a_3^j$  – лингвистические оценки ошибки, первой производной ошибки и второй производной ошибки, рассматриваемые как нечеткие терм-множества, определенные на универсальном множестве,  $j = \overline{1, 3}$ ;  $a_c^j$  – лингвистические оценки управляющего воздействия на объект, выбираемые из терм-множества переменной  $m$ . Лингвистические оценки выбираются из терм-множеств лингвистических переменных  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$  и  $\ddot{\theta}^*$  и  $m^*$ :

$$\begin{aligned}a_i^j &\in \{\text{отрицательная (1), положительная (2),} \\ &\text{близкая к нулю – нулевая (3)}.\end{aligned}$$

Другими словами, все сигналы (определенные выше лингвистические переменные) характеризуются как отрицательные ( $j=1$ ), положительные ( $j=2$ ) или близкие к нулю ( $j=3$ ).

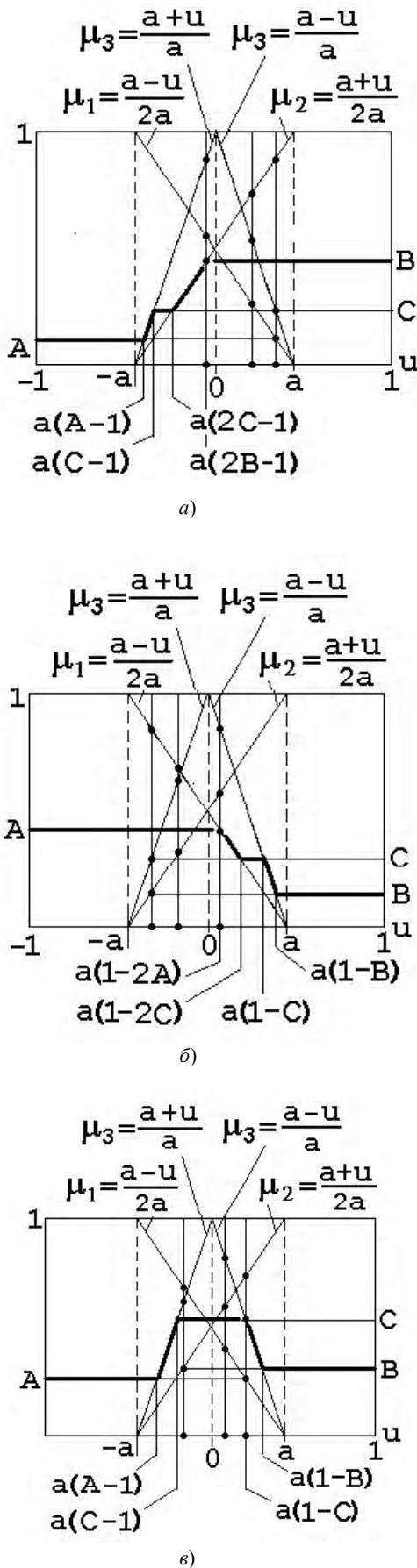


Рис. 3.

Функція принадлежності управлюючого впливу нечіткому множству «отрицальна» определяється з системи нечітких логіческих рівнянь:

$$\mu_{1c}(u) = \mu_1(u_1) \wedge \mu_1(u_2) \wedge \mu_1(u_3). \quad (6)$$

Функція принадлежності управлюючого впливу нечіткому множству «позитивна» определяється з системи нечітких логіческих рівнянь:

$$\mu_{2c}(u) = \mu_2(u_1) \wedge \mu_2(u_2) \wedge \mu_2(u_3). \quad (7)$$

Функція принадлежності управлюючого впливу нечіткому множству «близька до нуля» определяється з системи нечітких логіческих рівнянь:

$$\mu_{3c}(u) = \mu_3(u_1) \wedge \mu_3(u_2) \wedge \mu_3(u_3). \quad (8)$$

Результатуюча функція принадлежності для управлюючого впливу в залежності від робочих правил НР записується в такому вигляді:

$$\mu_c(u) = \mu_{1c}(u) \vee \mu_{2c}(u) \vee \mu_{3c}(u). \quad (9)$$

В виразах (6)–(9)  $\wedge$  – логічне «і»,  $\vee$  – логічне «іли».

В залежності від лінгвістичних правил управління функція принадлежності управлюючого впливу  $\mu_{1c}(u)$  нечіткому множству «отрицальна» обмежена зверху значенням:

$$A = \min[\mu_1(u_1^*), \mu_1(u_2^*), \mu_1(u_3^*)], \quad (10)$$

функція принадлежності управлюючого впливу  $\mu_{2c}(u)$  нечіткому множству «позитивна» обмежена зверху значенням:

$$B = \min[\mu_2(u_1^*), \mu_2(u_2^*), \mu_2(u_3^*)], \quad (11)$$

функція принадлежності управлюючого впливу  $\mu_{3c}(u)$  нечіткому множству «близька до нуля» обмежена зверху значенням:

$$C = \min[\mu_3(u_1^*), \mu_3(u_2^*), \mu_3(u_3^*)]. \quad (12)$$

Результатуюча функція принадлежності для управлюючого впливу на основі виразу (9) отримується путем формування максимуму:

$$\mu_c(u) = \max[\mu_{1c}(u), \mu_{2c}(u), \mu_{3c}(u)]. \quad (13)$$

Для визначення конкретного значення управлюючого впливу  $m^*$  формується «результатуюча фігура», обмежена результатуючою ФП, і проводиться пошук абсцисси «центру тяжести результатуючої фігури»  $u_c$ .

Замітимо дуже важливий факт. Які значення не використовують змінні  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  на універсальному множстві  $U = [-1, 1]$ , залежно від відношень величин  $A$  та  $B$ , «результатуюча фігура» може приймати тільки три конфігурації: при  $A \leq C \leq B$  перша конфігурація показана на рис. 3, a; при

$A \geq C \geq B$  вторая конфигурация показана на рис. 3, б; при

$$\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$$

третья конфигурация показана на рис. 3, в.

Общая формула для определения абсциссы «центра тяжести результирующей фигуры» записывается в виде:

$$u_c = \frac{\int_{-1}^1 u \mu(u) du}{\int_{-1}^1 \mu(u) du}. \quad (14)$$

Абсцисса «центра тяжести результирующей фигуры» при  $A \leq C \leq B$  определяется по формуле:

$$u_c = \frac{A \int_{-1}^{a(A-1)} u du + \int_{a(A-1)}^{a(C-1)} \frac{a+u}{a} u du + C \int_{a(C-1)}^{a(2C-1)} u du + \int_{a(2C-1)}^{a(2B-1)} \frac{a+u}{2a} u du + B \int_{a(2B-1)}^1 u du}{A \int_{-1}^{a(A-1)} du + \int_{a(A-1)}^{a(C-1)} \frac{a+u}{a} du + C \int_{a(C-1)}^{a(2C-1)} du + \int_{a(2C-1)}^{a(2B-1)} \frac{a+u}{2a} du + B \int_{a(2B-1)}^1 du} \quad (15)$$

при  $A \leq C \leq B$ .

После несложных вычислений находим:

$$u_c = \frac{(a^2 - 1)(A - B)/2 + a^2 B^2 - a^2 (A^2 + C^2)/2 + a^2 (A^3 - 4B^3 + 3C^3)/6}{(1-a)A + (1+a)B - aB^2 + a(A^2 + C^2)/2} \quad (16)$$

при  $A \leq C \leq B$ .

Абсцисса «центра тяжести результирующей фигуры» при  $A \geq C \geq B$  определяется по формуле:

$$u_c = \frac{A \int_{-1}^{a(1-2A)} u du + \int_{a(1-2A)}^{a(1-2C)} \frac{a-u}{2a} u du + C \int_{a(1-2C)}^{a(1-C)} u du + \int_{a(1-C)}^{a(1-B)} \frac{a-u}{a} u du + B \int_{a(1-B)}^1 u du}{A \int_{-1}^{a(2A-1)} du + \int_{a(2A-1)}^{a(2C-1)} \frac{a+u}{2a} du + C \int_{a(2C-1)}^{a(1-C)} du + \int_{a(1-C)}^{a(1-B)} \frac{a+u}{a} du + B \int_{a(1-B)}^1 du} \quad (17)$$

при  $A \geq C \geq B$ .

После несложных вычислений находим:

$$u_c = \frac{(a^2 - 1)(A - B)/2 - a^2 A^2 + a^2 (B^2 + C^2)/2 + a^2 (4A^3 - B^3 - 3C^3)/6}{(1+a)A + (1-a)B - aA^2 + a(B^2 + C^2)/2} \quad (18)$$

при  $A \geq C \geq B$ .

В качестве примера приведем следующие результаты расчетов при  $a=0,2$ :

– при  $A=0,1, B=0,4, C=0,2$  получаем  $u_c = 0,2774$ ;

– при  $A=0,4, B=0,1, C=0,2$  получаем  $u_c = -0,2774$ .

Абсцисса «центра тяжести результирующей фигуры» при  $\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$  определяется по формуле:

$$u_c = \frac{A \int_{-1}^{a(A-1)} u du + \int_{a(A-1)}^{a(C-1)} \frac{a+u}{a} u du + C \int_{a(C-1)}^{a(1-C)} u du + \int_{a(1-C)}^{a(1-B)} \frac{a-u}{a} u du + B \int_{a(1-B)}^1 u du}{A \int_{-1}^{a(A-1)} du + \int_{a(A-1)}^{a(C-1)} \frac{a+u}{a} du + C \int_{a(C-1)}^{a(1-C)} du + \int_{a(1-C)}^{a(1-B)} \frac{a-u}{a} du + B \int_{a(1-B)}^1 du} \quad (19)$$

при  $\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$ .

После несложных вычислений находим:

$$u_c = \frac{(a^2 - 1)(A - B) / 2 + a^2(B^2 - A^2) / 2 + a^2(A^3 - B^3) / 6}{(1 - a)A + (1 - a)B + 2aC - aC^2 + a(A^2 + B^2) / 2} \text{ при } \begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases} \quad (20)$$

В качестве примера приведем следующие результаты расчетов при  $a=0,2$ :

- при  $A=0,2, B=0,3, C=0,4$  получаем  $u_c = 0,0903$ ;
- при  $A=0,3, B=0,2, C=0,4$  получаем  $u_c = -0,0903$ .

Полученное значение  $u_c$  затем преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления (согласно формуле (3)):

$$m^* = D_m u_c^*. \quad (21)$$

В качестве примера приведем следующие результаты расчетов при  $a=0,2$ :

- при  $A=0,2, B=0,3, C=0,4$  получаем  $u_c = 0,0903$ ;
- при  $A=0,3, B=0,2, C=0,4$  получаем  $u_c = -0,0903$ .

Полученное значение  $u_c$  затем преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления (согласно формуле (3)):

$$m^* = D_m u_c^*. \quad (21)$$

Отметим, что при фиксированных  $A$  и  $B$  величина  $C$  имеет строго определенное значение. Если  $A \leq B$ , то величина  $C$  определяется из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= (a - u^*) / (2a) = A; \Rightarrow u^* = a(1 - 2A); \Rightarrow \\ \mu_3 &= C = (a - u^*) / a = 2A. \end{aligned} \quad (22)$$

Если  $A \geq B$ , то величина  $C$  определяется из следующих соотношений:

$$\begin{aligned} \mu_2 &= (a + u^*) / (2a) = B; \Rightarrow u^* = a(2B - 1); \Rightarrow \\ \mu_3 &= C = (a + u^*) / a = 2B. \end{aligned} \quad (23)$$

**Формирователь величин  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$**  (блок 1 на рис. 1) проектируется на основании формул (1), (2), (4), (10), (11), (22) и (23). Этот блок показан на рис. 4.

В формирователе ошибка рассогласования квантуеться аналого-цифровым преобразователем (АЦП) (**Zero-Order Hold**) с шагом квантования (шагом поступления данных в нечеткий регулятор)  $h$ . Ошибка  $\theta(k)$  с выхода АЦП, ее первая  $\dot{\theta}(k) = [\theta(k) - \theta(k-1)]/h$  и вторая  $\ddot{\theta}(k) = [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)]/h$  разности (формула (1)) подаются на вход блока нормировки входных переменных, который построен по формулам (4). На выходе блоков **Product**, **Product1**, **Product2** структурной схемы формирования величин  $A(t)$ ,  $B(t)$  и  $C(t)$  с учетом «минус единицы» получаем переменные  $u_i$  (соответственно  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ). Элементами ограничения (**Saturation**) моделируем подмножество  $(-a \leq u \leq a)$  универсального множества  $U = [-1, 1]$ , на которое поступают переменные  $u_i, i = 1, 2, 3$ . В блоках **Fcn**, **Fcn1**, **Fcn2** записываем

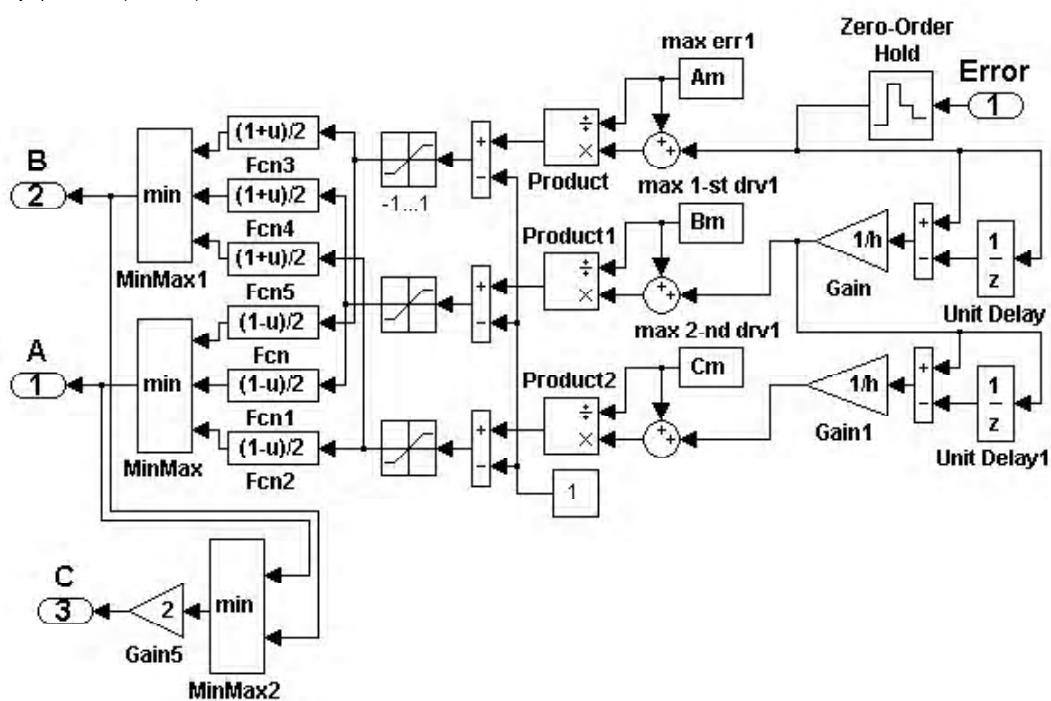


Рис. 4.

аналитические выражения для функций принадлежности  $\mu_1(u)$ , а в блоках **Fcn3**, **Fcn4**, **Fcn5** – аналитические выражения для функций принадлежности  $\mu_2(u)$  (формулы (2), (22), (23)). На выходе блоков **Fcn**, **Fcn1**, **Fcn2** получаем переменные  $\mu_1(u_i)$  (соответственно  $\mu_1(u_1)$ ,  $\mu_1(u_2)$ ,  $\mu_1(u_3)$ ), а на выходе блоков **Fcn3**, **Fcn4**, **Fcn5** получаем переменные  $\mu_2(u_i)$  (соответственно  $\mu_2(u_1)$ ,  $\mu_2(u_2)$ ,  $\mu_2(u_3)$ ). Выражения (10) и (11) вычисляются в блоках **MinMax** и **MinMax1**, на выходе которых получаем значения переменных **A(t)** и **B(t)**. Вычисление величины **C(t)** осуществляется таким образом: поскольку при  $A(t) \leq B(t)$  величина  $C(t) = 2 A(t)$ , а при  $A(t) \geq B(t)$  величина  $C(t) = 2 B(t)$ , то достаточно определить меньшую величину и увеличить ее значение в два раза (см. соотношения (22) и (23)). Для этого служат блоки **MinMax2** и **Gain5**.

Значения диапазонов  $A_m = \theta_{\max} = -\theta_{\min}$ ;  $B_m = -\dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}$ ;  $C_m = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}$  при настройке нечеткого регулятора подбираются либо вручную, либо автоматически путем решения оптимизационной задачи.

**Блок сравнения величин A(t), B(t) и C(t) и расчета  $u_c$**  (блок 2 на рис. 1) проектируется на основании формул (16), (18) и (20). Этот блок показан на рис. 5.

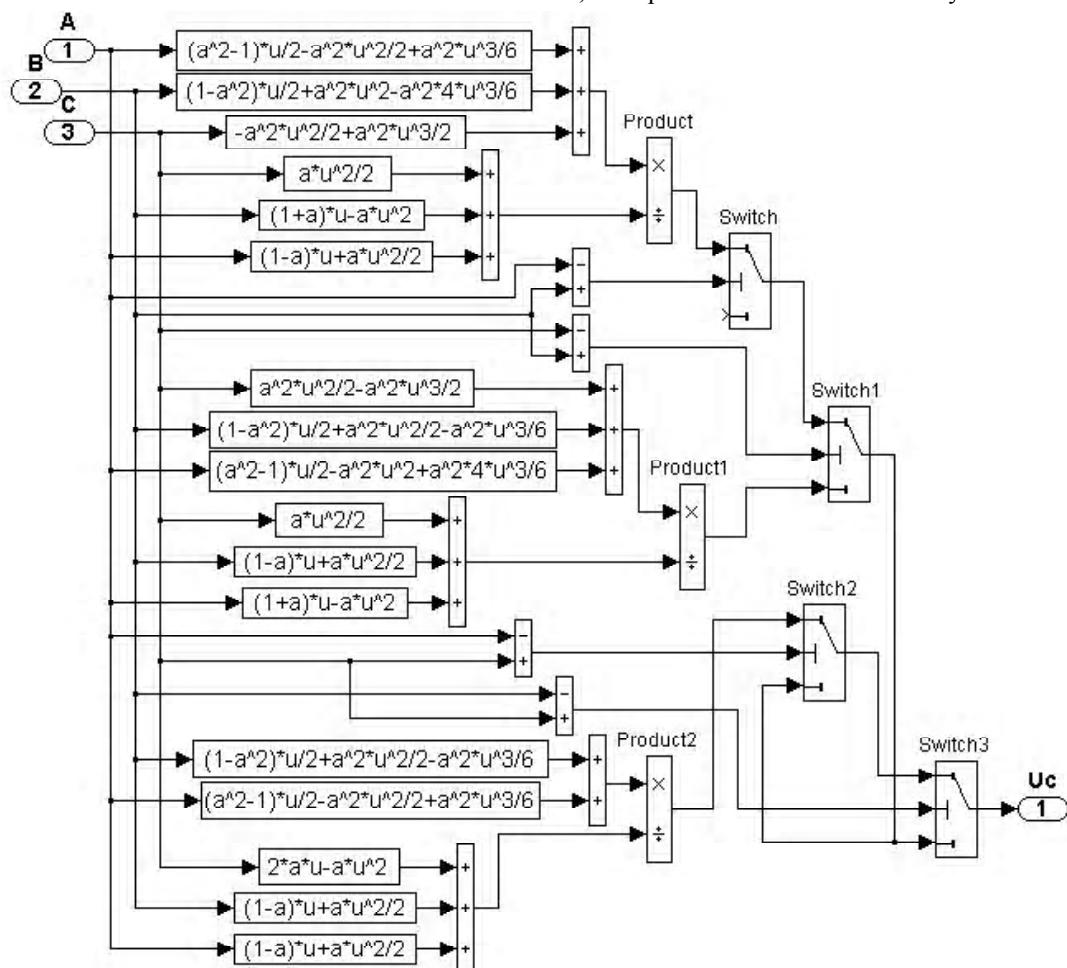


Рис. 5.

На выходе делителя **Product** формируется величина  $u_c$  на основании формулы (16) при  $A \leq C \leq B$ . На выходе делителя **Product1** формируется величина  $u_c$  на основании формулы (18) при  $A \geq C \geq B$ . На выходе делителя **Product2** формируется величина  $u_c$  на основании фор-

мулы (20) при  $\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$ .

Переключатели **Switch** и **Switch1** замыкают верхние контакты при условии  $A \leq C \leq B$ , когда на средних контактах этих переключателей сигналы положительные (в блоках **Switch** и **Switch1** параметр **Threshold**=0,000001). При условии  $A \geq C \geq B$ , когда на средних контактах переключателей **Switch** и **Switch1** сигналы отрицательные, переключатели замыкают нижние контакты.

Переключатели **Switch2** и **Switch3** замыкают верхние контакты при условии  $\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$ , когда на средних контактах этих переключателей сигналы положительные (в блоках **Switch2** и **Switch3** параметр **Threshold**=0,000001).

При условии  $A \leq C \leq B$ , когда на среднем контакте переключателя **Switch2** сигнал положительный, а на среднем контакте переключателя **Switch3** сигнал отрицательный, то в переключателе **Switch2** замкнут верхний контакт, а в переключателе **Switch3** замкнут нижний контакт.

При условии  $A \geq C \geq B$ , когда на среднем контакте переключателя **Switch3** сигнал положительный, а на среднем контакте переключателя **Switch2** сигнал отрицательный, то в переключателе **Switch3** замкнут верхний контакт, а в переключателе **Switch2** замкнут нижний контакт.

Таким образом, при условии  $A \leq C \leq B$  сигнал на выход схемы поступает с выхода делителя **Product**, при условии  $A \geq C \geq B$  сигнал на выход схемы поступает с

выхода делителя **Product1** и при условии  $\begin{cases} A \leq B \leq C \\ B \leq A \leq C \end{cases}$  сигнал на выход схемы поступает с выхода делителя **Product2**.

**Блок нормировки выходной переменной** (блок 3 на рис. 1) с цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП) (Zero-Order Hold1 – фиксатором нулевого порядка с передаточной функцией  $H(s) = (1 - e^{-hs}) / s$ ), полученный на основании формулы (21), показан на рис. 6. Границное значение диапазона  $D_m = m_{\max} = -m_{\min}$  является параметром, который перестраивается при настройке нечеткого регулятора.

Таким образом, разработана полная принципиальная схема нечеткого регулятора и определены параметры регулятора, необходимые для его настройки. Предложенная схема может практически использоваться как в системах активного управления очередью пакетов в TCP/IP, так и любых других системах автоматического управления.

Логика работы нечеткого регулятора приведена на рис. 7. В регуляторе *входные* функции принадлежности (в формирователе) идентичны *выходным* (по которым рассчитаны формулы в блоке сравнения).

В **формирователе величин A(t), B(t) и C(t)** на входе нечеткого регулятора переменные  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$  и  $\ddot{\theta}^*$ , поступающие в регулятор с шагом квантования  $h$ , пересчитываются

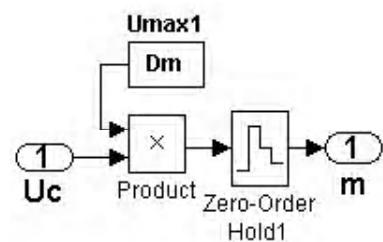


Рис. 6.

ются в переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  по формулам (4) и производится расчет значений *входных* функций принадлежности (см. рис. 3 и 7, а) для переменных  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$ . На основе алгоритма Мамдани определяются уровни отсечения  $A$ ,  $B$  и  $C$  по формулам (10–12).

В **блоке сравнения величин A(t), B(t) и C(t) и расчета  $u_c$**  значения  $A$ ,  $B$  и  $C$ , полученные в **формирователе**, откладываются соответствующим образом на *выходные* функции принадлежности, которые в этом регуляторе идентичны *входным* функциям принадлежности (см. рис. 7, а, б), определяется результирующая функция принадлежности (жирная линия на рис. 7, б) и производится расчет ненормированного выхода регулятора  $u_c$  по формулам (14–20).

Далее полученное значение  $u_c$  в **блоке нормировки выходной переменной** пересчитывается в выходное напряжение регулятора по формуле (21).

Рассмотрим *режимы работы* спроектированного нечеткого регулятора в системе управления.

Если одна или две из переменных  $u_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , больше  $a$ , а две или одна из остальных расположены на универсальном множестве в диапазоне  $-a \leq u \leq a$ , то  $A = 0$ . Если одна или две из переменных меньше  $-a$ , а две или одна из остальных расположены на универсальном множестве

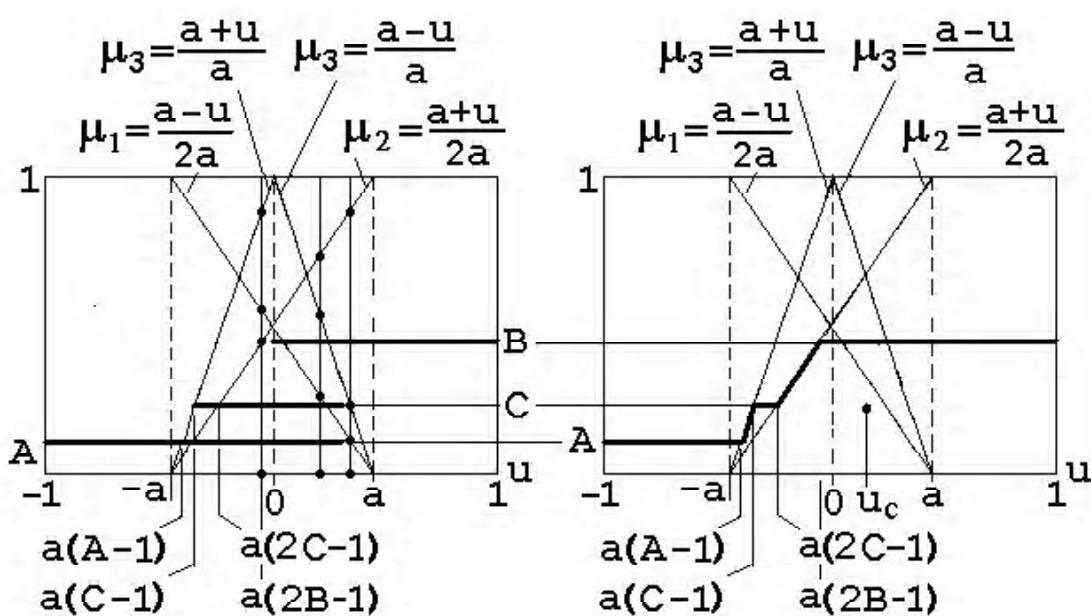


Рис. 7.

стве в диапазоне  $-a \leq u \leq a$ , то  $B = 0$ . Если три переменных больше  $a$  ( $u_i \geq a, i=1,2,3$ ), то  $B \neq 0$  и если три переменных меньше  $-a$  ( $u_i \leq -a, i=1,2,3$ ), то  $A \neq 0$ . В этих случаях регулятор работает в *первом режиме*, когда входные сигналы (входные воздействия) большие и регулятор обеспечивает высокое быстродействие (быструю отработку входных сигналов).

Если все нормированные входные сигналы  $u_i, i=1,2,3$ , находятся в диапазоне  $-a \leq u_i \leq a$ , то регулятор работает во *втором режиме*, когда входные сигналы (входные воздействия) малые и регулятор обеспечивает динамическую точность системы (малые динамические ошибки).

*Третий режим* работы заключается в следующем. Если одна из переменных  $u_i, i=1,2,3$ , больше  $a$ , а другая переменная меньше  $-a$ , то  $A = B = 0$  и на выходе нечеткого регулятора сигнал равен нулю. В этом случае нечеткий регулятор ведет себя как нелинейное корректирующее устройство со случайным прерыванием управляющего воздействия на объект управления.

Нечеткий регулятор переходит из одного режима в другой режим автоматически в зависимости от входных сигналов.

Теперь отметим существенную ошибку в работе [1], в которой приведены *входные* функции принадлежности с двумя термами и *выходные* функции принадлежности с тремя термами. Очевидно, в *выходных* функциях принадлежности будут рабочими только две, идентичные *входным* функциям, поскольку *выходные* функции принадлежности с тремя термами не получают значения уровня отсечения  $C(t)$ . Поэтому принятые в работе [1] *выходные* функции использовать нецелесообразно, поскольку регулятор будет работать только при двух *выходных* функциях принадлежности, которые идентичны *входным* функциям. Исследование замкнутой системы управления с предложенным регулятором изложено в работе [12].

## ВЫВОД

В работе представлена принципиальная схема трехрежимного нечеткого регулятора и изложены вопросы настройки регулятора с проверкой правильности его работы. На основе нового метода проектирования нечетких регуляторов, изложенного в работах [9–11], получены строгие аналитические выражения для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при идентичных треугольных функциях принадлежности с тремя термами. В качестве входных воздействий на регулятор кроме ошибки системы рассматриваются первая и вторая производные ошибки, что резко уменьшает динамические ошибки в системах автоматического управления, использующих такой нечеткий регулятор.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ming, Liu Design of a Multi-model Fuzzy Controller for AQM / Liu Ming, Dou Wen-hua, Xiao Rui // Fuzzy Systems and Knowledge Discovery–FSKD : Third International Conference (September 24–28, 2006, Xi'an), Lecture Notes in Computer Science. – China, Xi'an. – 2006, Volume 4223. – P. 739–742.*

2. *Weiyan, Liu A fuzzy-logic control algorithm for active queue management in IP networks / Liu Liu, Shunyi Zhang, Mu Zhang, Tao Liu // Journal of Electronics. – 2008. – No. 1, Vol. 25. – P. 102–107.*
3. *Hadjadjaoul, Y. FAFC: Fast Adaptive Fuzzy AQM Controller For TCP/IP Networks // Y. Hadjadjaoul, A. Nafaa, D. Negru, A. Mehaoua // IEEE GLOBAL Telecommunication Conference (29.11–3.12, 2004). – Dallas, Texas, USA, 2004. – Pp. 95–98*
4. *Chrysostomou, C. Fuzzy Logic Based Congestion Control in TCP/IP Networks for Quality of Service Provisioning / C. Chrysostomou, A. Pitsillides, G. Hadjipollas, A. Polycarpou, M. Sekercioglu // Next Generation Teletraffic and Wired / Wireless Advanced Networking (NEW2AN'04) : Proceedings of the International Conference (2–6 February 2004, St. Petersburg). – St. Petersburg, Russia, 2004. – Pp. 235–243.*
5. *Chrysostomou, C. Fuzzy logic congestion control in TCP/IP tandem networks / C. Chrysostomou, A. Pitsillides // Computers and Communications (IEEE ISCC 2006) : Proceedings of the 11th IEEE Symposium (June 26–29, 2006, Cagliari). – Cagliari, Italy, 2006. – Pp. 123–129.*
6. *Chrysostomou, C. Using Fuzzy Logic Control to Address Challenges in AQM Congestion Control in TCP/IP Networks / C. Chrysostomou, A. Pitsillides // Workshop on Modeling and Control of Complex Systems (MCCS'05) : CD ROM Proceedings (June 30–July 1, 2005, Ayia Napa). – Ayia Napa, Cyprus, 2005. – 22 p.*
7. *Di Fatta, G. A genetic algorithm for the design of a fuzzy controller for active queue management / G. Di Fatta, F. Hoffmann, Lo Re G, A. Urso // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C : Applications and Reviews. – 2003. – Volume 33, Issue 3. – Pp. 129–134.*
8. *Yaghmaee, M. H. A Fuzzy Based Active Queue Management Algorithm / M. H. Yaghmaee, H. A. Toosi // SPECTS'2003 : Proc. International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (July 20–24). – 2003. – Montreal, Canada. – Pp. 458–462.*
9. *Гостев, В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления / Гостев В. И. – К. : Радиоматер, 2008. – 972 с.*
10. *Гостев, В. И. Новый метод проектирования одного класса нечетких цифровых регуляторов / Гостев В. И. // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 6. – С. 73–84*
11. *Гостев, В. И. Новый метод проектирования одного класса нечетких цифровых регуляторов / Гостев В. И. // Автоматика–2007 : Матеріали XIV міжнародної конференції з автоматичного управління (10–14 вересня 2007 року, м. Севастополь). – Ч.1. – Севастополь : СНУЯС та П, 2007. – С. 122–132.*
12. *Гостев, В. И., Скуртов С. Н. Фаззі–системы активного управления очередью в сетях TCP/IP: монография // Гостев В. И., С. Н. Скуртов. – Нежин : ООО Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 464 с.*

Стаття надійшла до редакції 14.03.2011.

Гостев В. И.

Після доробки 16.01.2012.

## ПРОЕКТУВАННЯ ТРИРЕЖИМНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМ АКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЧЕРГОЮ В TCP/IP МЕРЕЖАХ

Викладені питання проектування трирежимного нечіткого регулятора при ідентичних трикутних функціях принадлежності з трьома термами для систем активного керування чергою в TCP/IP мережах та представлена принципова схема регулятора в системі MATLAB.

**Ключові слова:** проектування, нечіткий регулятор, функції приналежності, активне керування чергою, TCP/IP мережі, MATLAB.

Gostev V. I.

DESIGNING OF AN THREE-REGIME FUZZY CONTROLLER FOR SYSTEMS OF ACTIVE QUEUE MANAGEMENT IN TCP/IP NETWORKS

Questions of designing of an three-regime fuzzy controller are stated at identical triangular membership functions with three terms for systems of active queue management in TCP/IP networks and the basic scheme of controller in system MATLAB is presented

**Key words:** designing, fuzzy controller, membership functions, active queue management, TCP/IP networks, MATLAB.

УДК 004.93

Гофман Є. О.<sup>1</sup>, Олійник А. О.<sup>2</sup>, Субботін С. О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Аспірант Запорізького національного технічного університету

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

## СКОРОЧЕННЯ БАЗ ЛІНГВІСТИЧНИХ ПРАВИЛ НА ОСНОВІ ДЕРЕВ РОЗВ'ЯЗКІВ

Розглянуто завдання індукції лінгвістичних правил. Розроблено метод ідентифікації дерев розв'язків для індукції лінгвістичних правил. Створено програмне забезпечення на основі запропонованого методу. Проведено експерименти по розв'язанню практичних задач, що дозволило дослідити ефективність запропонованого методу.

**Ключові слова:** дерево розв'язків, індукція правил, лінгвістичне правило.

### ВСТУП

В наш час широке застосування отримали експертні системи, засновані на лінгвістичних правилах [1, 2], які успішно використовуються в різних прикладних областях, зокрема в технічному та медичному діагностуванні, фінансовому менеджменті, розпізнаванні образів, геологічній розвідці, керуванні комп'ютерними мережами, технологічними процесами, аналізі веб-контенту в інтернет та ін. Широке застосування таких систем обумовлене в першу чергу тим, що вони є прозорими й відносно дешевими в реалізації.

Оскільки бази правил в експертних системах часто характеризуються великим обсягом, актуальним є завдання індукції правил, суть якого полягає в тому, що на основі початкового набору правил необхідно сформувати нову базу правил меншого обсягу, яка в достатній мірі представляла б початкову базу правил і була б менш надлишковою.

Існують різні методи індукції правил [3], однак ці методи при обробці правил аналізують їхню якість окремо, не розглядаючи та не враховуючи якість усієї бази в цілому, що приводить до одержання неоптимальних баз нечітких правил. Тому актуальною є розробка нових методів індукції правил, які враховували б якість усієї бази знань, а не тільки окремих правил. Для розв'язання даного завдання пропонується створювати дерева розв'язків [3-5], які б після їхньої побудови переводилися в лінгвістичні правила. Вибір дерев розв'язків обґрутовується їхньою можливістю виявляти неспостережувані зв'язки всередині досліджуваних об'єктів, процесів і систем.

**Метою даної роботи** є розробка методу індукції лінгвістичних правил з використанням математичного апарату дерев розв'язків.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- огляд математичного апарату дерев розв'язків;
- приведення основних етапів ідентифікації дерев розв'язків відповідно до розв'язуваного завдання;
- створення правил перетворення дерев розв'язків у лінгвістичні правила;
- порівняння розробленого підходу з існуючими методами індукції лінгвістичних правил.

### ПОСТАНОВА ЗАВДАННЯ

Нехай задана база лінгвістичних правил  $RB = \{R^1, R^2, \dots, R^{RN}\}$ , що описує об'єкти навчальної вибірки  $O = \{O^1, O^2, \dots, O^N\}$ . Тоді на основі навчальної вибірки об'єктів  $O$ , необхідно сформувати таку базу лінгвістичних правил  $RB^* = \{R^1, R^2, \dots, R^{RN^*}\}$ ,  $RN^* << RN$ , яка забезпечувала б прийнятну якість прогнозування експертної системи, побудованої на основі отриманої бази лінгвістичних правил  $RB^*$ :

$$Q(RB^*) \geq Q_{threshold},$$

де  $Q(RB^*)$  – точність прогнозування або класифікації по базі правил  $RB^*$ ;  $Q_{threshold}$  – мінімально припустима точність прогнозування або класифікації.

### ДЕРЕВА РОЗВ'ЯЗКІВ

Дерева розв'язків являють собою графові інтелектуальні моделі, у внутрішніх вузлах яких розташовані функції прийняття рішень на основі значень входів змінних, а в зовнішніх вузлах (термінальних вузлах, листах) знаходяться значення вихідної змінної, відповідні до умов у внутрішніх вузлах [2, 6, 7].

Завдяки своїй деревоподібній структурі такі моделі дозволяють наочно представляти результати обчислень. Тому вони добре інтерпретуються людьми-фахівцями в прикладних областях, які, як правило, не мають спеціальної математичної підготовки та не знайомі з методами й моделями штучного інтелекту. Дерева розв'язків дозволяють ефективно вирішувати завдання класифікації та прогнозування, забезпечуючи при цьому високу точність.

Для застосування дерев розв'язків на практиці з метою класифікації або прогнозування значень вихідних параметрів досліджуваних об'єктів по наборах значень вихідних характеристик необхідно за допомогою даних навчальної вибірки сформувати дерево розв'язків таким чином, щоб воно щонайкраще описувало досліджуваний об'єкт.

Побудова дерев розв'язків пов'язана з витягом правил з навчальних вибірок. Кожний шлях від кореня дерева до одного з його листів може бути перетворений до логічного висловлення – правилу типу «якщо А, то В», де його антецедент виходить шляхом використання всіх умов, представлених у внутрішніх вузлах від кореня до вихідного листа, а права частина правила виходить із відповідного листа дерева.

Процес побудови дерева розв'язків, як правило, містить такі етапи: розстання, розгалуження, обчислення значення вихідного параметра для листа, скорочення.

У результаті етапу розстання (збільшення, growing) деяка вершина заміняється піддеревом, отриманим шляхом розгалуження цієї вершини. На даному етапі відбувається поділ обраної вершини на деякі нові (у випадку дихотомічного дерева вершина розбивається на дві нові). При цьому перебираються всі ознаки й усі можливі варіанти розгалуження по кожній з ознак. У результаті залишається варіант розбиття, при якому значення критерію якості розбиття є найкращим. Якщо нові вершини є перспективними для наступного поділу (критерій завершення розстання не задоволені), то виконується їхнє розгалуження. У випадку неможливості подальшого поділу вершини вона стає листом, і для неї виконується процедура обчислення значення вихідного параметра. Якщо розгалуження вершини приводить до погіршення якості дерева, то вершина також оголошується листом.

Процедура розгалуження (поділу, splitting) дерева викликається рекурсивно при виконанні етапу розстання. Розгалуження призначено для створення для обраної вершини заданої кількості (для дихотомічних дерев – дві) вершин-нащадків.

Обчислення значення вихідного параметра відбувається шляхом пересування по синтезованому дереву розв'язків від кореневого вузла до листа в залежності від значень вихідних параметрів.

Етап скорочення (усікання, pruning) використовується для спрощення побудованого дерева шляхом відсікання нащадків у обраній вершині, яка в наслідку стає листом з певним значенням. Усікання вузла виконується у випадку, якщо воно не приведе до істотного погіршення апроксимаційних і узагальнюючих характеристик дерева розв'язків.

Таким чином, етап усікання дерева виконується знизу нагору: рух починається від листів дерева та відбувається нагору доти, доки апроксимаційні здатності дерева розв'язків залишаються прийнятними.

## ІНДУКЦІЯ ЛІНГВІСТИЧНИХ ПРАВИЛ НА ОСНОВІ ПОБУДОВИ ДЕРЕВ РОЗВ'ЯЗКІВ

Існуючі методи побудови дерев розв'язків [2–7] не враховують особливостей завдання індукції лінгвістичних правил. У зв'язку з цим розробляється новий метод побудови дерев розв'язків для індукції правил. Подібно відомим методам побудови дерев розв'язків, пропонований метод складається з основних фаз: ріст дерева і його згладжування (скорочення), після чого виконується перетворення дерева розв'язків у лінгвістичні правила. Найбільш важливими аспектами пропонованого методу є наступні: використання модифікованої ентропії як оцінкою міри і використання згладжування для відсікання.

Таким чином, пропонований метод складається з таких етапів:

- ріст дерева;
- згладжування дерева;
- перетворення дерева розв'язків у лінгвістичні правила.

На етапі росту дерева пропонується використовувати жадібний підхід. У кожному вузлі, що відповідає підмножині  $T$  навчальної вибірки, вибирається ознака  $f$  і значення  $v$  таким чином, що дані з  $T$  розділяються на дві підмножини  $T_{f,v}^1$  та  $T_{f,v}^2$  виходячи з умов  $x_{i,f} \leq v : T_{f,v}^1 = \{x_i \in T : x_{i,f} \leq v\}$  і  $T_{f,v}^2 = \{x_i \in T : x_{i,f} > v\}$ . Таке розбиття розділяє множину об'єктів навчальної вибірки на такі, для яких значення ознаки  $f$  менше значення  $v$ , і на ті, для яких значення ознаки  $f$  більше значення  $v$ .

З метою розбиття дерева розв'язків для кожного можливого розбиття  $(f, v)$  розраховується оціночна функція:

$$Q(f, v) = p_{f,v}g(p_{f,v}^1) + (1 - p_{f,v})g(p_{f,v}^2),$$

де  $p_{f,v}^1 = P(y_i = 1 | x_i \in T_{f,v}^1)$ ,  $p_{f,v}^2 = P(y_i = 1 | x_i \in T_{f,v}^2)$  і  $p_{f,v} = P(x_i \in T_{f,v}^1 | x_i \in T)$ ;  $g(p)$  – модифікована ентропія для ймовірності віднесення вихідної змінної  $y$  до розглянутого класу за умови, що  $x$  більше або менше значення  $v$  ( $p_{f,v}^1$  і  $p_{f,v}^2$  відповідно):

$$g(p) = -r(p)\ln(r(p)) - (1 - r(p))\ln(1 - r(p)),$$

де  $r(p)$  перетворить оцінку ймовірності:

$$r(p) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 + \sqrt{2p - 1}), & \text{якщо } p > 0,5; \\ \frac{1}{2}(1 - \sqrt{1 - 2p}), & \text{якщо } p < 0,5. \end{cases}$$

Таким чином, чим більше значення ймовірності до 0,5, тим вище модифіковане значення, а чим далі від 0,5, тим значення нижче.

Функція оцінки розраховується для всіх можливих розбиттів і вибирається розбиття з найменшим значенням оціночної функції. Розбиття починається від кореневого вузла та триває доти, поки не виникне ситуація, коли неможливо зробити нове розбиття.

Після виконання першого етапу може виникнути ситуація «перенавчання» дерева, що може привести до не зовсім коректної роботи дерева на тестових вибірках. У зв'язку із цим на другому етапі проводиться усікання великого дерева, щоб дерево менших розмірів давало більш стабільні оцінки ймовірності й було більш інтерпретабельним.

Далі описується підхід, який замість урізання повного дерева, буде робити переоцінку ймовірності кожного листового вузла шляхом усереднення оцінки ймовірності по шляху проходження від кореневого вузла до листового вузла. Для досягнення даної мети була взята ідея «обважнення дерева» [8]. Якщо використовується дерево для стиснення бінарної класової ознаки  $y_i$ , заснованого на  $x_i$ , то в такому випадку метод обважнення дерева гарантує, що коефіцієнт стиснення переоціненої ймовірності

не буде гірше, чим в успішно усіченому дереві. Оскільки пропонований метод застосовується більшою мірою до трансформованої оцінки ймовірності  $r(p)$ , ніж безпосередньо до  $p$ , то теоретично, результат може бути наступним: шляхом використання переоціненої ймовірності, можна досягнути очікуваної класифікації навчальної множини з не гіршим результатом, ніж у правильно усіченого дерева.

Слід зазначити, що даний підхід також є стисненням, оскільки за допомогою такого підходу оцінка стискується від далеких вузлів дерева в напрямку до оцінок вузлів, які перебувають більшіше до кореня дерева.

Нехай вузли  $T_1$  та  $T_2$  є елементами одного рівня із загальним батьківським вузлом  $T$ . Нехай  $p(T_1)$ ,  $p(T_2)$  і  $p(T)$  будуть відповідними оцінками ймовірності. Локальна переоцінена ймовірність може бути обчислена за формулами:  $w_T p(T) + (1 - w_T) p(T_1)$  для  $T_1$  та  $w_T p(T) + (1 - w_T) p(T_2)$  для  $T_2$ . Локальна значимість  $w_T$  і супутня функція  $G(T)$  розраховуються рекурсивно, ґрунтуючись на таких формулах:

$$\frac{w_T}{1 - w_T} = \frac{c \cdot \exp(-|T|g(p(T)))}{\exp(-|T_1|G(T_1) - |T_2|G(T_2))},$$

$$G(T) = \begin{cases} g(p(T)) + \frac{1}{|T|} \log((1 + \frac{1}{c})w_T), & \text{якщо } w_T > 0,5, \\ \frac{|T_1|}{|T|} G(T_1) + \frac{|T_2|}{|T|} G(T_2) + \frac{1}{|T|} \log((1 + c)(1 - iw_T)), & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Параметр  $c$  установлюється апріорно та показує Байесову «оцінку» розбиття. Для листового вузла  $T$  установлюється:  $G(T) = g(p(T))$  та  $w_T = 1$ .

Після обчислення значимостей  $w_T$  для кожного вузла рекурсивним методом (використовується спадна рекурсія), необхідно розрахувати глобальну оцінку ймовірності для кожного вузла дерева зверху вниз. Даний етап усередине усі оцінки  $r(p)$  від кореневого вузла  $T_0$  до вузла  $T_h$  по шляху  $T_0, \dots, T_h$ , ґрунтуючись на значимості  $w_T$ . Слід зазначити, що значимість  $w_T$  є лише локально важливою. Це означає те, що глобальна значимість вузла  $T_h$  є  $w_{T^*} = \prod_{i < k} (1 - w_i) w_k$  на всьому шляху. За визначенням,  $\sum_{i=1}^h w_i = 1$  для будь-якого напрямку, що веде до листа. За наступними рекурсивними формулами обчислюється глобальна переоцінка підлеглих вузлів  $T_1$  і  $T_2$  в батьківському вузлі  $T$ :

$$\widehat{w}_{T_i} = \widehat{w}_T (1 - w_T),$$

$$r^*(T_i) = r^*(T) + \widehat{w}_{T_i} w_{T_i} r(p(T_i)),$$

де  $r(p(T))$  – перетворення з оцінки ймовірності  $p(T)$  у вузлі  $T$ . У кореневому вузлі встановлюється:  $\widehat{w} = 1$ . Після

обчислення  $r^*(T_h)$  для листового вузла  $T_h$  в якості оцінки ймовірності можна використовувати  $r^{-1}(r(T_h))$ . Мітка класу для  $T_i$  буде дорівнювати одиниці, якщо  $r(T_i) > 0,5$ , в іншому випадку – нулю. Усікання дерева виконується, починаючи з основи за напрямом вгору шляхом перевірки ідентичності вузлів одного рівня. Якщо ідентичність вузлів виявлена, то вони видаляються й використовується значення батьківського вузла. Данна процедура буде тривати доти, поки вона не стане неможливою. Метод згладжування послідовно поліпшує роботу дерева. Оцінка часової складності  $-O(M)$ , де  $M$  – кількість вузлів неусіченого дерева.

Важливою частиною запропонованого методу є етап перетворення дерева розв'язків в еквівалентний набір лінгвістичних правил, що легко піддаються тлумаченню. Важливість такого перетворення пояснюється двома причинами:

1. Будь-якій людині легше зрозуміти й змінити набір правил, ніж зрозуміти й змінити дерево розв'язків. Потреба в такій зміні очевидна. Наприклад, може виникнути ситуація, коли є деяка невідповідність між навчальною вибіркою й реальною системою, що вимагає ручної модифікації автоматично створеної системи, і, таким

чином, у системі, заснованій на правилах, таку модифікацію можна виконати шляхом простої зміни відповідних правил.

2. Той факт, що набір правил є логічно еквівалентним відповідному дереву розв'язків для даної навчальної вибірки, гарантує, що будь-який математичний аналіз ефективності роботи дерева розв'язків відноситься не тільки до дерева розв'язків, але й до відповідного набору правил.

Найпростіший спосіб перетворення дерева в еквівалентний набір правил полягає в тому, щоб створити набір правил із правил, кожне з яких відповідає окремому листу дерева шляхом формування логічного об'єднання умов на шляху від кореня дерева до листа.

Пропонується підхід, що перетворить дерево розв'язків у набір логічно еквівалентних правил. Метою запропонованого підходу не є одержання доказово мінімального набору правил. Замість цього за допомогою запропонованого підходу проводиться логічне усікання правил.

1. Перевірка умов « $>$ » та « $<$ » у всіх правилах з метою усунення надмірності в описі умов правил. Таким чином, виконується, наприклад таке перетворення:  $(x < 3) \cap (x < 5)$  заміняється на  $(x < 3)$ .

2. Видалення умов, які є логічно надлишковими в контексті всього набору правил, тобто видалення умов, які ідентифікуються виходячи зі структури отриманого дерева розв'язків. Таке спрошення змінює правило, що пов'язано з конкретним листом дерева, при цьому зберігаючи повну адекватність усього набору правил.

Для кожного листа, що віднесений до класу  $X$ , створюється правило про те, що об'єкт відноситься до класу  $X$  шляхом кон'юнкції умов, що знаходяться на шляху проходження від кореня до  $X$ , але використовуючи тільки ті умови, які відповідають наступному правилу: для кожного вузла  $N$  на шляху від кореня до листа з міткою  $X$  умова, що відповідає батьку  $N$ , є частиною кон'юнкції тільки в тому випадку, якщо спрацьовує умова сусідства для вузла  $N$ . Умова сусідства для  $N$  вважається успішною, якщо: вузол  $N$  не є коренем і сусідній вузол відносно  $N$  не є листом з міткою  $X$ .

Таким чином результатуючий набір правил є логічно еквівалентним базовому дереву розв'язків.

Запропонований метод індукції лінгвістичних правил з використанням дерев розв'язків був програмно реалізований за допомогою мови програмування C#.

Для експериментів використовувалися тестові дані, які були взяті із загальнодоступних репозиторіїв [9]. Експериментальні дослідження проводилися на підставі вибірки, яка містила інформацію про ехокардіограми пацієнтів із серцевими приступами. Вибірка містила інформацію про 132 пацієнтів, кожний з яких характеризувався 12 ознаками. Крім того, для кожного пацієнта вказувалося живий він або помер.

Запропонований метод індукції нечітких правил порівнювався з мультиагентним методом і канонічним методом еволюційного пошуку. Виходячи із проведених експериментів, були отримані бази лінгвістичних правил, що характеризуються наступною якістю класифікації

пацієнтів: 81,3 %, 79,1 % і 92,7 % для мультиагентного, еволюційного та запропонованого методів, відповідно.

Таким чином, можна відзначити, що запропонований метод побудови дерев розв'язків для індукції лінгвістичних правил забезпечує більш точні результати прогнозування в порівнянні з іншими відомими методами індукції лінгвістичних правил.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне завдання автоматизації індукції лінгвістичних правил.

*Наукова новизна* роботи полягає в тому, що розроблено новий метод побудови дерев розв'язків, який дозволяє виконувати індукцію лінгвістичних правил, що досягається за рахунок введення додаткових функцій перетворення при рості дерева, шляхом згладжування дерева розв'язків для його усікання та за рахунок введення критерію сусідства при перетворенні дерева розв'язків.

Розроблений метод ідентифікації дерев розв'язків для індукції лінгвістичних правил дозволяє виконувати перетворення й об'єднання правил, що забезпечує можливість розробки експертних систем на підставі більш логічно прозорих і простих баз лінгвістичних правил.

*Практична цінність* отриманих результатів полягає в тому, що на основі запропонованого методу розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє виконувати індукцію баз правил для одержання баз лінгвістичних правил, на підставі яких можна створювати експертні системи з меншою помилкою класифікації.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Encyclopedia of artificial intelligence / Eds.: J. R. Dopico, J. D. de la Calle, A. P. Sierra. – New York : Information Science Reference, 2009. – Vol. 1–3. – 1677 p.
2. Барсегян, А. А. Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP : учебное пособие / А. А. Барсегян. – С. Пб. : BHV, 2007. – 384 с.
3. Quinlan, J. R. Decision trees and decision making / J. R. Quinlan // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1990. – № 2 (20). – P. 339–346.
4. Quinlan J. R. Induction of decision trees / J. R. Quinlan // Machine Learning. – 1986. – № 1. – P. 81–106.
5. Gelfand S. B. An Iterative Growing and Pruning Algorithm for Classification Tree Design / S. B. Gelfand, C. S. Ravishankar, E. J. Delp // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1991. – № 13 (2). – P. 163–174.
6. Liu, X. A decision tree solution considering the decision maker's attitude / X. Liu, Q. Da // Fuzzy Sets and Systems. – 2005. – № 152 (3). – P. 437–454.
7. Classification and regression trees / L. Breiman, J. H. Friedman, R. A. Olshen, C. J. Stone. – California : Wadsworth & Brooks, 1984. – 368 p.
8. Willems F. M. J. The Context Tree Weighting Method: Basic Properties / F. M. J. Willems, Y. M. Shtarkov, T. J. Tjalkens // IEEE Transactions on Information Theory. – 1995. – № 3. – P. 653–664.
9. UCI Machine Learning Repository [electronic resource] / Center for Machine Learning and Intelligent Systems. – Access mode : <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html>.

Стаття надійшла до редакції 28.12.2011.

Гофман Е. А., Олейник А. А., Субботин С. А.  
СОКРАЩЕНИЕ БАЗ ЛИНГВИСТИЧЕСКИХ ПРАВИЛ  
НА ОСНОВЕ ДЕРЕВЬЕВ РЕШЕНИЙ

Рассмотрена задача индукции лингвистических правил. Разработан метод идентификации деревьев решений для индукции лингвистических правил. Создано программное обеспечение на основе предложенного метода. Проведены эксперименты по решению практических задач, что позволило исследовать эффективность предложенного метода.

Ключевые слова: дерево решений, индукция правил, лингвистическое правило.

УДК 004.78; 004.021; 004.046

Gofman Ye., Oliinyk A., Subbotin S.  
LINGUISTIC RULES BASES REDUCTION BASED ON  
DECISION TREES

The problem of linguistic rules induction is considered. A method of decision trees identification for linguistic rules induction is developed. The software based on the proposed method is created. Experiments on the solution of practical problems, which allowed to investigate the effectiveness of the proposed method are made.

**Key words:** decision tree, rules induction, linguistic rule.

Ильяшенко М. Б.<sup>1</sup>, Голдобин А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

<sup>2</sup>Ассистент Запорожского национального технического университета

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ПОИСКА ИЗОМОРФИЗМА ГРАФОВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЕЙ

Предлагается усовершенствованный алгоритм поиска изоморфизма графов и результаты исследования его эффективности. Объектом исследования является множество граф-схем алгоритмов достижения цели, полученная после обхода заданной семантической сети абстрактной машиной Уоррена.

**Ключевые слова:** декларативная логика, предикат, дерево вывода, пролог, рекурсивный обход с возвратом, граф-подграф изоморфизм.

### ВВЕДЕНИЕ

В составе программно-лингвистических средств автоматизации проектирования цифровых устройств на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) широко используются методики формального описания структурно-функциональной организации проектируемого объекта. Методология проектирования на основе математического аппарата теории ориентированных гиперграфов [1] позволяет использовать унифицированные алгоритмы выполнения основных этапов создания цифровых устройств, в том числе специализированных (проблемно-ориентированных) вычислителей.

Ориентированный гиперграф, допускающий петли и кратные дуги, является наиболее общим типом графовых моделей и называется ориентированным псевдогиперграфом. В дальнейшем, для краткости, ориентированный, помеченный псевдогиперграф будем именовать «графом».

Для формального описания свойств узлов и дуг графа удобно применять операторное пространство, образующее многозначную логику. Примером такого пространства является трехзначная логика модальных операторов Лукасевича [2].

Применение многозначного операторного пространства для описания актов синтеза цифрового устройства, которое формально задано графом, и исследование способов преобразования проблемно-ориентированных описаний является актуальной задачей. Ее решение позволяет разрабатывать эффективные инструменты, мес-

то применения которых – системы автоматизированного проектирования (САПР) цифровых и микропроцессорных устройств различного назначения.

*Абстрактная машина Уоррена* (англ. Warren's abstract machine, WAM) [3] представляет собой формальную модель устройства, реализующего основные операции исчисления предикатов первого порядка, представленных дизьюнктами Хорна. Известное приложение WAM – японский проект вычислителей пятого поколения (1982–1992 гг.).

В абстрактной машине Уоррена одновременно выполняется семантический анализ программы на входном языке  $L_{\text{pro}}$  и формирование таблиц лексико-синтаксического анализа. Результаты анализа используются для генерирования программы на выходном языке  $L_{\text{wam}}$ . Язык  $L_{\text{wam}}$  представляет собой набор типовых, функционально-ориентированных операций линейной резолюции в терминах WAM – конечного множества команд типа `unify_variable`, `put_list` и др.

*Формальная грамматика* является абстрактной структурой, описывающей множество правил образования строк языка из заданного алфавита терминальных и нетерминальных символов. Генерирующая и анализирующая формальные грамматики используются для решения противоположных задач, в зависимости от семантики грамматического разбора. Генерирующая грамматика образуется конечным множеством порождающих правил (продукций) формирования строк формального

язика. Анализирующая грамматика предназначена для грамматического разбора строк формального языка, поступающих на вход.

Графически правила продукции формальной грамматики представляются в виде ориентированных помеченных псевдогиперграфов. Например, продукции регулярной грамматики описываются в виде *граф-схем алгоритма* (ГСА).

*Иерархия Хомского* [2] представляет собой иерархию классов последовательно вложенных формальных грамматик, описывающих языки разного типа. В исходном виде иерархия Хомского образована четырьмя уровнями, которые задают законы образования основных классов формальных языков. Каждому уровню иерархии Хомского соответствует своя модель распознавающего автомата, начиная с машины Тьюринга с бесконечной лентой, которая предназначена для распознавания продукции грамматик общего вида (уровень 0 иерархии Хомского), и заканчивая конечным автоматом, порядок переключения состояний которого описывается регулярной грамматикой (уровень 3 иерархии Хомского).

Абстрактная машина Уоррена способна распознавать грамматики уровня 2. Это контекстно-свободные грамматики, с помощью которых определяются контекстно-свободные языки. Языки, образованные такими грамматиками, могут быть распознаны с помощью *стекового автомата*. Таким образом, с точки зрения анализа входной программы, поведение WAM эквивалентно работе стекового автомата.

В процессе выполнения запроса WAM способна генерировать описание ориентированного графа, представляющего ГСА выходной программы на регулярном языке  $L_{wam}$ .

Так как абстрактная машина Уоррена занимает в иерархии Хомского более высокий уровень по отношению к конечному автомату и способна преобразовывать строки контекстно-свободного языка  $L_{pro}$  в конструкции регулярного языка  $L_{wam}$ , она может использоваться в следующих приложениях:

- ввод задания на проектирование специализированного вычислителя на ПЛИС;
- конфигурирование микропроцессорных систем с программируемой архитектурой;
- реализация технологий логического, концептуального, функционального программирования.

В данной работе описан алгоритм поиска граф-подграфа изоморфизма и приведены результаты исследования его эффективности на примере помеченных ориентированных гиперграфов, которые представляют результат работы абстрактной машины Уоррена.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Графически концептуальная область входной программы для абстрактной машины Уоррена может быть задана *семантической сетью*. Например, на рис. 1 показан концептуальный граф вычислительной модели прямоугольного треугольника.

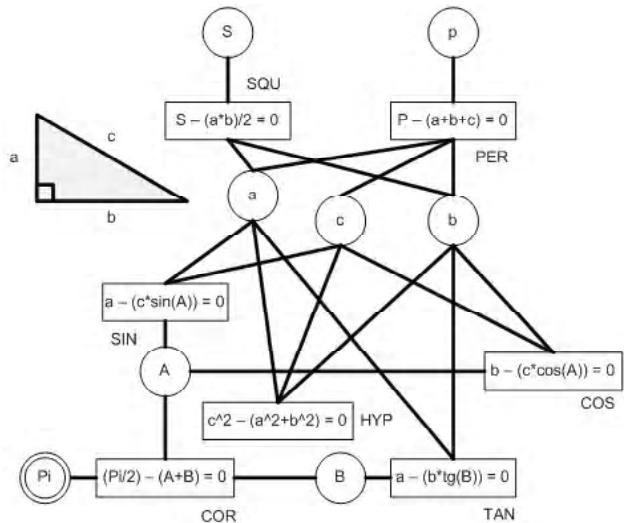


Рис. 1. Концептуальный граф

Программа на входном языке  $L_{pro}$  абстрактной машины Уоррена образована объектами двух типов: термом программы  $p$  и термом запроса  $?-q$ . Цель работы машины можно сформулировать так: определив программу  $p$ , необходимо составить запрос  $?-q$ , выполнение которого или закончится неудачно, если  $p$  и  $q$  нельзя унифицировать, или будет завершено удачно, если получилась связка переменных из  $q$  с переменными из  $p$ .

При доказательстве теорем методом резолюции, проверка невыполнимости запроса наталкивается на препятствия, связанные с бесконечным числом областей интерпретации запроса. В общем случае, если выбранная область бесконечна, то запрос допускает бесконечно много конкретизаций, т. е. существует бесконечно много интерпретаций относительно языка  $L_{pro}$ . Для обхода данной проблемы в WAM клаузальная форма концептуального пространства, заданная программой  $p$ , ограничивается эрбановой областью [2].

По этой причине пролог-процессор, реализованный на WAM, реализует стратегию разбора И/ИЛИ-дерева запроса «слева направо и вглубь с возвратом при неудаче». На рис. 2 показан случай поиска конкретизации переменной  $b$  в вычислительной модели прямоугольного треугольника, при условии, что грамматический разбор начинается с фразы SQU.

Можно сделать выводы относительно порядка работы машины Уоррена.

1. Концептуальное пространство, в котором выполняется грамматический разбор запроса  $?-q$  машиной Уоррена ограничивается множеством конкретизированных во входной программе  $p$  переменных и функционалов.

2. Время выполнения запроса  $?-q$  зависит от выбора начальной языковой конструкции – хорновского дизъюнкта, определяющего правило в программе на входном языке  $L_{pro}$ .

3. Если  $H_M^k(G)$  – множество всех ГСА, сформированных машиной Уоррена при выполнении  $k$ -го запроса на максимально определенном пространстве, то лю-

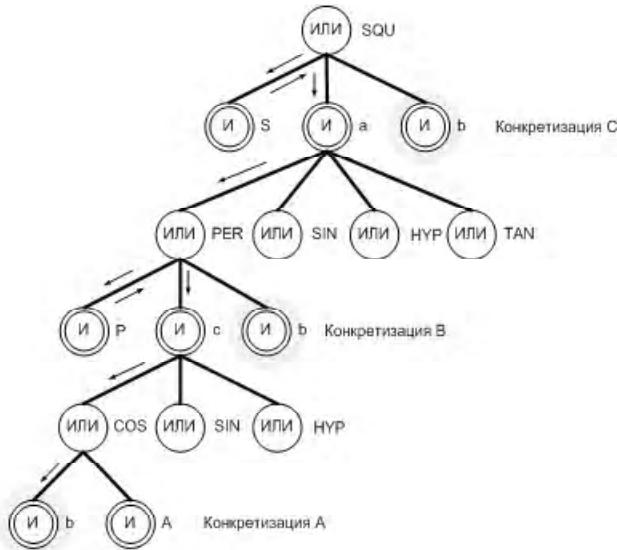


Рис. 2. Пример грамматического разбора

бое множество  $H_m^k(G)$  не полностью определенных концептуальных пространств сюръективно отображается на множество  $H_M^k(G)$ :  $H_M^k(G) \subseteq \forall H_m^k(G)$ .

Не полностью определенным концептуальным пространствам соответствуют различные семантические сети, представляющие их графически. Поиск изоморфного подграфа в ориентированном графе семантической сети концептуального пространства программы для WAM является важной задачей, обеспечивающей значительное повышение эффективности работы генератора программно-лингвистических описаний, созданного на основе машины Уоррена. Для решения этой задачи был разработан усовершенствованный алгоритм определения изоморфизма двух заданных графов.

## 2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Пусть даны графы  $G_1 = (V_1, E_1, L_1)$  и  $G_2 = (V_2, E_2, L_2)$ ,  $V$  – множество вершин графа,  $E$  – множество ребер графа и  $L$  метки вершин графа. Граф  $G_1$  изоморфен подграфу графа  $G_2$  (обозначается, как  $G_1 \cong S_2 \subseteq G_2$ ), если существует подстановка  $\varphi: V_2 \rightarrow V_1$ , такая, что для каждой пары вершин  $v_i, v_j \in V_2$ , если  $(v_i, v_j) \in E_2$ , то  $(\varphi(v_i), \varphi(v_j)) \in E_1$  и для всех  $l_i \in L_2$  выполняется  $l_i \in L_2 = \varphi(l_i) \in L_1$ .

Алгоритм установления граф-подграф изоморфизма для помеченных графов является развитием и продолжением алгоритма установления изоморфности [4].

Алгоритм установления изоморфизма удобно описывать в терминах поиска в пространстве состояний. Каждое состояние  $s$  процесса совмещения вершин соответствует частичной подстановке  $\varphi(s)$ , которая содержит часть вершин полной подстановки. Каждому состоянию так же соответствуют подграфы  $G_1(s)$  и  $G_2(s)$ , полученные из вершин графов  $G_1$  и  $G_2$ , вошедших в

частичную подстановку  $\varphi(s)$ , и ребер, соединяющих эти вершины. В дальнейшем обозначим через  $\varphi_1(s)$  и  $\varphi_2(s)$  проекции подстановки  $\varphi(s)$  на  $V_1$  и  $V_2$ .

Алгоритм состоит из предварительной и основной части. В предварительной части выполняются операции упорядочивания вершин графов и выполнения однократных, по ходу алгоритма, операций, призванных сократить область поиска основной, переборной части алгоритма.

**Предварительная часть алгоритма.** Основные действия, выполняемые в предварительной части алгоритма – сортировка вершин графов и формирование матрицы возможных совмещений.

Матрица возможных совмещений  $M_{i,j}$  – это бинарная таблица размером  $|V_1| \times |V_2|$ . Каждому элементы таблицы соответствует пара вершин исходных графов  $V_{1,i}$  и  $V_{2,j}$ . Значения матрицы формируются следующим образом:

- $M_{i,j} = 0$ , если на основании предварительных проверок вершины  $V_{1,i}$  и  $V_{2,j}$  совместить нельзя;
- $M_{i,j} = 1$ , в противном случае.

Смысл матрицы возможных совмещений в том, чтобы выполнить однократно в рамках предварительной части алгоритма все проверки, не основанные на информации, полученной в процессе совмещения вершин, тем самым, ускорить обработку соответствующих ограничений, сведя ее к одной операции сравнения.

В программе реализованы следующие предварительные проверки:

1.  $M_{i,j} = 0$ , если  $|V_{1,i}| < |V_{2,j}|$ , где  $|V_{X,Y}|$  – степень вершины  $Y$  графа  $X$ ;
2.  $M_{i,j} = 0$ , если  $|V_{1,i}^{in}| < |V_{2,j}^{in}|$ , где  $|V_{X,Y}^{in}|$  – число входящих ребер вершины  $Y$  графа  $X$ ;
3.  $M_{i,j} = 0$ , если  $|V_{1,i}^{out}| < |V_{2,j}^{out}|$ , где  $|V_{X,Y}^{out}|$  – число исходящих ребер вершины  $Y$  графа  $X$ ;
4.  $M_{i,j} = 0$ , если  $W_{1,i}^{vertex} < W_{2,j}^{vertex}$ , где  $W_{X,Y}^{vertex}$  – число вершин в волновом разложении подграфа окружения вершины  $Y$  графа  $X$ ;
5.  $M_{i,j} = 0$ , если  $\sum_{l=1}^k W_{1,i,l}^{vertex} < \sum_{l=1}^k W_{2,j,l}^{vertex}$ ,  $k = 1..|W_{2,j}^{vertex}|, l = 1..4$ , где  $W_{X,Y,l}^{vertex}$  – число вершин в  $l$ -ой волне волнового разложения графа  $X$ , начиная с вершины  $Y$ ;
6.  $M_{i,j} = 0$ , если  $W_{1,i}^{ribes} < W_{2,j}^{ribes}$ , где  $W_{X,Y}^{ribes}$  – число ребер в волновом разложении подграфа окружения вершины  $Y$  графа  $X$ ;
7.  $M_{i,j} = 0$ , если  $\sum_{l=1}^k W_{1,i,l}^{ribes} < \sum_{l=1}^k W_{2,j,l}^{ribes}$ ,  $k = 1..|W_{2,j}^{ribes}|, l = 1..4$ , где  $W_{X,Y,l}^{ribes}$  – число ребер в  $l$ -ой волне волнового разложения графа  $X$ , начиная с вершины  $Y$ ;

8.  $M_{i,j} = 0$ , если  $L_{1,i} \neq L_{2,j}$ , где  $L_{X,Y}$  – метка вершины  $Y$  графа  $X$ .

Возможно использование и других критериев для оценки возможности совмещения вершин графов. Метод разработки таких критериев основан на волновом разложении графов, начиная с заданной вершины [5]. По мере распространения волны получаются подграфы окружения вершин. Сравнивая параметры соответствующих подграфов окружения вершин графов, которые предполагается совмещать, делается вывод о потенциальной возможности или принципиальной невозможности такого совмещения. В приведенных критериях для этого использовались сумма вершин и ребер в подграфах окружения сравниваемых вершин для всех этапов распространения волны.

Сортировка вершин графов производится с целью ускорения нахождения изоморфной подстановки, в случае, если такая подстановка существует. В переборной части алгоритма переставляются только вершины большего графа, в то время, как порядок вершин меньшего графа не меняется. Порядок следования вершин меньшего графа определяется в предварительной части алгоритма.

Пусть  $T_{2,i}$  – количество ребер инцидентных верши-

нам с меньшими номерами и  $P_{2,i} = \sum_{j=1}^{|V_1|} M_{j,i}$  – суммар-

ное количество вариантов совмещения вершины  $i$  графа  $G_2$  с вершинами графа  $G_1$ . Тогда порядок сортировки вершин графа  $G_2$  следующий:

$$V_{2,i} = V_{2,k}, \text{ где } T_{2,k} = \min_{j=i+1}^{|V_2|} (T_{2,j}).$$

Если  $T_{2,i} = T_{2,j}$ , то  $V_{2,i} = V_{2,k}$ , где  $P_{2,k} = \min(P_{2,i}, P_{2,j})$ .

Т. е. вершины графа  $G_2$  сортируются в порядке убывания количества связей с вершинами имеющими меньшие номера или в порядке убывания количества вариантов совмещения вершин, если количество связей одинаково. Такой порядок следования вершин обусловлен тем, что чем больше связей с уже совмещенными имеет вершина, тем жестче будет ограничивающее условие, включающее эту вершину, и, соответственно, меньше общее количество совмещений, которые необходимо перебрать.

**Основная часть алгоритма.** Эта часть алгоритма представляет собой последовательное наложение вершин с возвратом, описывать которое удобно в терминах метода поиска в пространстве состояний.

Вершины графа  $G_2$  остаются нетронутыми и каждой из них ставится в соответствие одна из вершин графа  $G_1$ . При этом проверяется допустимость такого совмещения. Если удается найти соответствие всем вершинам графа  $G_2$ , при этом выполнено условие изоморфизма, то найденное состояние возвращается как искомая подстановка.

Пусть  $T_{1,i}$  – количество связей вершины  $i$  графа  $G_1$  с вершинами  $V_{1,j} \in \varphi_1(s)$ , а  $T_{2,i}$  – количество связей вершины  $i$  графа  $G_2$  с вершинами  $V_{2,j} \in \varphi_2(s)$ .

Начальному состоянию  $\varphi(s)_0 = 0$  соответствует состояние, при котором не совмещено еще ни одной пары вершин.

Для получения  $i$ -го состояния для вершины  $V_{2,i}$  ищется соответствие среди вершин  $V_{1,j}$ , таких что:

1.  $M_{i,j} = 1$ , т. е. вершины совместимы на основании предварительных проверок;

$$2. T_{1,i} \geq T_{2,j};$$

$$3. \text{ Для } k = 1..i, \text{ если } (v_i, v_k) \in E_1, \text{ то } (\varphi(v_i), \varphi(v_k)) \in E_2.$$

Если выполнены все три условия, из которых третье является прямым следствием определения граф-подграф изоморфизма, то соответствующая пара вершин входит в частичную подстановку и формируется новое состояние  $\varphi(s)_i$ .

Перебор состояний производится методом поиска в глубину.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ РАБОТЫ

Результат работы машины Уоррена может быть представлен в виде ГСА – графовой модели, в которой используются следующие типы вершин (блоков) (рис. 3).

Для тестирования производительности разработанного алгоритма формировались случайные графы, состоящие из блоков  $P$  и  $D$  типа. При формировании графов использовались следующие параметры:

$nv$  – число вершин в генерируемых графах;

$ns$  – нижняя граница числа вершин в генерируемых подграфах;

$p$  – процент входления  $P$ -блоков (процент входления  $D$ -блоков составлял  $100\% - Np$ );

$l$  – количество различных меток, используемых для маркировки вершин графов.

ГСА формировался из отдельных блоков  $P$  и  $D$  типа, на основании параметра  $p$  в соотношении  $p/(100-p)$ . Дуги блоков случайным образом соединялись между собой. Общее число вершин ГСА определялось параметром  $nv$ . Всем вершинам случайным образом приписывались метки в диапазоне от 0 до  $l-1$ .

Подграф формировался путем удаления части вершин из ГСА. Начиная со случайной вершины, пускалась волна, проходящая как по входящим, так и по исходя-

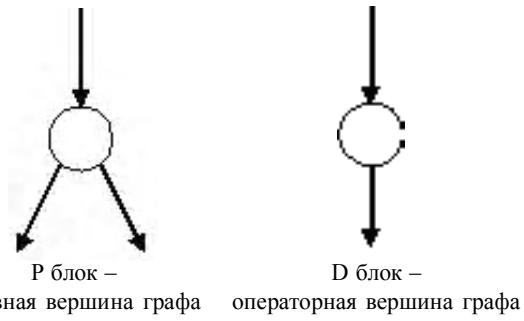


Рис. 3. Типы вершин графа

щим дугам, для формирования связного подграфа. Как только на очередном шаге размер подграфа вошедшего в волновое разложение превышал параметр  $ns$ , все вершины, которые накрыла волна, выделялись в виде подграфа.

Приводятся результаты численного исследования производительности алгоритма на основании набора сгенерированных графов, описанного выше. Каждое значение формировалось как суммарное время поиска подграфа для 100 пар графов (рис. 4).

Для графов с числом вершин до 1500 включительно, алгоритм в среднем тратит на поиск изоморфного подграфа не более 0,35 секунды машинного времени, что достаточно для решения реальных задач проектирования схемных устройств управления. Ввиду комбинаторной природы алгоритма, наблюдаются пики производительности, при которых время поиска подграфа в отдельных случаях может заметно отличаться от среднего (рис. 5).

Влияние размера искомого подграфа на общую производительность алгоритма значительно менее весомое. При изменении размера подграфа по отношению к размерам ГСА от 1 % до 50 % (т. е. в 50 раз) время работы алгоритма изменилось лишь с 28 секунд до 100 (т. е. в 3 раза). С учетом

того, что большинство ГСА функционально-ориентированных конечных автоматов имеют размер порядка 20–40 вершин, фактор размера подграфа не является решающим для производительности алгоритма (рис. 6).

При изменении процента блоков  $P$ -типа использованных для генерации графов конечного автомата в диапазоне от 10 % до 50 % (в 5 раз), время вычислений изменилось с 33 до 50 секунд (т. е. в 1,5 раза). Следовательно, как и фактор размера искомого подграфа, соотношение числа блоков  $P$  и  $D$  типов незначительно влияет на производительность алгоритма, однако с ростом процента  $P$  блоков производительность алгоритма все же незначительно падает (рис. 7).

Из приведенного графика следует, что фактор числа различных меток приписываемых вершинам графов (т. е. числа различных вычислительных узлов, применяемых при формировании конечного автомата) меньше всего влияет на производительность алгоритма. Вне зависимости от значения параметра  $l$ , время сравнения одной пары графов остается в очень узких пределах от 0,35 до 0,36 секунды машинного времени. Такое малозначительное влияние параметра  $l$  объясняется значительным вкладом то-

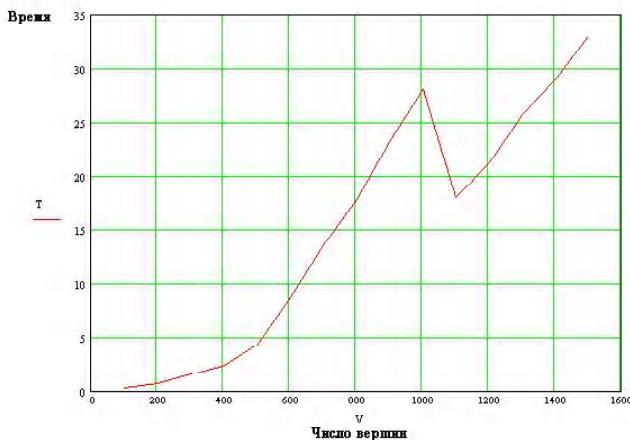


Рис. 4. Зависимость времени поиска подграфа от числа вершин в графе конечного автомата (параметры  $ns=20$ ,  $p=20$ ,  $l=5$ ,  $nv=100\dots1500$ )

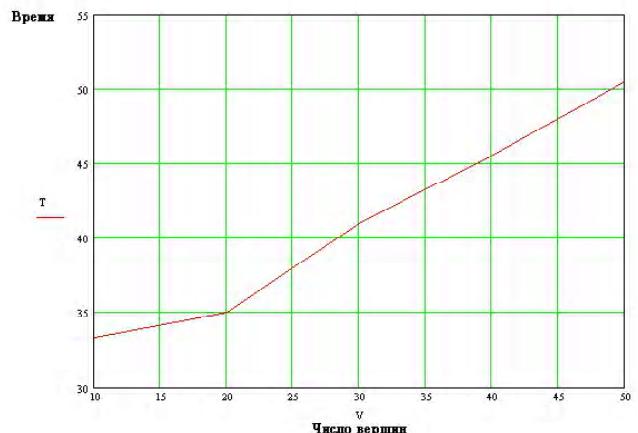


Рис. 6. Зависимость времени поиска подграфа от соотношения  $P$  и  $D$  блоков в графе конечного автомата (параметры  $nv=1000$ ,  $ns=100$ ,  $p=10..50$ ,  $l=5$ )

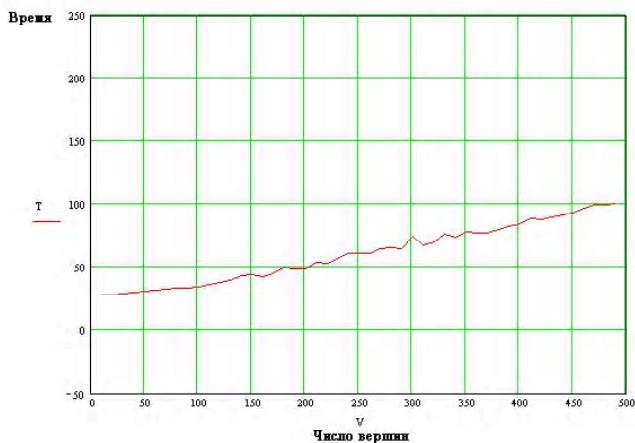


Рис. 5. Зависимость времени поиска подграфа от числа вершин в подграфе типового ГСА (параметры  $nv=1000$ ,  $p=20$ ,  $l=5$ ,  $ns=10\dots500$ )

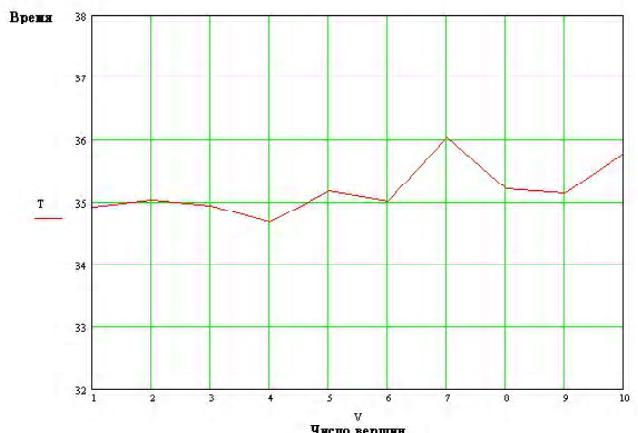


Рис. 7. Зависимость времени поиска подграфа от числа различных меток приписываемых вершинам графов (параметры  $nv=1000$ ,  $ns=100$ ,  $p=20$ ,  $l=1..5$ )

ологии графов в условие, ограничивающее дерево возможных решений – для случайных графов и графов, не включающих в себя регулярные структуры, большая часть информации используемой для ограничения дерева поиска получается из анализа топологии графов. Но чем больше регулярных структур будут содержать графы, тем более значительным становится влияние фактора меток приписанных вершинам графов.

## ВЫВОДЫ

В работе представлено решение задачи поиска граф-подграф изоморфизма для помеченных графов. Приводится детальное описание разработанного алгоритма и результатов исследования его производительности для графов, характерных для конечных автоматов с программируемой процедурой. Применение описанного алгоритма позволяет расширить класс решаемых задач на автоматы с программируемой структурой, что является актуальным [6, 7, 8].

При проектировании проблемно-ориентированных вычислителей на ПЛИС, данное решение обеспечивает оптимизацию аппаратурных затрат на этапах ввода задания на проектирование, конфигурирования микропроцессорных систем с программируемой архитектурой, реализации технологий логического, концептуального, функционального программирования и др.

Исследовано влияние различных параметров ГСА на производительность алгоритма поиска подграфа. Результаты исследования показали, что разработанный алгоритм может быть эффективно применен в современных САПР, например, для создания функционально-ориентированных конечных автоматов, полученных в результате анализа концептуальной области проблемно-ориентированным пролог-процессором, одним из способов реализации которого является абстрактная машина Уоррена.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Голдобин, А. А. Квазигомоморфное преобразование гиперграфов в автоматизации проектирования устройств управления / А. А. Голдобин // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2006. – № 1. – С. 41.
  2. Тейз, А. Логический подход к искусственному интеллекту: от классической логики к логическому программированию : пер. с франц. / Тейз А., Грибомон П., Луи Ж. и др. – М. : Мир, 1990. – 432 с.
  3. Hassan Ait-Kasi Warren's Abstract Machine : a tutorial reconstruction / Hassan Ait-Kasi Warren's. – MIT Press, 1999. – 144 p.
  4. Ильяшенко, М. Б. Разработка и исследование параллельного алгоритма проверки граф-подграф изоморфизма / М. Б. Ильяшенко // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2006. – № 1. – С. 63–69.
  5. Пинчук, В. П. Основанная на волновом разложении система инвариантов для простых графов и алгоритм распознавания изоморфности / В. П. Пинчук. – К., 1995. – Деп. в ГНТБ Украины 10.05.95, N 1002 – Ук95.
  6. Каляев, А. В. Многопроцессорные системы с программируемой архитектурой / Каляев А. В. – М. : Радио и связь, 1984. – 240 с.
  7. Баркалов, А. А. Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах / Баркалов А. А. – Донецк : РВА ДонНТУ, 2002. – 262 с.
  8. Соловьев, В. В. Проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем / Соловьев В. В. – М. : Горячая линия-Телеком, 2001. – 636 с.
- Стаття надійшла до редакції 10.10.2011.
- Ільяшенко М. Б., Голдобін О. О.  
**ВИРИШЕННЯ ЗАДАЧІ ПОШУКУ ІЗОМОРФІЗМУ ГРАФІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ОБЧИСЛЮВАТЕЛІВ**
- Пропонується вдосконалений алгоритм пошуку ізоморфізму графів та результати дослідження його ефективності. Об'єктом дослідження є множина граф-схем алгоритмів досягнення мети, що була отримана після обходу семантичної мережі, яка задана, за допомогою абстрактної машини Уоррена.
- Ключові слова:** декларативна логіка, предикат, дерево виводу, пролог, рекурсивний обхід із поверненням, граф-підграф ізоморфізм.
- Il'yashenko M. B., Goldobin A. A.  
**GRAPH-SUBGRAPH ISOMORPHISM PROBLEM SOLVING FOR DESIGNING SPECIAL COMPUTERS**
- An advanced algorithm for solving graphs isomorphism problem is proposed and experimental results of its efficiency are presented. Object of investigation is set of control flow graphs of solutions achieved, that were received after circumvent of the semantic network by Warren abstract machine.
- Key words:** declarative logic, predicate, O-Tree, Prolog, recursively returning, graph-subgraph isomorphism.

## СРАВНЕНИЕ ПО ЭФФЕКТИВНОСТИ СУПЕРБЛОКОВ НЕКОТОРЫХ СОВРЕМЕННЫХ ШИФРОВ

Излагается новая методика оценки показателей доказуемой безопасности блочных симметричных шифров. С применением этой методики выполняется анализ дифференциальных свойств суперблоков трех шифров: AES-а, уменьшенной версии шифра Мухомор и шифра MISTY1. Излагается оригинальная методика оценки максимального значения дифференциала уменьшенной модели двухциклического AES суперблока, и уточняется действительное значение этого максимума. Демонстрируется, что стойкость больших шифров и, в частности шифра Rijndael (AES-а) не зависит от дифференциальных показателей S-блоков, используемых в шифрах. Представляется как одно из перспективных решений по построению суперблоков преобразование F1 шифра MISTY1, которое примечательно тем, что реализует (за один цикл) дифференциальные свойства случайной подстановки соответствующей степени.

**Ключевые слова:** доказуемая безопасность, дифференциал, суперблок, случайнaя подстановка.

### ВВЕДЕНИЕ

В этой работе под суперблоком мы будем понимать функционально законченный узел шифра, включающий в себя композицию нескольких преобразований цикловой функции. В частности, в работах [1, 2] AES суперблоком названо отображение 4-х байтового массива  $a = [a_0, a_1, a_2, a_3]$  в 4-х байтовый массив  $e = [e_0, e_1, e_2, e_3]$ , принимающее 4-байтовый ключ  $k = [k_0, k_1, k_2, k_3]$ . Оно состоит из последовательности четырех преобразований:

**SubBytes**  $b_i = S[a_i]$ , с  $S$  являющимся AES S-блоком;

**MixColumns**  $c = M_b$ , с  $M_c$  являющейся 4 × 4 матрицей;

**AddRoundKey**  $d = c \oplus k$ , с  $k$  являющимся цикловым ключом;

**SubBytes**  $e_i = S[d_i]$ .

Авторами отмечается, что дифференциальные вероятности над этой структурой эквивалентны двум AES циклам и доказывается с использованием достаточно громоздких и сложных для понимания теоретических построений с привязкой к дифференциальным характеристикам S-блока AES, что точным значением максимальной ожидаемой дифференциальной вероятности ( $MEDP^1$ ) для AES суперблока является значение  $12,34 \times 2^{-32}$  (есть и варианты значения  $MEDP_{32} \approx 13,25 \times 2^{-32}$  [3]).

В итоге формируется граница для дифференциалов над AES, уменьшенному до четырех циклов, следующая из применения границы Хонга и др. [3]:

$$MEDP_{32} \leq \left( \max_{x \neq 0, y} DP(x, y) \right)^4$$

к мега блоку, что приводит к результату:

$$MEDP_{128} \leq (MEDP_{32})^4 \approx 1,881 \times 2^{-114}.$$

Имеются работы, где подобным же образом (с привязкой к свойствам S-блоков) выполняется оценка линейных показателей SPN шифров [4]. Этот подход к определению доказуемой стойкости блочных симметрических шифров (БСШ) уже давно вызывает у нас сомнение, так как полученные результаты привязываются к дифференциальным и линейным свойствам S-блоков, используемых в шифрах, что, как показывают наши эксперименты, методически оказывается не верным. Не вызывает удовлетворения и сама методика определения показателей доказуемой стойкости БСШ в виде максимумов средних значений дифференциальных и линейных вероятностей ( $MADP$  и соответственно  $MALP$ ).

Мы далее обоснуем свою позицию к определению показателей доказуемой стойкости БСШ, и, в частности, дифференциальных показателей AES суперблока, приведем сравнение для него значений  $MADP$  и оценок, полученных с использованием предлагаемого подхода, и заодно обсудим дифференциальные свойства суперблоков еще двух конструкций, где под суперблоками, как уже отмечено выше, будут пониматься функционально обособленные элементы цикловых преобразований других шифров.

### 1. ПОНЯТИЙНЫЙ АППАРАТ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО И ЛИНЕЙНОГО КРИПТОАНАЛИЗА

Напомним сначала, следя за работой [4], понятийный аппарат линейного и дифференциального криптоанализа.

<sup>1</sup> В ряде работ наряду с аббревиатурой  $MEDP$  (максимум ожидаемой дифференциальной вероятности) используется обозначение  $MADP$  (максимум среднего значения дифференциальной вероятности)

**Определение 1.** (Дифференциальная и Линейная вероятность): Дифференциальная вероятность  $DP^f$  и линейная вероятность  $LP^f$  соответственно для ключезависимой функции  $f$  с  $n$ -битным входом  $x$  и  $n$ -битным выходом  $y$  ( $x, y \in GF(2^n)$ ) есть:

$$DP^f(\Delta x \rightarrow \Delta y) = \frac{\#\{x \in GF(2)^n \mid f(x) \oplus f(x \oplus \Delta x) = \Delta y\}}{2^n},$$

$$LP^f(\Gamma x \rightarrow \Gamma y) = \left( \frac{\#\{x \in GF(2)^n \mid x \cdot \Gamma x = f(x) \cdot \Gamma y\}}{2^{n-1}} - 1 \right)^2,$$

где  $\Delta x$  и  $\Delta y$  является входной и выходной разностями, а  $\Gamma x$  и  $\Gamma y$  является входной и выходной масками;  $x \cdot \Gamma x$  обозначает результат скалярного произведения  $x$  и  $\Gamma x$ .

**Определение 2.** ( $DP_{\max}^f$  и  $LP_{\max}^f$ ): Максимальным значением дифференциальной и линейной вероятности для ключезависимой функции  $f$  называется соответственно:

$$DP_{\max}^f = \max_{\Delta x \neq 0, \Delta y} DP^f(\Delta x \rightarrow \Delta y),$$

$$LP_{\max}^f = \max_{\Gamma x, \Gamma y \neq 0} LP^f(\Gamma x \rightarrow \Gamma y).$$

Напомним теперь выражения для средних вероятностей  $ADP$ ,  $ALHP$ ,  $MADP$  и  $MALHP$  ключезависимой функции  $f = f[k](x)$  с  $n$ -битным входом  $x$  и  $n$ -битным выходом  $y \in GF(2^n)$ , которая параметризована ключом  $k$ , используемые во многих публикациях по обоснованию показателей стойкости блочных шифров.

**Определение 3.** Средним значением дифференциальной вероятности ( $ADP$ ) функции  $f[k](x)$  является:

$$ADP^f = \text{ave}_{k} DP^{f[k]}(\Delta x \rightarrow \Delta y).$$

**Определение 4.** Средним значением вероятности линейной оболочки ( $ALHP$ ) функции  $f = f[k](x)$  является:

$$ALHP^f = \text{ave}_k LP^{f[k]}(\Gamma x \rightarrow \Gamma y).$$

**Определение 5.** Максимумом среднего значения дифференциальной вероятности ( $MADP$ ) и максимумом среднего значения вероятности линейной оболочки ( $MALHP$ ) функции  $f[k](x)$  есть:

$$MADP^f = \max_{\Delta x \neq 0, \Delta y} ADP^f(\Delta x \rightarrow \Delta y),$$

$$MALHP^f = \max_{\Gamma x, \Gamma y \neq 0} ALHP^f(\Gamma x \rightarrow \Gamma y).$$

Из приведенных определений видно, что приведенные показатели определяются максимумом среднего значения дифференциальной вероятности для некоторого

фиксированного перехода входной разности  $\Delta x$  в выходную разность  $\Delta y$ , и максимумом среднего значения смещения для маски входа  $\Gamma x$  и маски выхода  $\Gamma y$ . Эти показатели представляют собой далеко не максимально возможные значения дифференциальных и линейных вероятностей, которые по идеи и должны рассматриваться как показатели доказуемой безопасности.

Новая точка зрения к формированию оценок стойкости БСШ к атакам дифференциального и линейного криптоанализа, которая формализуется как два новых метода, состоит в следующем.

Предлагается для оценки стойкости БСШ к атакам дифференциального и линейного криптоанализа пользоваться не  $MADP$  и  $MALHP$ , а средними (по множеству ключей) значениями максимумов дифференциальных и линейных вероятностей ключезависимой функции  $f[k](x)$ , а именно  $AMDP$  и  $AMLHP$ .

**Определение 6.** ( $AMDP$ ). Среднее (по множеству из  $2^h$  ключей) значение максимальных дифференциальных вероятностей ключезависимой функции  $f[k](x)$  есть:

$$AMDP^f = \text{ave}_k DP_{\max}^{f[k]} = \frac{1}{2^h} \sum_{k=1}^{2^h} DP_{\max}^{f[k]}.$$

**Определение 7.** ( $AMLP$ ). Среднее (по ключам) значение максимальных вероятностей линейных оболочек функции  $f[k](x)$  есть:

$$AMLP^f = \text{ave}_k LP_{\max}^{f[k]}(\Gamma x \rightarrow \Gamma y) = \frac{1}{2^h} \sum_{k=1}^{2^h} LP_{\max}^{f[k]}.$$

В обоих случаях  $2^h$  – мощность множества ключей зашифрования, использованных при вычислениях.

Здесь можно отметить сразу, что очевидны неравенства:  $MADP^f < AMDP^f$ ,  $MALHP^f < AMLHP^f$ .

Помимо большей адекватности формируемых оценок (значение оценок для шифров совпадают с соответствующими дифференциальными и линейными показателями случайных подстановок и характеризуют максимально достижимые значения дифференциальных и линейных вероятностей), в последнем случае обеспечиваются и значительные вычислительные преимущества (нет необходимости запоминать полностью все таблицы, а достаточно только определять и помнить их максимальные значения).

## 2. ОБ УЧАСТИИ S-БЛОКОВ В ФОРМИРОВАНИИ МАКСИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ШИФРОВ

Наши исследования с уменьшенными версиями многих шифров показали, что значения максимумов полных дифференциалов и линейных корпусов, которыми оцениваются показатели стойкости шифров к атакам дифференциального и линейного криптоанализа, зави-

сят не от показателей  $S$ -блоков, используемых в шифрах, а от дифференциальных и линейных показателей случайных подстановок соответствующей степени, к которым асимптотически приходят шифры после определенного начального числа циклов шифрования.

Для иллюстрации этого положения ниже предлагаются результаты исследований дифференциальных свойств 16-битной модели шифра Rijndael [5]. Для таких размеров входных блоков данных вычислительных ресурсов вполне достаточно, чтобы построить целиком таблицу XOR переходов (полных дифференциалов) сразу для всего шифра.

В табл. 1 представлены зависимости средних значений максимумов полных дифференциалов ( $AMDP \times 2^{16}$ ) шифров, использующих  $S$ -блоки с различными значениями  $DP_{\max}^S = p$  ( $\delta$ -равномерности), от числа циклов  $r$  алгоритма Baby-Rijndael с операцией MixColumns на весь текст (как раз преобразование, являющееся основой структуры названной выше AES суперблоком).

Результаты, представленные в табл. 1, ярко иллюстрируют, что показатели стойкости шифров не зависят от применяемых в них  $S$ -блоков. Они определяются, как показано и в ряде других наших работ [6–8 и др.], значениями максимумов таблиц XOR разностей и смещений таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок соответствующей степени. У нас, правда, сразу нашлось много оппонентов, которые нас стали убеждать, что то, что свойственно малым шифрам, может не выполняться для их больших прототипов. Однако, последние наши исследования с большими шифрами [9–10] свидетельствуют о том, что и большие шифры также ведут себя как случайные подстановки, т.е. наша позиция является правильной.

В результате свойства AES суперблока не являются решающими для определения показателей доказуемой безопасности шифра Rijndael. Мы, тем не менее, далее рассмотрим дифференциальные свойства этого и других, близких к нему преобразований, с целью совершенствования и развития самой методики определения введенных выше новых показателей к оценке стойкости шифрующих преобразований (шифров) и сравнения их со старыми подходами.

## 2. ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ДВУХЦИКЛОВОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛА AES СУПЕРБЛОКА

Ниже предлагаются результаты вычислительных экспериментов по определению  $AMDP$  и  $MADP$  AES суперблока.

**Таблица 1.** Значения полного дифференциала ( $AMDP \times 2^{16}$ ) для различных  $S$ -блоков и количества циклов алгоритма Rijndael с операцией MixColumns на весь текст

$Sbox$ $r$	$Sbox$ , Сл $p4F2$	$Sbox$ , $p4$ Лабир.	$Sbox$ AES $p4$	$Sbox$ $p6F0$	$Sbox$ $p6 F2$	$Sbox$ DES $p8$	$Sbox$ $p8 F0$	$Sbox$ $p12 F0$
1	16384,00	16384,00	16384,00	24576,00	24576,00	32768,00	32768,00	49152,00
2	83,87	132,00	132,00	490,87	230,40	1152,00	1536,00	5184,00
3	20,73	<b>19,47</b>	<b>18,80</b>	25,53	35,27	70,87	139,13	146,13
4	<b>19,60</b>	18,73	19,00	<b>19,20</b>	<b>18,93</b>	<b>19,27</b>	<b>23,93</b>	<b>19,07</b>
5	19,13	19,47	19,47	18,93	19,40	19,00	23,87	19,00

Конечно же, построить всю таблицу дифференциальных разностей для AES суперблока, также как и подстановки степени  $2^{32}$ , не удается (не хватает вычислительных возможностей), но вполне достаточно имеющихся вычислительных ресурсов для построения закона распределения переходов отдельной строки таблицы XOR разностей.

Результаты решения этой задачи и представляются в табл. 2.

В правой колонке таблицы мы для сравнения представили закон распределения переходов в строке случайной подстановки степени  $2^{32}$  (строка AES суперблока не «дотягивает» до строки случайной подстановки степени  $2^{32}$ ). Отметим здесь, что результаты для отдельных ключей практически не зависят от ключевого материала, т.е. в качестве оценки может выступать дифференциал, рассчитанный для отдельного ключа (это еще одно из достоинств развивающегося подхода).

Как следует из представленных данных значение максимума строки дифференциальной таблицы AES суперблока для выбранного входа равно 32. Это значит, что для всей дифференциальной таблицы ожидаемое значение максимума будет не менее 64-х, что существенно больше значения 12, 34, пропагандируемого в отмеченных ранее зарубежных публикациях (в последующих экспериментах нам удалось найти переход со значением 40).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ожидаемое максимальное значение двухциклового

**Таблица 2.** Распределение переходов одной строки таблицы XOR-разностей AES суперблока ( $AMDP \times 2^{16}$ ) для входа (в строку) 010101, безключевой вариант

Значение перехода	Число переходов в строке AES супер блока	Число переходов в строке подстановке степени $2^{32}$
0	2605143438	2605070418
2	1302455376	1302484861
4	325637706	325626184
6	54254936	54271858
8	6794838	6784085
10	679254	678418
12	61352	56535
14	4021	4038
16	1543	252
18	13	14
20	291	1
24	52	
28	8	
32	4	

дифференциала большого AES супер блока ( $AMDP \times 2^{32}$ ) должно быть больше максимального значения дифференциальной таблицы случайной подстановки степени  $2^{32}$  равного 34.

В другом эксперименте мы для входа 010101 нашли максимальное значение строки дифференциальной таблицы AES суперблока. Оно оказалось равным 32. А затем для найденного максимального перехода  $\Delta x = 10101 \rightarrow \Delta y = 661E0000$  были вычислены значения переходов при других значениях ключа. В табл. 3 представлены числа переходов, полученные для 30-ти случайно выбранных ключей зашифрования.

В соответствии с этими данными получено значение  $MADP$  для строки AES супер блока:

$$MADP(010101, 661E0000) \times 2^{16} = 7,86.$$

Для всей дифференциальной таблицы AES суперблока следует ожидать значение максимума в районе 15,72, что несколько больше значения 12,34, используемого в работах по оценке доказуемой безопасности шифра Rijndael (AES). Другое среднее значение  $MADP \times 2^{16}$  максимального перехода для входа 010101 в AES получилось равным 8,76. Но дело не в этих небольших разницах в оценках значений  $MADP$  для AES суперблока. Получается, что приведенные в публикациях результаты являются, говоря мягко, не совсем точными. Самое главное это то, что эти значения не связаны с действительными значениями доказуемой стойкости шифров, как это считается в затронутых публикациях.

В табл. 4 мы приводим результаты исследования 16-битной версии SL преобразования шифра Мухомор [11] (практически изучаются показатели уменьшенной модели самого AES суперблока). В таблице представлены результаты экспериментов по построению законов распределения переходов дифференциальной таблицы SL преобразования.

Видно, что второй цикл является достаточно сложным для рассматриваемого преобразования. Приведем

**Таблица 3.** Числа переходов ( $AMDP \times 2^{16}$ ) входа 010101 в один и тот же выход 661E0000 для 30-ти случайно выбранных ключей зашифрования

Ключ зашифрования	Значение перехода	Ключ зашифрования	Значение перехода
10C9AA38	32	7E0ACAA68	8
EF34B4F6	4	42DC38BF	0
522F3364	16	F21B574C	8
73B2CD8B	8	6F00601B	16
3BB11EC5	16	59ED7EE9	4
6C1A60C7	0	9F86B693	4
21F6E7E9	0	72569299	4
2FB26869	12	358F25B0	4
3888589D	8	4848E2BE	4
27A47122	4	A0A2430D	16
178448CA	4	437C58F9	8
C0D90AAE	16	3C30A2B6	4
7CCD5C0D	4	ECA05DB8	12
B202E14F	4	AEA79D44	8
A5C7A90C	0	DFE9D423	12
	4		

свои соображения по подсчету максимума дифференциальной таблицы для AES суперблока (для двух циклов шифрования AES).

При прохождении разностей пар входных блоков через первый цикл ( $S$ -блоки и преобразование MixColumn) наибольшая вероятность перехода  $\Delta X \rightarrow \Delta Y$  обеспечивается при одном активном  $S$ -блоке. На его входе при прохождении по всем  $2^{16}$  возможным значениям входных разностей каждая фиксированная разность повторяется  $2^{16} / 2^4 = 2^{12}$  раз. Линейное преобразование тирализует каждую разность на все четыре входа  $S$ -блоков следующего цикла. Если  $S$ -блок имеет значение  $\delta$ -равномерности  $\delta = 4$  (для  $S$ -блока AES), то на выходе первого цикла будет зафиксирован переход с максимальным значением  $\delta \cdot 2^{12}$  (для AES это будет  $2^{14}$ ), причем если  $S$ -блок имеет 15 максимальных переходов  $\delta = 4$ , то на выходе первого цикла будет 60 значений  $2^{14} = 16384$  (см. табл. 2).

На следующем цикле в прохождении разностей будут участвовать уже все четыре  $S$ -блока (второго цикла). Одна и та же разность на входе линейного преобразования сформирует повторяющиеся 16384 раза значения разностей (различных) на входах  $S$ -блоков второго цикла. А это значит, что, проходя  $S$ -блоки второго цикла, разные пары входов (после сложения с ключевыми битами) для разных  $S$ -блоков дадут разные значения выходных разностей со своими показателями прохождения (для AES  $S$ -блока это будут в подавляющем большинстве двойки). Заметим теперь, что ненулевые входные разности будут давать только ненулевые выходные разности. По статистике  $S$ -блоки имеют около 40 процентов ненулевых переходов (AES полубайтовый  $S$ -блок имеет 120 нулей в дифференциальной таблице без учета нулевой строки и нулевого столбца), т.е. из всего множества  $2^4 - 1 = 15$  возможных ненулевых значений выходов для полубайтового  $S$ -блока в строке таблицы может быть реализовано только  $15 \cdot 0,47 = 7$  различных ненулевых выходов.

Итак, нам нужно подсчитать число ситуаций, когда на выходах четырех  $S$ -блоков второго цикла будет одинаковое число совпадающих выходных разностей. Пусть мы зафиксировали одну (любую) из выходных (ненулевых) разностей первого  $S$ -блока. К этой разности мы можем выбрать одну из 6 возможных ненулевых разностей с выхода второго  $S$ -блока, так что вероятность получить набор из двух фиксированных значений разностей будет равна  $\frac{1}{7}$ . К этим двум разностям можно добавить еще одну из разностей с выхода третьего  $S$ -блока.

Вероятность такой тройки (композиции) будет  $\left(\frac{1}{7}\right)^2$ . Наконец, к выбранной тройке можно добавить разность с выхода четвертого  $S$ -блока, и вероятность выбора этой четверки будет, по аналогии с предыдущим, равна  $\left(\frac{1}{7}\right)^3$ .

**Таблиця 4.** Распределение числа переходов дифференциальной таблицы SL преобразования шифра Мухомор в зависимости от числа циклов шифрования

Количество переходов для ячейки	Число ячеек $S_2(\text{Baby}R)$ , 1 цикл	Количество переходов для ячейки	Число ячеек $S_2(\text{Baby}R)$ , 2 цикла	Количество переходов для ячейки	Число ячеек $S_2(\text{Baby}R)$ , 3 цикла
0	4168654065	<b>0</b>	2632290711	<b>0</b>	2605108264
16	65610000	<b>2</b>	1263628451	<b>2</b>	1302316781
32	43740000	<b>4</b>	329970420	<b>4</b>	325638830
64	10935000	<b>6</b>	56464541	<b>6</b>	54301413
128	4131000	<b>8</b>	10545896	<b>8</b>	6796804
256	1508625	<b>10</b>	1165323	<b>10</b>	678225
512	243000	<b>12</b>	324071	<b>12</b>	56663
1024	62100	<b>14</b>	20706	<b>14</b>	4390
2048	16200	<b>16</b>	379822	<b>16</b>	364
4096	1350	<b>18</b>	28307	<b>18</b>	21
8192	360	<b>20</b>	39641	<b>20</b>	5
16384	60	<b>22</b>	1296		
		<b>24</b>	7016		
		<b>26</b>	215		
		<b>28</b>	449		
		<b>32</b>	25940		
		<b>34</b>	3133		
		<b>36</b>	4032		
		<b>38</b>	176		
		<b>40</b>	442		
		<b>44</b>	36		
		<b>48</b>	4		
		<b>64</b>	790		
		<b>66</b>	144		
		<b>68</b>	166		
		<b>72</b>	20		
		<b>128</b>	8		
		<b>132</b>	4		
Время, с	192	Время, с	350	Время, с	509

Итак, с помощью четырех  $S$ -блоков мы можем получить фиксированный набор из четырех разностей (одинаковых

или разных) с вероятностью  $p = \left(\frac{1}{7}\right)^3$  и любой другой отличающейся от выбранной четверки набор из четырех раз-

ностей с вероятностью  $p - 1 = 1 - \left(\frac{1}{7}\right)^3$ . В результате мож-

но считать, что мы имеем дело с двумя событиями, подчиняющимися биномиальному закону: одно событие – появление четверки разностей совпадающей с выбранной (вероятность такого события), другое – появление четверки разностей не совпадающей с выбранной (вероятность этого события). Для выборки  $2^{14} = 16384$  таких независимых исходов среднее число совпадающих четверок выходных разностей в таком случайному эксперименте будет равно математическому ожиданию биномиального распределения, т. е.

$$2^{14} \cdot \left(\frac{1}{7}\right)^3 = 47,7.$$

Но этот результат является, конечно, оценкой снизу. Реальные значения (с учетом особенностей  $S$ -блоков,

значений максимумов переходов, их распределения по таблице и других показателей) будут в общем случае существенно более высокими (в нашем примере имеется минимальное значение 83,87 и максимальное 5184).

### 3. СУПЕР БЛОК MISTY1

Мы выделили еще одну криптографическую функцию, заслуживающую внимания. Это FI подстановка в шифре MISTY1, являющаяся еще одним из финалистов конкурса NESSIE.

Алгоритм MISTY1 разработан в 1995–1996 гг. командой специалистов под руководством известного криптолога Мицуро Мацуи (Mitsuru Matsui) из компании Mitsubishi Electric (Япония) [12]. Он имеет весьма необычную структуру – основан на «вложенных» сетях Фейстеля. Сначала 64-битный шифруемый блок данных разбивается на два 32-битных субблока, после чего выполняется  $r$ -циклов преобразований, имеющих ярко выраженную трехуровневую вложенную структуру. Рекомендуемым количеством раундов алгоритма является 8, но количество раундов алгоритма может быть любым, превышающим 8 и кратным четырем.

Мы не будем здесь приводить описание этой оригинальной конструкции, а интересующихся отправим к

оригинальной разработке [12]. Нас будет интересовать «кирпичики» – преобразования FI этой достаточно сложной конструкции, из которых строится цикловая функция. Ее структуру иллюстрирует рис. 1.

FI также (как и основная конструкция шифра) представляет собой сеть Фейстеля, но в шифре MISTY1 это преобразование осуществляет уже третий уровень вложенности. В отличие от сетей Фейстеля на двух верхних уровнях, данная сеть является несбалансированной: обрабатываемый 16-битный фрагмент делится на две части: 9-битную левую и 7-битную правую. Затем выполня-

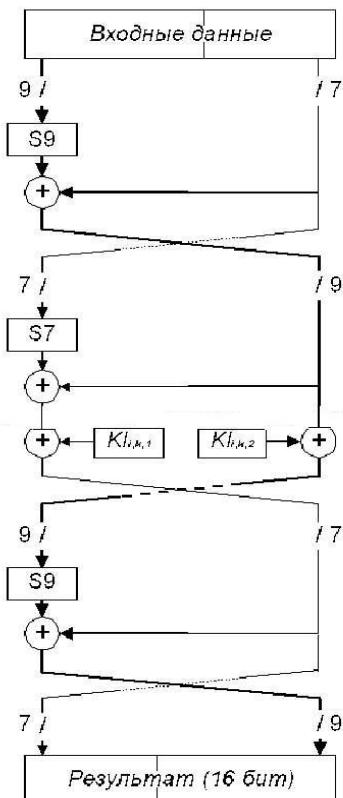


Рис. 1. Структура функции FI

ются 3 раунда преобразований, которые состоят из следующих действий:

1. Левая часть «прогоняется» через таблицу замен. 9-битная часть (в раундах 1 и 3) обрабатывается таблицей подстановки  $S_9$ , а 7-битная (в раунде 2) – таблицей подстановки  $S_7$ . Сами таблицы приведены в описании шифра [12].

2. На левую часть операцией XOR накладывается текущее значение правой части. При этом, если справа 7-битная часть, она дополняется нулями слева, а у 9-битной части удаляются слева два бита.

3. Во втором раунде на левую часть операцией XOR накладывается фрагмент ключа раунда  $KI_{i,k,1}$ , а на правую – фрагмент  $KI_{i,k,2}$ . В остальных раундах эти действия не выполняются.

4. Левая и правая части меняются местами.

Будем рассматривать функцию FI как суперблок. Сравним свойства этого суперблока с суперблоком AES рассмотренным ранее.

Как видно из представленных данных в рассматриваемом случае мы сразу (за один цикл) получаем закон распределения близкий к закону распределения переходов дифференциальной таблицы случайной подстановки 16-ой степени. Это преобразование на выходе сразу реализует асимптотическое значение максимума полного дифференциала (правда, это достигается внутренней трехциклической структурой преобразования).

Отметим здесь, однако, что наши эксперименты с совершенными S-блоками, так мы называли S-блоки, обладающими показателями случайных S-блоков (имеющими законы распределения числа инверсий, возрастаний и циклов, а также законы распределения переходов XOR таблиц и смещений таблиц линейных аппроксимаций, повторяющие соответствующие теоретические законы), показывают, что они ведут себя также как и другие применяемые в шифрах случайные или не случайные S-блоки, т.е. их применение не приводит к заметному улучшению характеристик сходимости шифров к асимптотическому значению максимума полного дифференциала. Поэтому вопрос об эффективности использования при

**Таблица 5.** Значения переходов дифференциальной таблицы супер блока MISTY1 для различных значений ключа зашифрования

Кол-во переходов в ячейке	Число ячеек Ключ 0x0000:	Число ячеек Ключ 0xFF00:	Число ячеек Ключ 0x0F0F:	Число ячеек Ключ 0x1234:	Число ячеек Ключ 0x1111:	Число ячеек Ключ 0xAAAA:
0	2605549364	2605492361	2605539766	2605527119	2605516029	2605520863
2	1300024352	1300109653	1300032540	1300064477	1300064802	1300060159
4	328372588	328366110	328380339	328359715	328384633	328378643
6	53631298	53614855	53627998	53624362	53618333	53624945
8	6564176	6560111	6562427	6566955	6558540	6557969
10	639805	638633	638937	639359	639510	639068
12	50994	50888	50481	50617	50780	50904
14	3430	3414	3517	3406	3374	3447
16	208	193	210	209	212	212
18	9	7	10	5	11	15
20	1	0	0	0	1	0
22				10	0	0

построении шифров преобразований, обладающих показателями более близкими к показателям случайных подстановок, остается пока открытым. Очевидно, что основная компонента обеспечения случайности преобразования все-таки связана с реализацией механизма достаточно глубокого перемешивания обрабатываемых блоков данных внутри «тела» всего шифра – достижения статистической инвариантности распределения разностей на выходе преобразования от ключевых и текстовых битов.

## ВЫВОДЫ

Результатами работы следует считать выполненный анализ дифференциальных свойств суперблоков трех шифров: AES, мини Мухомора (SL преобразования этого шифра, как варианта уменьшенного AES суперблока) и шифра MISTY1.

И все же основным результатом является положение, в соответствии с которым свойства AES суперблока не являются решающими для определения показателей доказуемой безопасности шифра Rijndael.

Предложено вместо оценок максимумов средних значений дифференциальных и линейных вероятностей (*MADP* и *MALHP*) суперблоков и шифров рассматривать средние значения максимумов этих вероятностей (*AMDP* и *AMLHP*), как более адекватно характеризующих потенциальные возможности в реализации максимумов дифференциальных и линейных показателей шифрующих преобразований. Эти оценки в несколько раз превышают значения *MADP* и *MALHP* и позволяют получить более точные результаты.

В процессе этого анализа разработана уточненная методика оценки максимального значения дифференциала ( $AMDP \times 2^{-32}$ ) двухциклового AES суперблока. В качестве более точной оценки вероятности максимального значения двухциклового дифференциала (*AMDP*) обосновано значение  $48/2^{32}$  (сегодня эксперименты уже дали результат  $80/2^{32}$ ). Показано, что стойкость больших шифров и, в частности, шифра Rijndael (AES-а) не зависит от дифференциальных (и линейных) показателей *S*-блоков, используемых в шифрах. В соответствии с нашими результатами она определяется соответствующими характеристиками случайных подстановок, к которым приходит каждый шифр при увеличении числа циклов шифрования [13].

Представлено как одно из перспективных решений по построению суперблоков (криптографических примитивов) преобразование FI шифра MISTY1. Это преобразование реализует за один цикл (состоящий из последовательности трех простых преобразований) дифференциальные показатели, характерные для случайной подстановки соответствующей степени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Computational aspects of the expected differential probability of 4-round AES and AES-like ciphers / M. Lamberger, J. Daemen, N. Pramstaller et al // Abstract – 8<sup>th</sup> Central European Conference on Cryptography 2008. Computing – 2009. – Pp. 85–104. DOI 10.1007/s00607-009-0034-y.

- Daemen, J. ‘Understanding two-round differentials in AES’ / J. Daemen, V. Rijmen // Proc. Security and Cryptography for Networks (SCN 2006), LNCS, 4116, edited by De Prisco, R., and Yung, M., (Springer). – 2006. – Pp. 78–94.*
- Keliher, L. Exact maximum expected differential and linear probability for 2-round advanced encryption standard (AES) / L. Keliher, J. Sui // Cryptology ePrint archive Report 2005/321. – 2005. – <http://eprint.iacr.org>.*
- Sano, F. On the Security of Nested SPN Cipher against the Differential and Linear Cryptanalysis / Sano, K., Ohkuma, H., Shimizu, S., Kawamura / IEICE Trans. Fundamentals, January 2003. – vol. E86-a, NO.1. – Pp. 37–46.*
- Долгов, В. И. Вариации на тему шифра Rijndael / В. И. Долгов, И. В. Лисицкая, А. В. Казимиров // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – Т.9, №3. – С. 321–325.*
- Криптографические свойства уменьшенной версии шифра «Мухомор» / И. В. Лисицкая, О. И. Олешко, С. Н. Руденко [та ін.] // Спеціальні телекомуникаційні системи та захист інформації. Збірник наукових праць. – Київ. – 2010. – Вип. 2(18). – С. 33–42.*
- Кузнецов, А. А. Линейные свойства блочных симметричных шифров, представленных на украинский конкурс / А. А. Кузнецов, И. В. Лисицкая, С. А. Исаев // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – Т. 10, № 2. – С. 135–140.*
- Лисицкая, И. В. Об участии S-блоков в формировании максимальных значений линейных вероятностей блочных симметричных шифров / И. В. Лисицкая, В. В. Ковтун // Межведомственный научн. технический сборник «Радиотехника». – 2011. – Вып. 166. – С. 17–25.*
- Лисицкая, И. В. Большие шифры - случайные подстановки / И. В. Лисицкая, А. А. Настенко // Межведомственный научн. технический сборник «Радиотехника». – 2011. – Вып. 166. – С. 50–55.*
- Лисицкая, И. В. Дифференциальные свойства шифра FOX / И. В. Лисицкая, Д. С. Кайдалов // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – Т. 10, № 2. – С. 122–126.*
- Перспективний блоковий симетричний шифр «Мухомор» – основні положення та специфікація / І. Д. Горбенко, М. Ф. Бондаренко, В. І. Долгов [та ін.] // Прикладная радиоэлектроника. – 2007. – Том. 6, №2. – С. 147–157.*
- M. Matsui, «New block encryption algorithm Misty», Fast Software Encryption '97, LNCS 1267, E. Biham, Ed., Springer-Verlag. – 1997. – Pp. 64–74.*
- Новая идеология оценки стойкости блочных симметричных шифров к атакам дифференциального и линейного криптоанализа / И. Д. Горбенко, В. И. Долгов, И. В. Лисицкая, Р. В. Олейников // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – Т. 9, № 3. – С. 212–320.*

Стаття надійшла до редакції 23.02.2011.  
Після доробки 22.02.2012.

Лисицька І. В.

ПОРІВНЯННЯ ЗА ЕФЕКТИВНІСТЮ СУПЕРБЛОКІВ ДЕЯКИХ СУЧASNIX ШИФРІВ

Викладається нова методика оцінки показників доказової безпеки блокових симетричних шифрів. Із застосуванням цієї методики виконується аналіз диференціальних властивостей суперблоків трьох шифрів: шифру AES, зменшеної версії шифру Мухомор і шифру MISTY1. Викладаються результати обчислювальних експериментів по визначеню значень AMDP і MADP AES суперблоку. Демонструється, що стійкість великих шифрів і, зокрема шифру Rijndael (AES) не залежить від диференціальних показників S-блоків, викорис-

товуваних у шифрах. Представляється як одне з перспективних рішень з побудови суперблоку перетворення F1 шифру MISTY1, яке прimitно тим, що реалізує за один цикл диференціальні показники випадкової підстановки відповідного ступеня.

**Ключові слова:** доказова безпека, диференціал, суперблок, випадкова підстановка.

Lysytska I. V.

COMPARING oN EFFECTIVENESS OF SUPERBOXES  
some MODERN SIPHERS

New method of assessment indicators provable security block symmetric ciphers sets out. With application of this method are

analyzed for differential properties superblock three ciphers: cipher AES, the reduced version cipher Muromor and cipher MISTY1. The results of computational experiments to determine the values of AMDP and MADP AES superblock are presented. Demonstrated that the resistance of large ciphers and, in particular cipher Rijndael (AES) is independent of the differential properties of S-blocks used in the ciphers. It seems like one of the promising solutions for building superblocks transformation F1 cipher MISTY1, which is noteworthy that sells for one cycle of differential performance random permutation corresponding degree.

**Key words:** of provable security, differential, superblock, random permutation.

УДК 004.3

Баркалов А. А.<sup>1</sup>, Мальчева Р. В.<sup>2</sup>, Солдатов К. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, проф. Університета Зеленогурського (Польща)

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент Донецького національного технічного університета

<sup>3</sup>Аспірант Донецького національного технічного університета

## ОПТИМИЗАЦІЯ СХЕМЫ АВТОМАТА МУРА, РЕАЛИЗУЕМОЙ В БАЗІСЕ ПЛИС

В статье предлагается метод, предназначенный для уменьшения числа входных переменных и промежуточных термов в реализуемых системах булевых функций. Предложенный метод основан на расширении кодов состояний перехода и замене логических условий. Применение предложенного метода позволяет до 20 % уменьшить общее число макроячеек в блоках БЛУ и БФП.

**Ключевые слова:** автомат Мура, ПЛИС, ГСА, псевдоэквивалентные состояния, замена логических условий.

### ВВЕДЕНИЕ

Практически любая цифровая система включает в свой состав устройство управления (УУ) [1]. При реализации схем УУ часто используется модель микропрограммного автомата Мура [2]. В настоящее время программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) [3] широко применяются для реализации схем УУ. Существуют два основных класса ПЛИС: CPLD (Complex Programmable Logic Devices) и FPGA (Field-Programmable Gate Arrays) [4, 5]. Для уменьшения числа макроячеек ПЛИС в схеме УУ необходимо уменьшать число входных переменных и промежуточных термов в реализуемых системах булевых функций (СБФ) [6]. В настоящей работе предлагается метод решения этой задачи для микропрограммного автомата (МПА) Мура. Метод основан на расширении кодов состояний перехода и замене логических условий.

Целью исследований является оптимизация схемы МПА Мура за счет расширения кодов состояний перехода и замены логических условий.

Задачей исследований является разработка метода синтеза МПА Мура, позволяющего уменьшить число макроячеек ПЛИС в схеме автомата. При этом алгоритм управления представляется в виде граф-схемы алгоритма (ГСА) [1].

### ОБЩІЕ ПОЛОЖЕННЯ И ОСНОВНАЯ ІДЕЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

Пусть автомат Мура задан прямой структурной таблицей (ПСТ) со столбцами [1]:  $a_m, K(a_m), a_S, K(a_S), X_h, \Phi_h, h$ . Здесь  $a_m$  – исходное состояние МПА;  $K(a_m)$  – код состояния  $a_m \in A$  разрядности  $R_A = \lceil \log_2 M \rceil$ , для кодирования состояний используются внутренние переменные из множества  $T = \{T_1, \dots, T_{R_A}\}$ ;  $a_S, K(a_S)$  – соответственно состояние перехода и его код;  $X_h$  – входной сигнал, определяющий переход  $\langle a_m, a_S \rangle$ , и равный конъюнкция некоторых элементов (или их отрицаний) множества логических условий  $X = \{x_1, \dots, x_L\}$ ;  $\Phi_h$  – набор функций возбуждения триггеров памяти МПА, принимающих единичное значение для переключения памяти из  $K(a_m)$  в  $K(a_S)$ ,  $\Phi_h \subseteq \Phi = \{\phi_1, \dots, \phi_{R_A}\}$ ;  $h = 1, \dots, H$  – номер перехода. В столбце  $a_m$  записывается набор микропераций  $Y_q$ , формируемых в состоянии  $a_m \in A$ , где  $Y_q \subseteq Y = \{y_1, \dots, y_N\}$ ,  $q = 1, \dots, Q$ . Эта таблица является основой для формирования систем функций:

$$\Phi = \Phi(T, X), \quad (1)$$

$$Y = Y(T), \quad (2)$$

задающих логическую схему МПА. Системы (1)–(2) являются основой для реализации схемы МПА Мура, структура которой показана на рис. 1. Условимся обозначать этот МПА символом  $U_1$ .

В МПА  $U_1$  блок формирования функций возбуждения памяти (БФП) реализует систему (1). Блок формирования микроопераций (БФМ) реализует систему (2). Память состояний МПА реализуется на регистре (Рг), состоящем из  $D$ -триггеров [5]. По сигналу Start в Рг записывается нулевой код начального состояния  $a_1 \in A$ . По сигналу Clock содержимое Рг меняется в зависимости от функций (2).

При реализации схемы  $U_1$  в базисе FPGA схема БФП реализуется на элементах табличного типа (LUT, look-up table). Для реализации БФП используются встроенные блоки памяти (EMB, embedded memory block) [7, 8]. При реализации схемы  $U_1$  в базисе CPLD схема БФП реализуется на макроячейках программируемой матричной логики (PAL, programmable array logic). Для реализации схемы БФМ могут использоваться макроячейки PAL, либо внешние программируемые ПЗУ. Отметим, что существуют микросхемы CPLD, в которых имеются встроенные EMB. К таким CPLD относятся, например, микросхемы Delta 3K [9]. В данной статье мы рассматриваем случай реализации БФМ на программируемых ПЗУ, которые могут быть как встроенными, так и внешними.

Для оптимизации числа термов в системе (1) предлагается использовать наличие классов псевдоэквивалентных состояний автомата Мура [10]. Число блоков ППЗУ можно уменьшить, если входными переменными БФМ будут адресные разряды наборов микроопераций (НМО) [11]. Число входов схемы БФП можно уменьшить за счет замены логических условий  $X_l \in X$  некоторыми переменными  $P_g \in P$ , где  $|P| < |L|$  [2]. Все эти идеи положены в основу предлагаемого метода. Обозначим предлагаемый МПА символом  $U_2$ .

## МЕТОДСИНТЕЗА АВТОМАТА $U_2$

Одной из особенностей МПА Мура является наличие псевдоэквивалентных состояний [2], то есть состояний с одинаковыми переходами под воздействием одинаковых входных сигналов. Такие состояния соответствуют операторным вершинам [1] алгоритма управления, выходы которых связаны со входом одной и той же вершины алгоритма.

Пусть  $\Pi_A = \{B_1, \dots, B_l\}$  – разбиение множества  $A$  на классы псевдоэквивалентных состояний. Закодируем

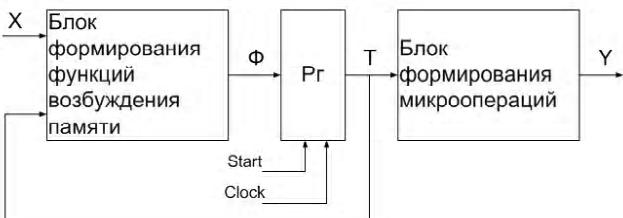


Рис. 1. Структурная схема МПА Мура  $U_1$

классы  $B_i \in \Pi_A$  двоичными кодами  $K(B_i)$  разрядности:

$$R_B = \lceil \log_2 I \rceil. \quad (3)$$

Пусть исходная ГСА  $\Gamma$  включает  $Q$  попарно различных наборов микроопераций (НМО)  $Y_q \subseteq Y$ . Закодируем набор  $Y_q$  двоичным кодом  $K(Y_q)$  разрядности:

$$R_Y = \lceil \log_2 Q \rceil. \quad (4)$$

Пусть операторная вершина  $b_l$  ГСА  $\Gamma$  соответствует состоянию  $a_m \in B_l$  и пусть в ней записан набор микроопераций  $Y_q$ . Тогда код состояния  $a_m \in A$  можно представить в виде конкатенации кодов:

$$K(a_m) = K(B_l) * K(Y_q), \quad (5)$$

где  $*$  – знак конкатенации.

Пусть  $X(a_m) \subseteq X$  – множество логических условий, определяющих переходы из состояния  $a_m \in A$ . Пусть  $L_m = |X(a_m)|$  и  $G = \max(L_1, \dots, L_m)$ . Тогда логические условия  $x_l \in X$  можно заменить некоторыми переменными  $P_g \in P$ , где  $|P| = G$  [12].

Пусть  $X(B_i) \subseteq X$  – множество логических условий, определяющих переходы из состояния  $a_m \in B_i$ , где  $B_i \in \Pi_A$ . В силу определения псевдоэквивалентных состояний справедливо равенство  $X(B_i) = X(a_m)$ , где  $a_m \in B_i$ . Таким образом, логические условия  $x_l \in X$  можно заменить переменными  $P_g \in P$  для классов состояний.

Представление кодов состояний в виде (5) и замена логических условий позволяет получить МПА Мура  $U_2$  (рис. 2), предлагаемый в данной работе. Как видно из рис. 2, автомат  $U_2$  включает блок замены логических условий (БЛУ) и блоки БФП и БФМ. Рассмотрим особенности модели  $U_2$ .

Блок БЛУ осуществляет замену логических условий  $x_l \in X$ . Для этого формируется система функций:

$$P = P(X, \tau). \quad (6)$$

Переменные  $\tau_R \in \tau$ , где  $|\tau| = R_B$ , используются для кодирования классов  $B_i \in \Pi_A$ .

Блок БФП реализует систему функций:

$$\Phi = \Phi(P, \tau). \quad (7)$$

Число функций системы (7) определяется как  $R_B + R_Y$ . Отметим, что в общем случае  $R_A < R_B + R_Y$ . Однако блок

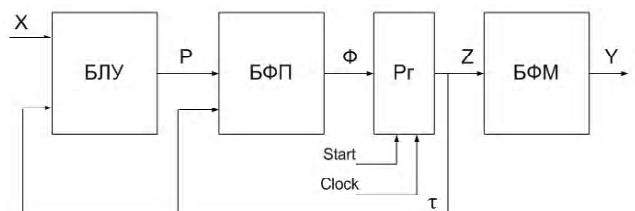


Рис. 2. Структурная схема МПА Мура  $U_2$

БФП в автомате  $U_1$  имеет  $R_A + L$  входов, а в автомате  $U_2$  – только  $R_B + G$ . Кроме того, переход к классам  $B_i \in \Pi_A$  позволяет значительно уменьшить число термов в функциях (7) по сравнению с (1).

Блок БФМ реализует систему функций:

$$Y = Y(Z), \quad (8)$$

где переменные  $z_R \in Z$  используются для кодирования наборов микроопераций. При этом  $|Z| = R_Y \leq R_A$ . Если выполняется условие:

$$R_Y < R_A, \quad (9)$$

то число блоков ППЗУ в схеме БФМ автомата  $U_2$  уменьшается в  $m$  раз, где:

$$m = 2^{R_A - R_Y}. \quad (10)$$

Сравнение автоматов  $U_1$  и  $U_2$  показывает, что автомат  $U_2$  обладает меньшим быстродействием. Это связано с наличием блока БЛУ. Таким образом, предлагаемый метод применим, если он обеспечивает заданное быстродействие управляемой цифровой системы.

Предлагаемый метод синтеза МПА Мура  $U_2$  по отмеченной ГСА  $\Gamma$  включает следующие этапы:

1. Формирование разбиения  $\Pi_A$  и кодирование классов  $B_i \in \Pi_A$ .
2. Формирование таблицы переходов МПА по системе обобщенных формул перехода.
3. Кодирование НМО и определение расширенных кодов состояний  $a_m \in A$ .
4. Формирование таблицы блока замены логических условий.
5. Формирование прямой структурной таблицы автомата  $U_2$ .
6. Формирование таблицы блока БФМ.
7. Реализация схемы автомата в заданном элементном базисе.

Рассмотрим пример применения предложенного метода.

## ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

Пусть для некоторой ГСА  $\Gamma_1$  получено разбиение  $\Pi_A$ , где  $\Pi_A = \{B_1, \dots, B_7\}$ . Пусть  $A = \{a_1, \dots, a_{18}\}$  и  $B_1 = \{a_1\}$ ,  $B_2 = \{a_2, \dots, a_6\}$ ,  $B_3 = \{a_7, a_8\}$ ,  $B_4 = \{a_9, \dots, a_{12}\}$ ,  $B_5 = \{a_{13}, a_{14}\}$ ,  $B_6 = \{a_{15}\}$ ,  $B_7 = \{a_{16}, a_{17}, a_{18}\}$ . Таким образом,  $M=18$ ,  $R_A=5$ ,  $I=7$ ,  $R_B=3$ . Пусть в ГСА  $\Gamma_1$  имеется  $Q=12$  попарно различных НМО, тогда  $R_Y=4$ . Закодируем наборы  $Y_q \subseteq Y$  тривиальным образом:  $K(Y_1)=0000$ ,  $K(Y_2)=0001$ ,  $\dots$ ,  $K(Y_{12})=1011$ . Закодируем классы  $B_i \in \Pi_A$  следующим образом:  $K(B_1)=000, \dots, K(B_7)=110$ . Пусть фрагмент системы обобщенных формул перехода [2] имеет следующий вид:

$$B_2 \rightarrow x_3 a_7 \vee \overline{x_3} x_4 a_9 \vee \overline{x_3} \overline{x_4} a_{14},$$

$$B_3 \rightarrow x_5 a_9 \vee \overline{x_5} x_6 a_{16} \vee \overline{x_5} \overline{x_6} a_{14}. \quad (11)$$

Система типа (11) является основой для построения таблицы переходов МПА, имеющей столбцы  $B_i, a_m, X_h, h$ . Здесь  $X_h$  – конъюнкция логических условий, определяющая переход из состояний  $a_S \in B_i$  в состояние  $a_m \in A$ ,  $h = \overline{1, H}$  – номер перехода. Для фрагмента (11) таблица переходов имеет 6 строк (табл. 1).

Связь табл. 1 и фрагмента (11) очевидна. Пусть в состоянии  $a_7$  формируется НМО  $Y_3$ , в состоянии  $a_9 - Y_5$ , в состоянии  $a_{14} - Y_8$ , в состоянии  $a_{16} - Y_6$ . Это позволяет определить расширенные коды данных состояний:  $K(a_7)=0100010$ ,  $K(a_9)=0110100$ ,  $K(a_{14})=1000111$ ,  $K(a_{16})=1100101$ . В этих кодах первые три разряда совпадают с кодом  $K(B_j)$ , где  $a_m \in B_i$ , а последние четыре разряда определяются кодом НМО.

Пусть для ГСА  $\Gamma_1$   $L=14$ , при этом  $X(B_1)=\{x_1, x_2\}$ ,  $X(B_2)=\{x_3, x_4\}$ ,  $X(B_3)=\{x_5, x_6\}$ ,  $X(B_4)=\{x_1, x_5, x_7\}$ ,  $X(B_5)=\{x_8, x_9, x_{10}\}$ ,  $X(B_6)=\{x_3, x_{11}, x_{12}\}$ ,  $X(B_7)=\{x_{13}, x_{14}\}$ . Как следует из анализа этих множеств  $G=3$  и  $P=\{p_1, p_2, p_3\}$ . Таблица блоков БЛУ имеет 7 строк и 4 столбца (табл. 2).

Из табл. 2 следует система (6). Например, из анализа столбца  $P_1$  можно получить функцию:

$$P_1 = x_1 (B_1 \vee B_4) \vee x_3 (B_2 \vee B_6) \vee x_8 B_5.$$

Используя коды классов  $B_i \in \Pi_A$  можно получить окончательное выражение:

$$P_1 = x_1 \overline{\tau_1} \overline{\tau_2} \overline{\tau_3} \vee x_1 \overline{\tau_1} \tau_2 \tau_3 \vee x_3 \overline{\tau_1} \tau_2 \tau_3 \vee x_3 \tau_1 \overline{\tau_2} \tau_3 \vee x_8 \tau_1 \tau_2 \tau_3.$$

Отметим, что подобные функции тривиально реализуются на мультиплексоре [12]. Как известно, мультиплексор является стандартным библиотечным элементом САПР [7–9].

Прямая структурная таблица МПА  $U_2$  строится, как расширение таблицы переходов столбцами  $K(B_j)$ ,  $K(a_m)$ ,  $\Phi_h$  и заменой столбца  $X_h$  столбцом  $P_h$ . В столбце  $\Phi_h$  записываются функции  $D_r \in \Phi$ , принимающие единичные значения на  $h$ -м переходе МПА. Для нашего примера табл. 1 преобразуется в табл. 3 тривиальным образом.

**Таблица 1.** Фрагмент таблицы переходов автомата Мура

$B_i$	$a_m$	$X_h$	$h$	$B_i$	$a_m$	$X_h$	$h$
$B_2$	$a_7$	$x_3$	1	$B_3$	$a_9$	$x_5$	4
	$a_9$	$\overline{x_3} x_4$	2		$a_{16}$	$\overline{x_5} x_6$	5
	$a_{14}$	$x_3 \overline{x_4}$	3		$a_{14}$	$\overline{x_5} x_6$	6

**Таблица 2.** Таблица блока замены логических условий

$B_i$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$i$	$B_i$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$i$
$B_1$	$x_1$	$x_2$	–	1	$B_5$	$x_8$	$x_9$	$x_{10}$	5
$B_2$	$x_3$	$x_4$	–	2	$B_6$	$x_3$	$x_{11}$	$x_{12}$	6
$B_3$	–	$x_5$	$x_6$	3	$B_7$	–	$x_{13}$	$x_{14}$	7
$B_4$	$x_1$	$x_5$	$x_7$	4	–	–	–	–	–

**Таблиця 3.** Фрагмент прямої структурної таблицы МПА  $U_2$ 

$B_i$	$K(B_i)$	$a_m$	$K(a_m)$	$P_h$	$\Phi_h$	$h$
$B_2$	001	$a_7$	0100010	$P_1$	$D_2D_6$	1
		$a_9$	0110100	$\overline{P}_1P_2$	$D_2D_3D_5$	2
		$a_{14}$	1000111	$\overline{P}_1\overline{P}_2$	$D_1D_5D_6D_7$	3
$B_3$	010	$a_9$	0110100	$P_2$	$D_2D_3D_5$	4
		$a_{16}$	1100101	$\overline{P}_2P_3$	$D_1D_2D_5D_7$	5
		$a_{14}$	1000111	$\overline{P}_2\overline{P}_3$	$D_1D_5D_6D_7$	6

Ця таблиця є основою для формування системи (7). Так, з урахуванням мінімізації, з табл. 3 можна отримати функцію:

$$D_1 = \overline{\tau_1} \tau_2 \tau_3 \overline{P_1} P_2 \vee \tau_1 \tau_2 \tau_3 \overline{P_2}.$$

Таблиця блока БФМ будується тривіальним способом, і цей етап в данній статті не розглядається. Последній етап метода пов'язаний з застосуванням промислових САРП фірм-виробників ПЛИС [7–9]. Цей етап ми також тут не розглядаємо.

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

Предложенний метод дозволяє гарантовано зменшити кількість переходів МПА Мура до величини цього параметра еквівалентного автомата Мілі. При цьому відповідно зменшується кількість термів в функціях возбудження пам'яті МПА.

Використання метода заміни логіческих умов дозволяє зменшити кількість входних змінних в функціях возбудження пам'яті. Це особо важно для мінімізації кількості LUT-елементів при реалізації схеми на ПЛИС типу FPGA.

Представлення кода состояння в виде конкатенации кодов класов псевдоеквівалентних состояній і наборів микрооперацій може привести до збільшення розрядності кода состояння. Однак при виконанні умов (9) таке представлення дозволяє зменшити кількість блоків пам'яті в схемі формування микрооперацій. Крім того, предложенное представление дозволяє замінити класи так, щоб оптимізувати кількість макроячеек в блокі заміни логіческих умов.

Проведені авторами дослідження показали, що застосування предложенного метода дозволяє до 20 % зменшити загальне кількість макроячеек в блоках БЛУ і БФП по порівнянню з цим параметром для блока БВП автомата  $U_1$ . Крім того, кількість блоків пам'яті в БФМ практично завжди зменшується в два рази. Отже, застосування цього метода дозволяє зменшити кількість макроячеек в блоках БЛУ і БФП в 1,5 раза більше, ніж для еквівалентного автомата  $U_1$ .

Наукна новизна предложенного підходу заключається в застосуванні розширеного представлення кодов состояній і заміні логіческих умов для зменшення кількості макроячеек ПЛИС і блоків ППЗУ в схемі автомата Мура.

Практична значимість метода заключається в зменшенні стоямості схеми МПА Мура по сравненію з відомими аналогами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Baranov, S. Logic and System Design of Digital Systems / Baranov S. – Tallinn : TUT Press, 2008. – 328 pp.
- Barkalov, A. Logic Synthesis for FSM-based Control Units / A. Barkalov, L. Titarenko. – Berlin : Springer, 2009. – 233 pp.
- Грушницкий, Р. И. Проектирование систем с использованием микросхем программируемой логики / Р. И. Грушницкий, А. Х. Мурзаев, Е. П. Угрюмов. – С. Пб. : БХВ-Петербург, 2002. – 608 с.
- Maxfield, C. The Design Warrior's Guide to FPGAs / Maxfield C. – Amsterdam : Elsevier, 2004. – 541 pp.
- Соловьев, В. В. Логическое проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем / В. В. Соловьев, А. С. Клинович. – М. : Горячая линия-Телеком, 2008. – 376 с.
- DeMicheli, G. Synthesis and Optimization of Digital Circuits / DeMicheli G. – New York : McGraw Hill, 1994. – 541 pp.
- FPGA, CPLD, and ASIC from Altera [Electronic resource]: база даних дозволяє отримати інформацію про микросхеми ПЛИС фірми Altera. – Електрон. дан. – Режим доступу : <http://www.altera.com>. – Загл. с экрана.
- FPGA and CPLD Solutions from Xilinx, Inc [Electronic resource]: база даних дозволяє отримати інформацію про микросхеми ПЛИС фірми Xilinx. – Електрон. дан. – Режим доступу: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com). – Загл. с экрана.
- Cypress Semiconductor [Electronic resource]: база даних дозволяє отримати інформацію про микросхеми ПЛИС фірми Cypress. – Електрон. дан. – Режим доступу: [www.cypress.com](http://www.cypress.com). – Загл. с экрана.
- Баркалов, А. А. Принципы оптимизации логической схемы микропрограммного автомата Мура // Кибернетика и системный анализ. – 1998. – № 1. – С. 65–72.
- Баркалов, А. А. Матричная реализация автомата Мура с расширением кодов состояний перехода/ А. А. Баркалов, Р. В. Мальчева, К. А. Солдатов // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия «Информатика, кибернетика и вычислительная техника» (ИКВТ-2010). Выпуск 11 (164). – Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ». – 2010. – С. 79–83.
- Baranov, S. Logic Synthesis for Control Automata / Baranov S. – New York : Kluwer Academic Publishers, 1994. – 312 pp.

Стаття надійшла до редакції 23.01.2012.

Баркалов О. О., Мальчева Р. В., Солдатов К. А.  
ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМИ АВТОМАТА МУРА, ЩО РЕАЛІЗУЄТЬСЯ В БАЗІСІ ПЛІС

У статті пропонується метод, призначений для зменшення кількості входних змінних і проміжних термів в реалізованих системах булевих функцій. Запропонований метод заснований на розширенні кодів станів переходу і заміні логічних умов. Застосування запропонованого методу дозволяє до 20 % зменшити загальну кількість макрокомірок в блоках БЛУ та БФП.

**Ключові слова:** автомат Мура, ПЛІС, ГСА, псевдоеквівалентні стани, заміна логічних умов.

Barkalov A. A., Malcheva R. V., Soldatov K. A.

OPTIMIZATION OF MOORE FINITE STATE MACHINE IMPLEMENTED ON THE PROGRAMMABLE LOGIC

This article is proposed a method which is designed to reduce the number of input variables and intermediate terms of Boolean functions. The method is based on the extended codes of states and replacement of logic conditions. Application of the proposed method allows up to 20% reduction in the total count of macrocells in blocks BLC and BFM.

**Key words:** Moore FSM, Programmable Logic, GSA, pseudoequivalent states, replacement of logic conditions.

УДК 004:519.2

Кириченко Л. О.<sup>1</sup>, Демерчян К. А.<sup>2</sup>, Кайали Э.<sup>3</sup>, Хабачёва А. Ю.<sup>4</sup><sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники<sup>2, 4</sup>Студент Харьковского национального университета радиоэлектроники<sup>3</sup>Аспирант Харьковского национального университета радиоэлектроники

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ТРАФИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТОХАСТИЧЕСКИХ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫХ КАСКАДНЫХ ПРОЦЕССОВ

В работе рассматривается моделирование реализаций телекоммуникационного трафика, обладающего мультифрактальными свойствами, на основе математической модели мультипликативного стохастического каскада, весовые коэффициенты которого имеют бета-распределение вероятностей.

**Ключевые слова:** стохастический каскадный процесс, модель телекоммуникационного трафика, самоподобный процесс, мультифрактальный процесс.

### ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Экспериментальные и численные исследования, проведенные в последние десятилетия, свидетельствуют, что трафик во многих мультимедийных сетях обладает фрактальными свойствами. Такой трафик имеет особую структуру, сохраняющуюся на многих масштабах, – в реализации всегда присутствует некоторое количество очень больших выбросов при относительно небольшом среднем уровне трафика. Эти выбросы вызывают значительные задержки и потери пакетов, даже когда суммарная потребность всех потоков далека от максимального допустимых значений. Причина такого эффекта заключается в особенностях распределения файлов по серверам, их размерах, в типичном поведении пользователей, и в значительной степени связана с изменениями сетевых ресурсов и топологии сети [1–4].

Самоподобные свойства трафика привели к появлению ряда моделей трафика на основе самоподобных (монофрактальных) стохастических процессов [2, 3]. В последнее десятилетие интенсивно изучаются мультифрактальные свойства трафика. Мультифрактальный трафик определяется как расширение самоподобного трафика за счет учета скейлинговых свойств статистических характеристик второго и выше порядков. Использование мультифрактальных стохастических процессов для моделирования телекоммуникационного трафика достаточно ново, и список мультифрактальных моделей значительно короче [4–6].

Целью представленной работы является разработка модели реализаций телекоммуникационного трафика, обладающего мультифрактальными свойствами, на основе математической модели мультипликативного стохастического каскада.

### ХАРАКТЕРИСТИКИ САМОПОДОБНЫХ И МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ [6–9]

Самоподобие случайных процессов заключается в сохранении статистических характеристик при измене-

нии масштаба времени. Стохастический процесс  $X(t)$  является самоподобным с параметром  $H$ , если процесс  $a^{-H} X(at)$  описывается теми же конечномерными законами распределений (Law), что и :

$$\text{Law}\{a^{-H} X(at)\} = \text{Law}\{X(t)\}, \quad \forall a > 0, t > 0. \quad (1)$$

Параметр  $H$ ,  $0 < H < 1$ , называемый показателем Херста, представляет собой степень самоподобия. Наряду с этим свойством, показатель  $H$  характеризует меру долгосрочной зависимости стохастического процесса. В случае  $0,5 < H < 1$  процесс обладает длительной памятью: если в течение некоторого времени в прошлом наблюдались положительные приращения процесса, т. е. происходило увеличение, то и впредь в среднем будет происходить увеличение. В случае  $0 < H < 0,5$  высокие значения процесса следуют за низкими, и наоборот. При  $H = 0,5$  отклонения процесса от среднего являются действительно случайными и не зависят от предыдущих значений.

Можно показать, положив в (1)  $a = 1/t$ , что для самоподобного процесса выполняется следующее равенство:

$$\text{Law}\{X(t)\} = \text{Law}\left\{\left(\frac{1}{t}\right)^H X(1)\right\} = \text{Law}\{t^H X(1)\}. \quad (2)$$

Учитывая (2), начальные моменты самоподобного случайного процесса можно выразить как:

$$M\left[\left|X(t)\right|^q\right] = M\left[\left|t^H X(1)\right|^q\right] = t^{qH} M\left[\left|X(1)\right|^q\right] = C(q) \cdot t^{qH}, \quad (3)$$

где величина  $C(q) = M\left[\left|X(1)\right|^q\right]$ .

Для мультифрактальных процессов рассматривается более общее соотношение:

$$\text{Law}\{X(at)\} = \text{Law}\{M(a) \cdot X(1)\},$$

где  $M(a)$  – независимая от  $X(1)$  случайная функция. В случае самоподобного процесса  $M(a) = a^H$ . Мульти-

фрактальныe процессы проявляют более гибкие скейлинговые закономерности для моментных характеристик:

$$\mathbb{M}[\|X(t)\|^q] = c(q) \cdot t^{\tau(q)+1}, \quad (4)$$

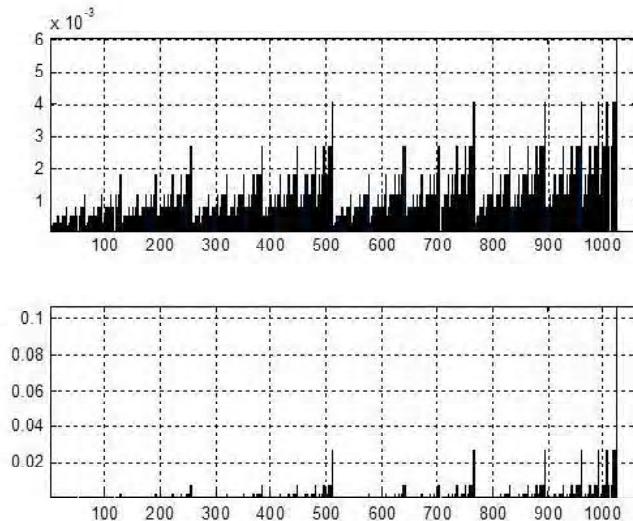
где  $c(q)$  – некоторая детерминированная функция,  $\tau(q)$  – скейлинговая экспонента, в общем случае нелинейная функция, для которой значение  $\frac{\tau+1}{q}$  при  $q=2$  совпадает со значением степени самоподобия  $H$ . Для временных рядов, которые отвечают монофрактальному процессу, скейлинговая экспонента  $\tau(q)$  линейна.

### МЕТОД МАКСИМУМОВ МОДУЛЕЙ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ [7, 10–12]

Одним из самых популярных инструментов мультифрактального анализа является метод максимумов модулей непрерывного вейвлет-преобразования (ММВП). Он базируется на вейвлет-анализе, который называют «математическим микроскопом» из-за способности сохранять хорошее разрешение на разных масштабах. Поскольку вейвлет-функции являются локализованными по времени и частоте, метод ММВП является мощным инструментом статистического описания нестационарных процессов.

Непрерывное вейвлет-преобразование функции  $X(t)$  имеет вид  $W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} X(t) \psi_{ab}(t) dt$ , где  $\psi_{ab}(t)$  – вейвлет-функция с параметрами масштаба  $a$  и сдвига  $b$ . Функция  $W(a, b)$  называется вейвлет-спектром и может быть представлена как поверхность вейвлет-коэффициентов в трехмерном пространстве. Наиболее важная информация содержится в линиях локальных экстремумов поверхности  $W(a, x)$ , поиск которых проводится на каждом масштабе  $a$ .

Метод ММВП позволяет численно получить статическую сумму:



$$Z(q, a) = \sum_{l \in L(a)} \left( \sup_{a' \leq a} |W(a', x_l(a'))| \right)^q,$$

где  $L(a)$  – множество всех линий  $l$  максимумов модулей вейвлет-коэффициентов на масштабе  $a$ ;  $x_l(a)$  – расположение максимума на этом масштабе. Для вычисления  $Z(q, a)$  выбирается максимальное значение модуля вейвлет-коэффициентов вдоль каждой линии на масштабах, меньших заданного значения масштаба  $a$ .

В этом случае выполняется зависимость:

$$Z(q, a) \approx a^{\tau(q)},$$

де  $\tau(q)$  – скейлинговая экспонента из формулы (4), которую определяют для каждого значения  $q$  путем вычисления наклона  $\ln Z(q, a)$  от  $\ln a$ .

### СТОХАСТИЧЕСКИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНЫЕ КАСКАДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Простейшей моделью мультифрактального процесса с заданными свойствами является детерминированный биномиальный мультиплективный каскад [6, 8, 9]. При его построении первоначальный единичный отрезок делится на два равных интервала, которым приписываются весовые коэффициенты  $p_1$  и  $p_2 = 1 - p_1$  соответственно. Затем с каждым из интервалов проделывается аналогичная процедура. В результате на втором шаге имеется 4 интервала с весовыми коэффициентами  $p_1^2$ ,  $p_1 p_2$ ,  $p_2 p_1$  и  $p_2^2$ . При числе шагов  $n \rightarrow \infty$  и  $p_1 \neq p_2$  мы приходим к предельной мере, являющейся неоднородным фрактальным множеством. На рис. 1, а показаны временные ряды значений биномиального каскада при значениях  $p_1 = 0,6$  (вверху) и  $p_1 = 0,8$  (внизу). Число итераций  $n = 10$ , т.е. длина реализации равна  $2^{10}$  значений. Очевидно, что с увеличением первоначального весового коэффициента  $p_1$  увеличивается неоднородность временного ряда.

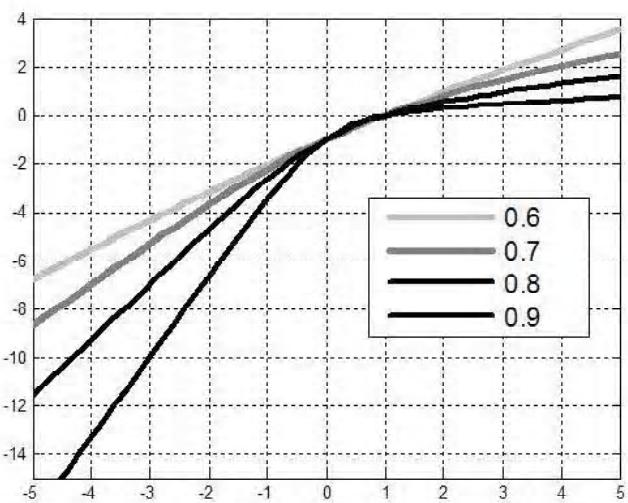


Рис. 1. Реализации каскада (а) и скейлинговые экспоненты  $\tau(q)$  для разных  $p_1$  (б)

В детерминированном случае мультифрактальная характеристика  $\tau(q)$  для биномиального процесса зависит только от весового коэффициента  $p_1$ :  

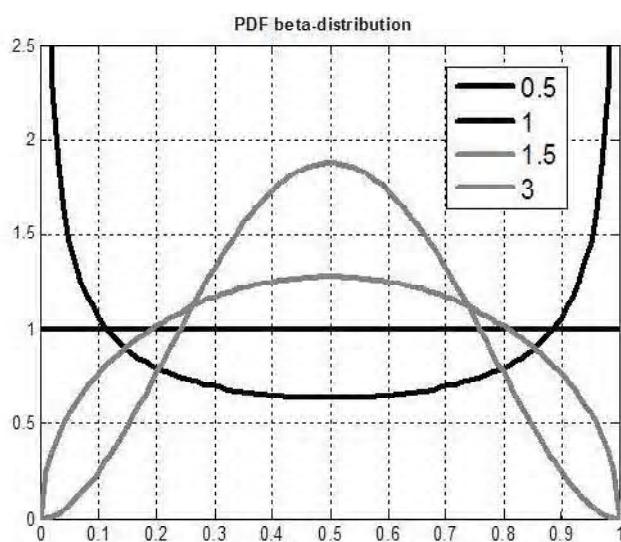
$$\tau(q) = \frac{-\ln(p_1^q + p_2^q)}{\ln 2}$$
. На рис. 1, б представлены теоретические скейлинговые экспоненты  $\tau(q)$  для значений  $p_1 = \{0,6; 0,7; 0,8; 0,9\}$ .

Реализации детерминированного каскада полностью определяются величиной  $p_1$ , что неприемлемо для моделирования случайных процессов. При построении стохастических каскадов весовыми коэффициентами являются независимые значения некоторой заданной случайной величины  $W$  [4, 6, 9]. Случайная величина выбирается таким образом, чтобы математическое ожидание суммы весовых коэффициентов на каждой итерации равнялось единице. Если выбрать случайную величину, определенную на интервале  $[0, 1]$ , то сумма коэффициентов на каждой итерации будет равной единице.

В этом случае первым двум интервалам будут приписаны весовые коэффициенты  $w_1$  и  $1 - w_1$  соответственно. На втором шаге добавляются два новых независимых случайных значения  $w_2$  и  $w_3$ . Получится 4 интервала с весовыми коэффициентами  $w_1 w_2$ ,  $w_1(1 - w_2)$ ,  $(1 - w_1)w_3$  и  $(1 - w_1)(1 - w_3)$ . При  $n \rightarrow \infty$  мы приходим к предельной мере, являющейся неоднородным фрактальным множеством.

В работе предложено в качестве случайной величины, порождающей весовые коэффициенты, использовать случайную величину, имеющую бета-распределение. Бета-распределением с параметрами  $a > 0$ ,  $b > 0$ , называется распределение с плотностью вероятностей:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(a, b)} (1-x)^{b-1}, & x \in (0, 1); \\ 0, & x \notin (0, 1), \end{cases}$$



где  $B(a, b) = \int_0^1 x^{a-1} (1-x)^{b-1} dx$  – бета-функция. Для бета-распределения с одинаковыми значениями параметров  $a = b$ , у которого функция плотности распределения симметрична, можно аналитически определить скейлинговую экспоненту  $\tau(q)$  [6, 9]:

$$\tau(q) = -\log_2 \frac{\text{Beta}(\alpha+q, \alpha)}{\text{Beta}(\alpha, \alpha)} - 1. \quad (5)$$

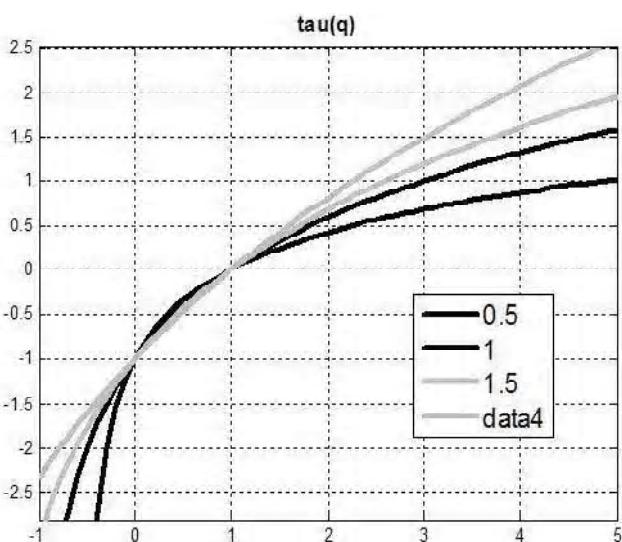
На рис. 2, а приведены различные виды графиков плотности распределения вероятностей, для симметричного бета-распределения при значениях  $a = \{0,5; 1; 1,5; 3\}$ . При значениях параметров  $a = b = 1$  мы получаем случайную величину, имеющую равномерное распределение на интервале  $[0, 1]$ . На рис. 2, б представлены графики скейлинговых экспонент  $\tau(q)$  для соответствующих значений параметра  $a$  симметричного бета-распределения.

Очевидно, что с увеличением значения параметра  $a$  происходит ослабление мультифрактальных свойств временного ряда. На рис. 3 показаны соответствующие реализации биномиальных каскадов.

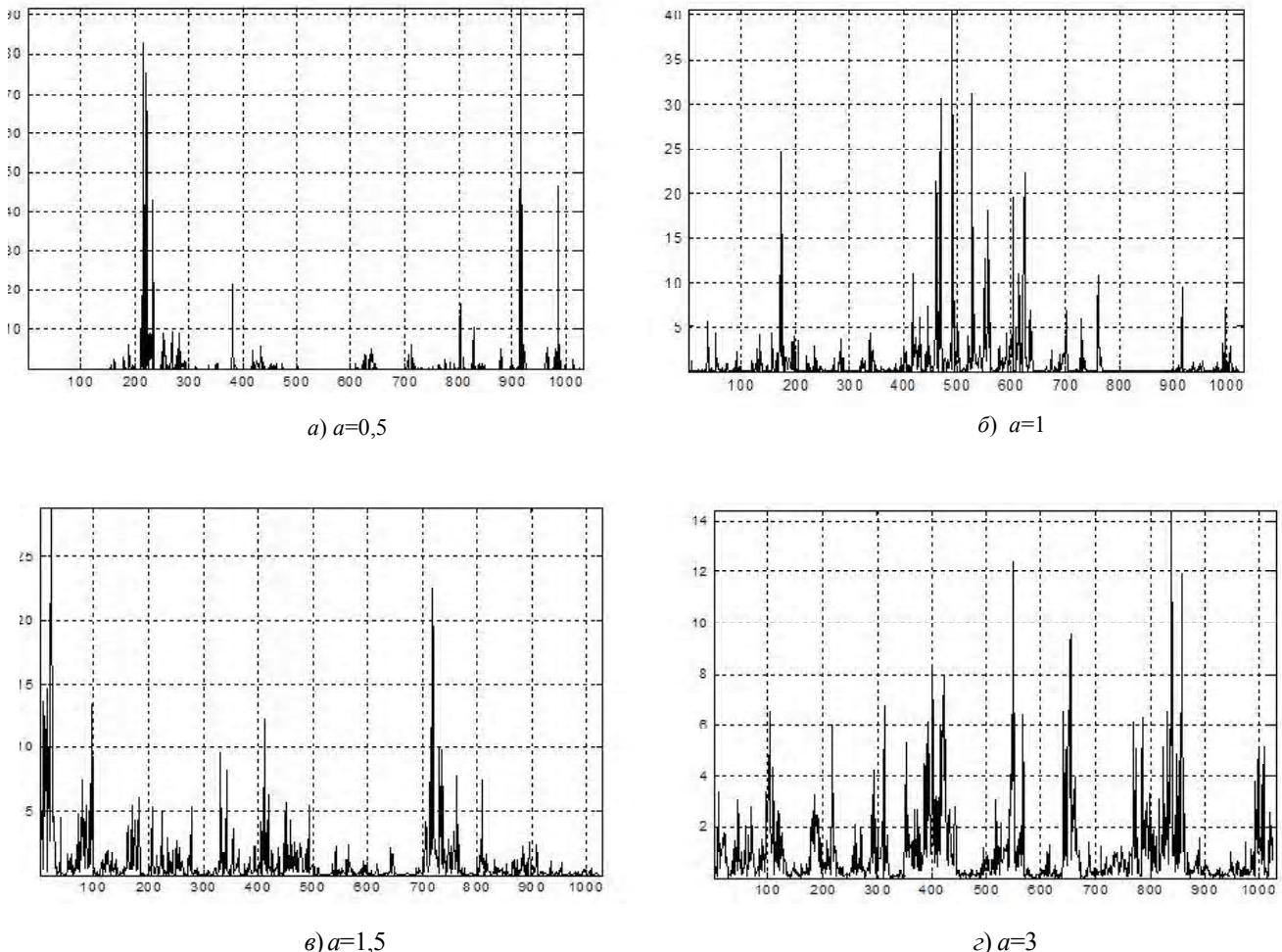
В случае симметричного бета-распределения мультифрактальные свойства каскада полностью определяются параметром  $a$ . Показатель Херста  $H$ , учитывая формулу (5), в этом случае равен:

$$H = \frac{\tau(2)+1}{2} = -\log_2 \frac{\text{Beta}(\alpha+q, \alpha)}{2 \text{Beta}(\alpha, \alpha)}.$$

В работе проведены исследования мультифрактальных свойств каскадов, порождаемых бета-распределениями с разными значениями параметров  $a$  и  $b$ . Получены численные зависимости, которые значениям параметра  $H$  ставят в соответствие различные функции скейлинго-



**Рис. 2.** Плотности распределения (а) и скейлинговые экспоненты  $\tau(q)$  для разных значений параметра  $a$  симметричного бета-распределения (б)

Рис. 3. Реализации биномиального каскада для разных значений  $\alpha$ 

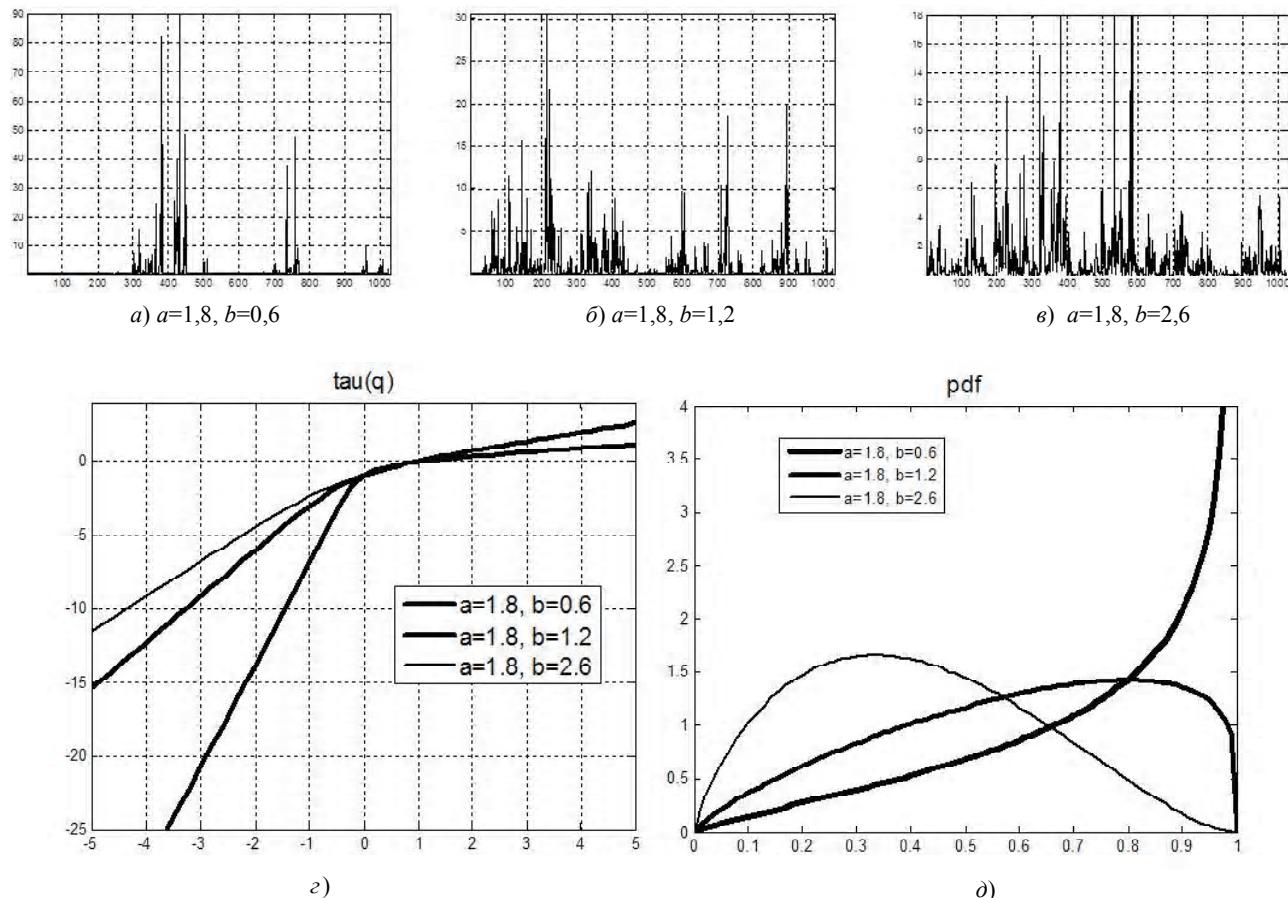
вых экспонент  $\tau(q)$ . В этом случае можно выбрать каскад не только с определенной скейлинговой экспонентой, но и с заданным показателем Херста, который определяет степень долгосрочной зависимости временного ряда. На рис. 4 приведены реализации каскадных процессов с показателем  $H = 0,8$  (вверху) и различными мультифрактальными свойствами  $\tau(q)$  (посредине), которые определяются плотностью бета-распределения (внизу) разных значений  $a$  и  $b$ .

### ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ TCP-ТРАФИКА

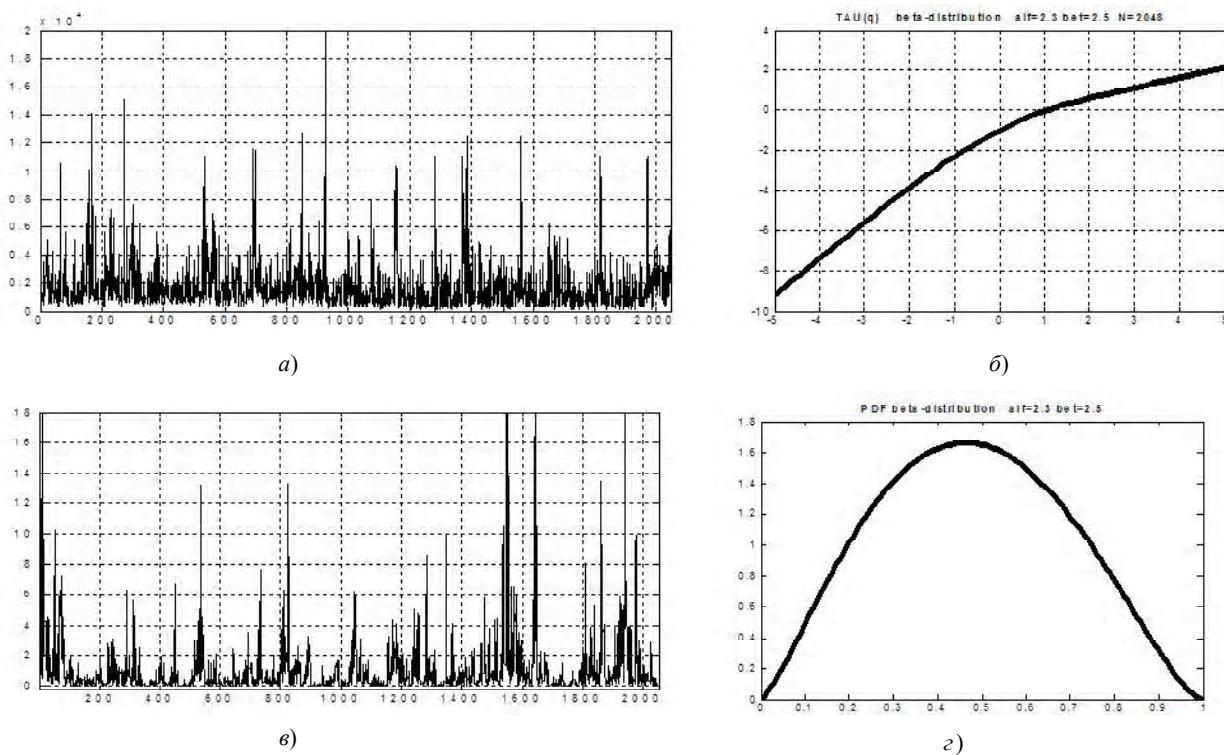
Предложенная в работе модель мультифрактального трафика имеет три основных параметра  $(I, H, \tau(q))$ , где  $I$  – интенсивность (среднее значение) трафика,  $H$  – показатель Херста, который определяет степень долгосрочной зависимости (степенное убывание корреляционной функции),  $\tau(q)$  – скейлинговая экспонента, определяю-

щая неоднородность (выбросы) реализации. Для построения модельной реализации необходимо оценить соответствующие параметры телекоммуникационного трафика и выбрать подходящий закон бета-распределения, генерирующий весовые коэффициенты мультифрактального каскада.

В работе были проведены исследования реализаций трафиков различных протоколов, которые показали их явные мультифрактальные свойства. На рис. 5, а приведен график выборочной реализации трафика TCP-протокола. Рассчитанная с помощью метода ММВП скейлинговая экспонента  $\tau(q)$  представлена на рис. 5, б. Для данной реализации оценка показателя Херста  $H = 0,83$ . Каскады с такими мультифрактальными свойствами могут быть получены на основе бета-распределения с параметрами  $a = 2,3, b = 2,5$ , плотность которого показана на рис. 5, г. Одна из модельных реализаций каскада с данными мультифрактальными свойствами приведена на рис. 5, в.



**Рис. 4.** Реализации каскадов для разных значений  $a$  и  $b$  ( $a$ – $c$ ), соответствующие скейлинговые экспоненты ( $d$ ) и плотности бета-распределений ( $e$ )



**Рис. 5.** Реализация трафіка (а), вибіркова скейлингова експонента  $\tau(q)$  (б), плотність бета-расподілення  $a=2,3, b=2,5$  (в), модельна реалізація (г)

## ВЫВОДЫ

В работе были исследованы свойства стохастических мультиплекативных каскадных процессов с функциями бета-распределения случайных весов. Предложена математическая модель трафика, параметрами которой являются средняя интенсивность, показатель Херста и скейлинговая экспонента. Показано, что модели трафика, полученные с помощью стохастических мультиплекативных каскадов, позволяют гибко представлять мультифрактальные свойства реального телекоммуникационного трафика.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leland, W. E. On the self-similarity of ethernet traffic / [W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, D. V. Wilson] // IEEE/ACM Transactions of Networking. – 1994. – № 2(1). – P. 1–15.
2. Sheluhin, O. I. Similar processes in telecommunications / O. I. Sheluhin, S. M. Smolskiy, A. V. Osin. – John Wiley & Sons Ltd, England, 2007. – 337 p.
3. Столлингс, В. Современные компьютерные сети 2-е изд. / В. Столлингс – С. Пб. : Питер, 2003. – 784 с.
4. Шелухин, О. И. Мультифракталы. Инфокоммуникационные приложения приложения / О. И. Шелухин. – М. : Горячая Линия -Телеком, 2011. – 578 с.
5. Veitch, D. Multifractality in TCP/IP traffic: the case against / D. Veitch, N. Hohn, P. Abry // Computer Networks-2005. – № 48(3). – P. 293–313.
6. Riedi R. H. Multifractal processes / Riedi R. H., Doukhan P., Oppenheim G., Taqqu M. S. (Eds.) // Long Range Dependence: Theory and Applications: Birkhäuser. – 2002. – P. 625–715.
7. Kantelhardt, J. W. Fractal and Multifractal Time Series. – 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/0804.0747>. – Загл. с экрана.
8. Федор, Е. Фракталы / Е. Федор. – М. : Мир, 1991. – 254 с.

УДК 519.24:62-50

9. Calvet, L. Large Deviations and the Distribution of Price Changes / L. Calvet, A. Fisher, B.B. Mandelbrot // Cowles Foundation Discussion Paper. – 1997. – N. 1165. –P. 1–30.
10. Малла, С. Вейвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 671 с.
11. Muzy, J. F. Multifractal formalism for fractal signals: the structure-function approach versus the wavelet-transform modulus-maxima method / Muzy J. F., Bacry E., Arneodo A. // Phys. Rev. E. – 1993. – V. 47. – P. 875–884.
12. Павлов, А. Н. Мультифрактальный анализ сигналов / А. Н. Павлов, В. С. Анищенко // Известия Саратовского университета. Серия «Физика». – 2007. – Т. 7, Вып. 1. – С. 3–25.

Стаття надійшла до редакції 16.01.2012  
Після доробки 14.02.2012

Кіріченко Л. О., Демерчян К. А., Кайалі Е., Хабачова А. Ю.  
МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНИКАЦІЙНОГО ТРАФІКУ З ВИКОРИСТАННЯМ СТОХАСТИЧНИХ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИХ КАСКАДНИХ ПРОЦЕСІВ

В роботі розглядається моделювання реалізацій телекомунікаційного трафіку, що володіє мультифрактальними властивостями, на основі математичної моделі мультиплекативного стохастичного каскаду, вагові коефіцієнти якого мають бета-розподіл ймовірностей.

**Ключові слова:** стохастичний каскадний процес, модель телекомунікаційного трафіку, самоподібний процес, мультифрактальний процес.

Kirichenko L. O., Demerchan K. A., Kayali E., Habachyova A. Yu.  
MODELING TELECOMMUNICATIONS TRAFFIC  
USING STOCHASTIC MULTIFRACTAL CASCADE  
PROCESS

In the work the simulation of telecommunications traffic has been examined, which has multifractal properties, based on a mathematical model of the stochastic multiplicative cascade, the weights of which are beta probability distribution.

**Key words:** a stochastic cascade process, the model of telecommunications traffic, self-similar process, multifractal process.

Кошевої Н. Д.<sup>1</sup>, Сухобрус Е. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедрою Національного аерокосмічного

университета ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ»

<sup>2</sup> Аспірант Національного аерокосмічного університета ім. Н. Е. Жуковського «ХАІ»

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОУРОВНЕВЫХ ПЛАНОВ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Предложен метод поиска оптимального или близкого к оптимальному по стоимости реализации многоуровневого плана многофакторного эксперимента. Для автоматизации процесса поиска с использованием предложенного метода разработано программное обеспечение. Проведен сравнительный анализ разработанного программного обеспечения с программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента, реализующей метод генерации перестановок с минимальным числом транспозиций соседних элементов.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, симплекс-метод, быстродействие.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изменение порядка проведения опытов существенно влияет на стоимость реализации эксперимента. При

увеличении количества рассматриваемых вариантов усложняется поиск плана с наименьшей стоимостью. Трудность поиска вызвана быстрым ростом вариантов пе-

перестановок в зависимости от количества факторов и уровней. В связи с этим актуальной является проблема проведения анализа многоуровневых планов многофакторного эксперимента в оптимальные временные промежутки.

## АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦІЙ

Известна программа поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента [1]. В основе работы программы лежит генерация комбинаторных планов многофакторного эксперимента, оценка их характеристик, отбор оптимального по стоимости варианта. Программа реализована на языке «Turbo Pascal». Предусмотрено два режима поиска оптимального решения: случайный поиск и последовательная генерация возможных вариантов перестановок. Количество рассматриваемых вариантов может быть задано, а процесс поиска может быть прерван.

Схема алгоритма программы поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента представлена на рис. 1. Алгоритм работы программного обеспечения следующий.

- Осуществляется ввод имени файла исходных данных, содержащего информацию о количестве анализируемых факторов, матрицу исходного плана эксперимента и стоимости изменений значений факторов. Производится чтение исходных данных.

- Выбирается режим поиска: случайный поиск или анализ перестановок.

- Производится выбор количества анализируемых вариантов путем введения заданного количества  $N$  или введения «0». В последнем случае процесс поиска может быть прерван при нажатии клавиши «ESC».

- Рассчитывается стоимость исходной матрицы планирования эксперимента.

- Осуществляется генерация перестановок строк исходной матрицы. В режиме случайного поиска генерация производится с использованием функции Randomize. В режиме анализа перестановок используется алгоритм генерации перестановок с минимальным числом транспозиций соседних элементов.

- Производится расчет стоимости полученной матрицы и последующее сравнение её со стоимостью исходной матрицы. Если полученное значение стоимости меньше, чем стоимость исходной матрицы, то оно признается оптимальным. В противном случае полученное значение стоимости признается максимальным.

- Производится сравнение количества проанализированных вариантов с заданным количеством  $N$ . Если заданное количество анализируемых вариантов достигнуто или произошло прерывание процесса поиска при нажатии клавиши «ESC», то осуществляется создание файла результата и переход к окончанию процесса поиска. В противном случае происходит переход к этапу 5 и повторяется аналогичная процедура.

Основным недостатком данной программы является необходимость анализа большого количества вариантов

перестановок и, следовательно, снижение быстродействия процесса поиска при увеличении количества уровней факторов.

## ЦЕЛЬ СТАТЬЇ

Разработка метода поиска, оптимизированного по стоимости реализации, многоуровневого плана многофакторного эксперимента, позволяющего проводить поиск без полного перебора всех вариантов перестановок, и программы для реализации метода, обеспечивающего сокращение времени вычислений на ЭВМ.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Предложен метод поиска на основе симплекс-метода, позволяющий получать оптимальные и близкие к оптимальным по стоимости реализации многоуровневые планы многофакторного эксперимента. Суть метода заключается в том, что многофакторный план представляется в виде выпуклого многогранника в многомерном пространстве, вершины которого соответствуют значениям уровней факторов плана. Поиск оптимального по стоимости реализации многоуровневого плана многофакторного эксперимента с использованием предложенного метода осуществляется в следующем порядке.

- В качестве первой строки плана выбирается та, переход на которую максимален по стоимости.

- Осуществляется поиск минимального по стоимости перемещения уровня фактора. В случае наличия нескольких равноценных по стоимости перемещения уровней факторов, выбирается первый из них по порядковому номеру.

- Выполняется проверка: приводит ли перемещение уровня фактора, определенного на шаге 2, к появлению повторяющейся строки. Если полученная строка не встречалась ранее, то она записывается в выходную матрицу планирования. Если полученная строка уже встречалась, то перемещается следующий по возрастанию стоимости перемещения уровень фактора или, в случае наличия равноценных по стоимости перемещения уровней факторов, следующий по порядковому номеру.

- Производится циклический повтор шагов 2 и 3 до тех пор, пока не будет получено требуемое количество строк матрицы планирования. В случае, если все строки, в которые возможно осуществить переход, уже повторялись, а требуемое количество строк матрицы планирования не достигнуто, осуществляется возврат к строке, содержащей равнозначные по стоимости перемещения уровня факторов, и перемещается следующий по порядковому номеру уровень фактора.

Для автоматизации процесса поиска с использованием предложенного метода разработано программное обеспечение, позволяющее получать оптимальные или близкие к оптимальным по стоимости реализации многоуровневые планы многофакторного эксперимента без необходимости перебора всех вариантов перестановок, что позволяет значительно сократить время поиска. Схема алгоритма поиска оптимального плана эксперимента на основе симплекс-метода представлена на рис. 2.

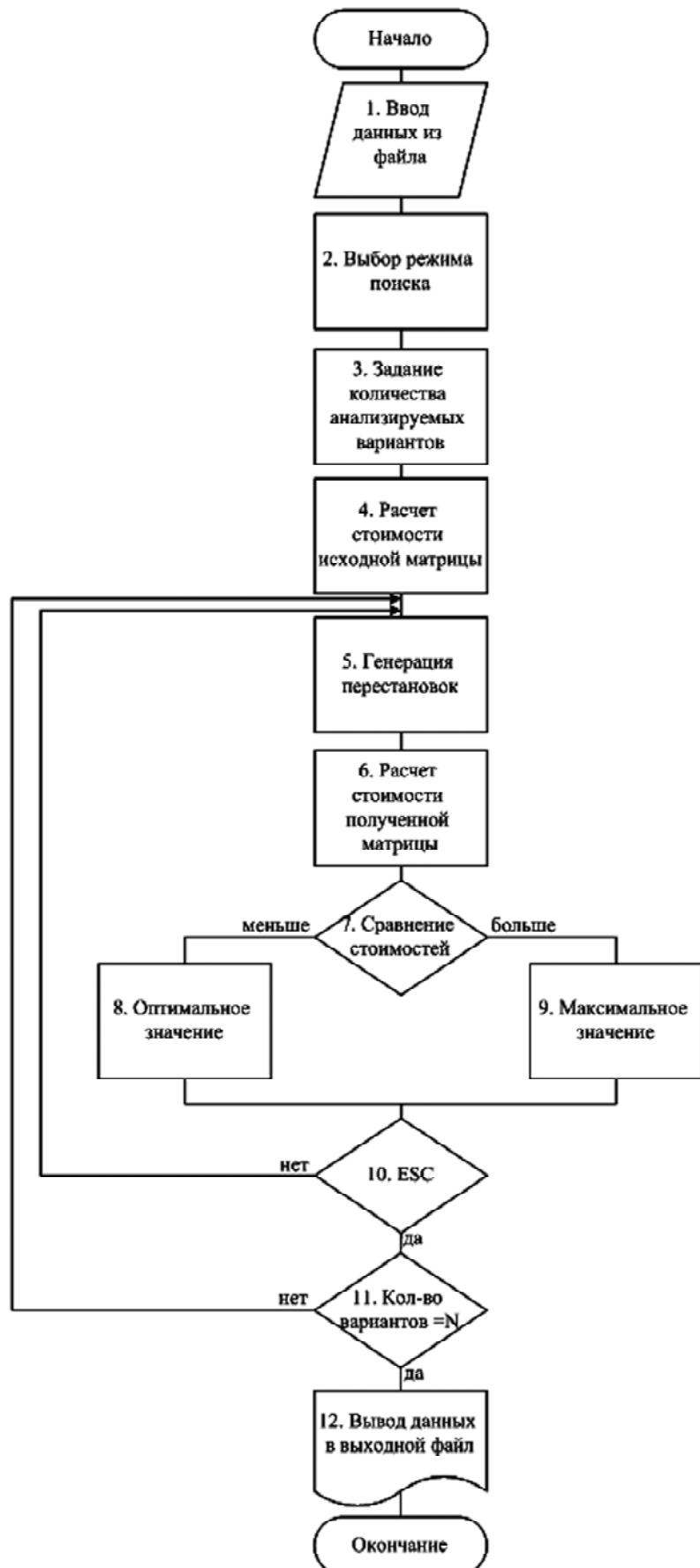
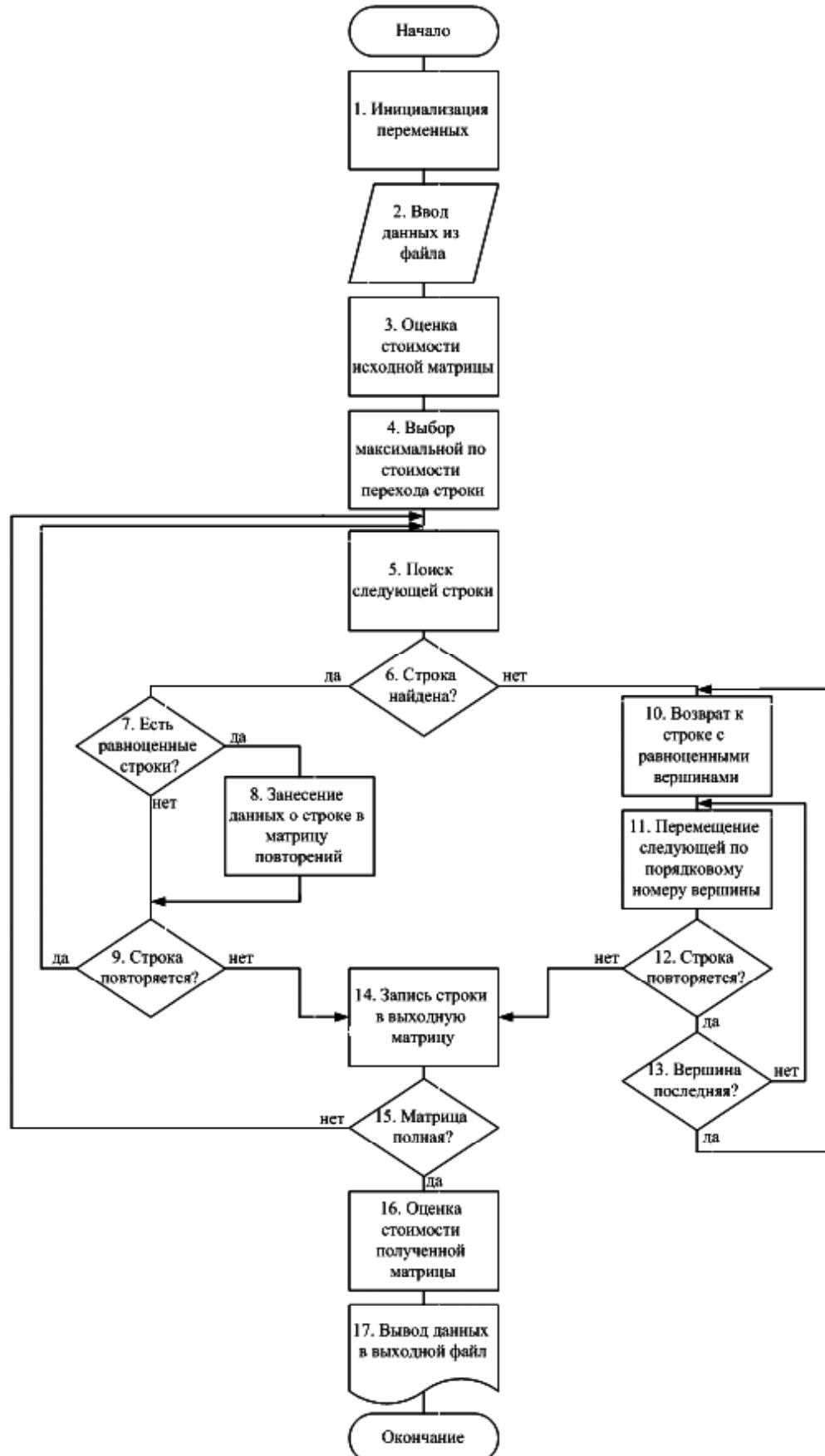


Рис. 1. Схема алгоритма работы известного программного обеспечения



**Рис. 2.** Схема алгоритма поиска оптимального плана эксперимента на основе симплекс-метода

Был проведен сравнительный анализ разработанного программного обеспечения с известной программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента. Объектом сравнения являлся процесс оптимизации многоуровневых планов многофакторного эксперимента для количества факторов  $k=3$  с количеством уровней факторов от 2 до 8. Сравнительный анализ производился по следующим функциональным параметрам оптимизации: полученное оптимальное или близкое к оптимальному значение стоимости реализации плана эксперимента, количество рассмотренных вариантов перестановок, время счета программы, выигрыш по стоимости реализации плана эксперимента, определяемый как отношение стоимостей реализации исходного и полученного планов эксперимента. Результат проведенного сравнительного анализа представлен в табл. 1.

Для известной программы поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента при оптимизации многоуровневых планов с количеством уровней факторов от 3 до 8 были введены ограничения на количество рассмотренных вариантов перестановок в связи с большими временными затратами на проведение процесса поиска.

На основании представленных данных, видно, что разработанное программное обеспечение позволяет получить значительный выигрыш по стоимостным и временным характеристикам при оптимизации многоуровневых планов многофакторного эксперимента.

Динамика изменения количества рассматриваемых вариантов перестановок при увеличении количества уровней факторов для анализируемых программ представлена на рис. 3.

**Таблица 1.** Сравнительный анализ разработанной и известной программ

Кол-во уровней факторов	Стоимость реализации исходной матрицы, усл.ед.	Программа поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента				Разработанное программное обеспечение			
		оптимальная стоимость, усл.ед.	количество рассмотренных вариантов, шт.	время счета, сек.	выигрыш по стоимости реализации	оптимальная стоимость, усл.ед.	количество рассмотренных вариантов, шт.	время счета, сек.	выигрыш по стоимости реализации
2	18	9	40320	1	2,0000	9	8	< 0,01	2,0000
3	126	106	1000000	69	1,1887	39	27	< 0,01	3,2307
4	235	220	500000	1825	1,0682	69	64	< 0,01	3,4058
5	529	517	500000	5572	1,0232	148	125	0,25	3,5743
6	682	671	500000	6470	1,0164	242	216	0,12	2,8182
7	2074	2053	500000	6538	1,0102	411	343	0,87	5,0462
8	2124	2109	500000	6673	1,0071	594	512	1,33	3,5758



**Рис. 3.** Зависимость количества рассматриваемых вариантов от количества уровней факторов

Из рис. 3 видно, что для известной программы поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента характерно резкое возрастание количества рассматриваемых вариантов перестановок с увеличением количества уровней факторов. В то время, как разработанное программное обеспечение позволяет производить поиск оптимального или близкого к оптимальному по стоимости реализации плана эксперимента без полного перебора всех вариантов перестановок.

Зависимость быстродействия сравниваемых программ от количества уровней факторов представлена на рис. 4.

Видно, что для этих программ показатели быстродействия при реализации планов эксперимента, факторы ко-

торых варьируются на 2 или 3 уровнях, сходны. При дальнейшем увеличении количества уровней факторов происходит значительное увеличение времени счета известной программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента.

Выигрыш по стоимости реализации плана эксперимента в зависимости от количества уровней факторов для анализируемых программ представлен на рис. 5. Показано, что разработанное программное обеспечение имеет более высокий показатель выигрыша по стоимости реализации по сравнению с известной программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента.

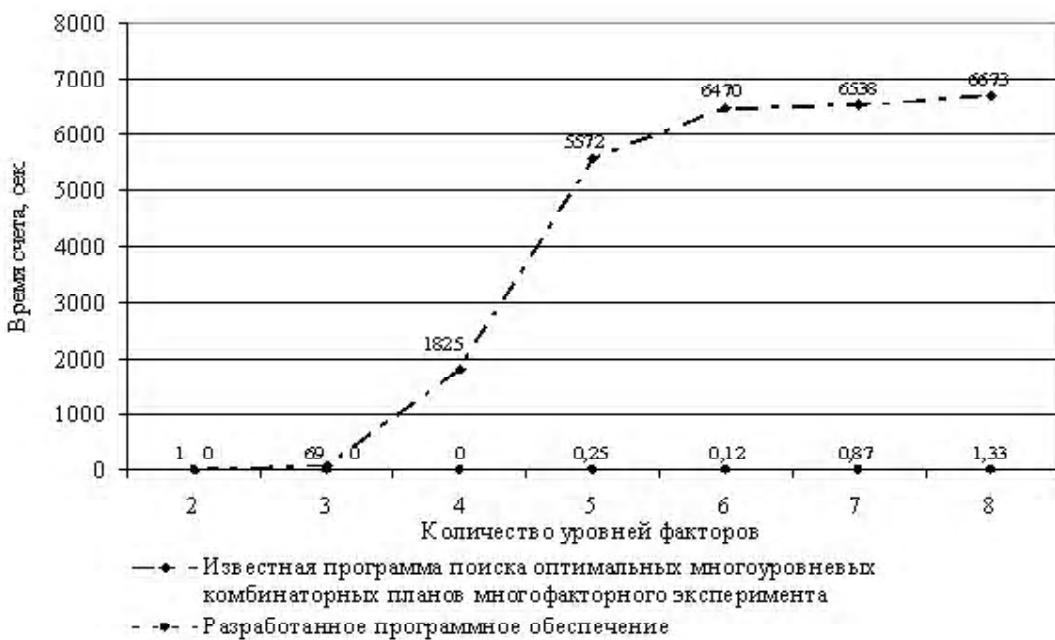


Рис. 4. Зависимость времени счета от количества уровней факторов

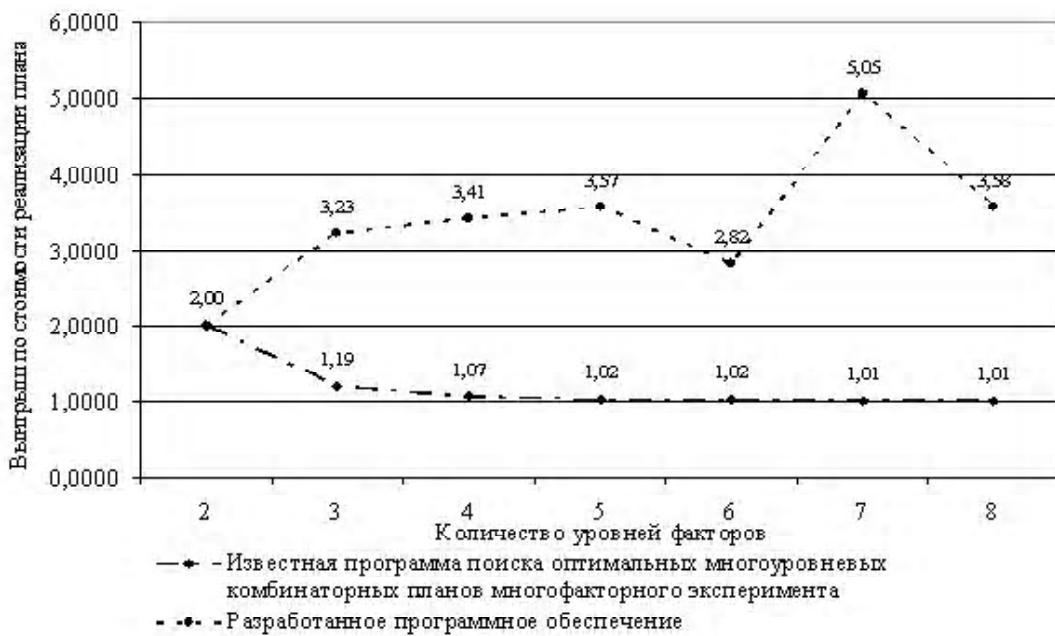


Рис. 5. Зависимость выигрыша по стоимости реализации плана эксперимента от количества уровней факторов

## ВЫВОДЫ

Предложен метод поиска оптимального или близкого к оптимальному по стоимости реализации многоуровневого плана многофакторного эксперимента, позволяющий получать такие планы без необходимости перебора всех вариантов перестановок, что дает возможность значительно сократить время поиска. Для автоматизации процесса поиска с использованием предложенного метода разработано программное обеспечение.

Проведен сравнительный анализ разработанного программного обеспечения с известной программой поиска оптимальных многоуровневых комбинаторных планов многофакторного эксперимента. Показано, что разработанное программное обеспечение позволяет получать значительный выигрыш по стоимостным и времененным характеристикам при оптимизации многоуровневых планов многофакторного эксперимента.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошовий, М. Д. Комп'ютерна програма «Програма пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатофакторного експерименту» / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко, В. А. Дергачов. – Зареєстр. в Держ. департ. інтелектуальної власності Міністерства освіти і науки України; Реєстр. 28.01.2010, Свід. про реєстр. автор. права на твір № 31824

Стаття надійшла до редакції 09.02.2012.

УДК 378.14:004.421

Кошовий М. Д., Сухобрус О. А.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ БАГАТОРІВНЕВИХ ПЛАНІВ БАГАТОФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Запропоновано метод пошуку оптимального або близького до оптимального за вартістю реалізації багаторівневого плану багатофакторного експерименту. Для автоматизації процесу пошуку з використанням запропонованого методу розроблено програмне забезпечення. Проведено порівняльний аналіз розробленого програмного забезпечення з програмою пошуку оптимальних багаторівневих комбінаторних планів багатофакторного експерименту, яка реалізує метод генерації перестановок з мінімальним числом транспозицій сусідніх елементів.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, симплекс-метод, швидкодія.

Koshevoy N. D., Sukhobrus E. A.

THE COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS OF MULTILEVEL MULTIFACTOR EXPERIMENT PLANS

A method for finding the optimal or close to the optimum implementation value of a multi-level multifactorial experiment plan are proposed. To automate the search process using the proposed method, the software was developed. A comparative analysis of the developed software with multi-level program for finding the optimal combinatorial plans of multifactor experiment, which implements the generating permutations method with a minimal number of adjacent elements transpositions are implemented.

**Key words:** software, simplex method, speed.

Кулик А. С.<sup>1</sup>, Пищухина О. А.<sup>2</sup>, Ключок А. Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

<sup>3</sup>Ассистент Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

## МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ПОИСКА ОШИБОК ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ СРЕДСТВ ОБУЧЕНИЯ

Предложен алгоритм диагностирования ошибок в компьютерной обучающей программе решения характеристического уравнения системы управления с использованием численного метода, особенностью которого является формирование производственной базы знаний поиска ошибок и использование дихотомического дерева в процессе диагностирования.

**Ключевые слова:** компьютерные обучающие программы, диагностирование, дихотомическое дерево.

## ВВЕДЕНИЕ

На кафедре систем управления летательными аппаратами Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ» с 2004 г. непрерывно формируется и обновляется комплекс компьютерных обучающих программ, каждая из которых представляет собой независимые модули, объединяемые в единую структуру [1, 2]. Выбор задач, предназначенных для реа-

лизации в рамках компьютерного обучения, осуществляется из предметной области, сформированной в результате системного анализа структуры учебных планов и выявления наиболее важных и (или) сложных тем для усвоения обучаемыми, а также энергоемких задач, требующих длительных поэтапных расчетов, решение которых затруднено вследствие ограничения аудиторного времени. Так, в ходе разработок созданы обучающие про-

грамм расчета основных характеристик и показателей качества систем управления [3, 4], определения корней дифференциальных уравнений различными методами [5, 6], программа изучения определений и терминов базовых курсов, а также компьютерные приложения для решения задач в условиях реального времени [7].

Особенностью разработанных компьютерных программ является их интерактивная и интеллектуальная составляющие, т. е. способность не только предоставлять теоретический материал или осуществлять тестовый контроль знаний с дальнейшим оцениванием, но и помогать обучаемым в процессе решения конкретной математической или технической задачи путем выявления мест допускаемых ошибок и предоставления рекомендаций для их устранения [8]. Сформированные компьютерные средства обучения содержат блоки диагностирования ошибок, реализующие обратную связь процесса обучения после каждого этапа алгоритма решения путем разбиения последовательности ответов на правильные (1) и неверные (0) в виде дихотомического дерева. Каждая задача требует формирования уникального алгоритма поиска ошибок с использованием единого подхода, учитывающего особенности решаемой задачи, количество итераций, ожидаемый результат [9].

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В результате проведенных исследований в области существующих компьютерных обучающих программ были определены следующие задачи для разработки, реализации и верификации алгоритма диагностирования ошибок:

- 1) сформировать предметную область исследований для формирования производственной базы знаний поиска ошибок;
- 2) определить особенности выбранного метода для реализации процесса обучения и формирования дихотомического дерева;
- 3) разработать алгоритм диагностирования ошибок в ответах обучаемого лица в виде дихотомического дерева, а также компьютерную оболочку системы обучения.

### РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время создание интеллектуальных компьютерных обучающих программ является одним из приоритетных направлений развития кафедры систем управления летательными аппаратами, разработки которых осуществляются в течение последнего десятилетия. В результате анализа учебных планов и программ были выделены группы ключевых дисциплин и задач, связанные с моделированием и исследованием процессов управления в сложных технических системах, решение которых требует компьютерной поддержки в рамках использования обучающих программ.

Одной из таких задач является нахождение корней характеристического уравнения, отражающего основные показатели качества системы, с использованием численного метода Лобачевского-Греффе-Данделена с целью дальнейшего определения устойчивости рассматриваемой

системы как необходимого условия ее работоспособности [10]. Характеристическое уравнение представляет собой алгебраическое уравнение, для определения корней которого в случае низших порядков используются общезвестные формулы. Для уравнений третьей и четвертой степеней также могут быть приведены формулы, которые выражают корни через коэффициенты при помощи радикалов, но для уравнений пятого и более порядков таких формул не существует, и возникает проблема определения корней.

Среди известных методов решения подобных уравнений выделяют методы, которые достаточно просты для понимания, но неэффективны с точки зрения точности вычисляемых корней, а также методы, которые являются эффективными, однако их численная реализация является очень сложной для восприятия и использования. Наиболее совершенным методом, позволяющим приближенно вычислить не только действительные, но и комплексные корни, является метод Лобачевского-Греффе-Данделена, который заключается в применении процесса квадрирования к исходному уравнению. В результате квадрирования переходят к новому уравнению, корни которого равны квадратам корней предыдущего уравнения, а переход осуществляется при помощи рекуррентных формул.

Правило перехода от исходного уравнения к базовому уравнению состоит в следующем. Пусть количество итераций  $m$  равно единице, тогда коэффициенты преобразованного уравнения  $A_0, A_1, \dots, A_n$  получаются из коэффициентов исходного уравнения по следующей схеме:

$$a_0^2 S^n + \begin{cases} a_1^2 \\ -2a_0a_2 \end{cases} S^{n-1} + \begin{cases} a_2^2 \\ -2a_1a_3 \\ +2a_0a_4 \end{cases} S^{n-2} + \dots + a_n^2 S^0 = 0, \quad (1)$$

$$\text{т. е. } A_0 = a_0^2; A_1 = a_1^2 - 2a_0a_2; A_2 = a_2^2 - 2a_1a_3 + 2a_0a_4; \\ A_n = a_n^2.$$

Последовательное  $m$ -разовое использование схемы позволяет получить базовое уравнение, имеющее корни:  $-S_1^{2m}, -S_2^{2m}, \dots, -S_n^{2m}$ . Наличие пары комплексно-сопряженных корней среди корней характеристического уравнения характеризуется колебаниями знака одного из коэффициентов  $A_k$  при возрастании  $m$ . Модуль комплексных корней находится из соотношения:

$$|\rho| = \left( \frac{A_{k+1}}{A_{k-1}} \right)^{1/2^m}. \quad (2)$$

Действительную и мнимую части комплексно-сопряженных корней определяют по следующим соотношениям:

$$\alpha = -0,5 \cdot \left( \frac{a_1}{a_0} + S_1 + S_2 + \dots + S_n \right), \quad (3)$$

$$\beta = \sqrt{\rho^2 + \alpha^2}. \quad (4)$$

Особенность рассматриваемого метода заключается в том, что для его реализации необходимо определить, какое количество итераций необходимо выполнить для достижения желаемой точности в определении корней. Для решения поставленной задачи проведено исследование ряда характеристических уравнений третьего порядка, имеющих действительные и комплексные корни. Результаты данного метода сравнивались с результатами, полученными методом радикалов, а также с корнями, рассчитанными в пакете MatLab при помощи стандартных функций. Было проведено исследование точности корней уравнения при различном количестве итераций  $m$ . В результате проведения численных экспериментов сделан вывод о том, что при увеличении  $m$  увеличивается точность решения (в качестве показателя точности выбран третий знак после запятой). Также экспериментальным путем было доказано, что максимальное возможное по точности решение достигается уже на седьмой итерации, и полученные корни совпадают с корнями, полученными в математических пакетах.

Алгоритм диагностирования возникновения ошибок при решении характеристических уравнений методом Лобачевского-Греффе-Данделена сформирован в виде дихотомического дерева (рис. 1). Данное дихотомическое дерево получено для характеристического уравнения второго порядка с комплексно-сопряженными корнями, где  $\alpha$  – действительная часть,  $\beta$  – мнимая. При построении бинарного дерева использовался алгоритм поиска ошибок «снизу-вверх», поэтому анализ возможных ошибок начинается с определения адекватности мнимой и действительной частей корней характеристического уравнения правильному решению и заканчивается проверкой правильности начальных коэффициентов квадрирования. В рассмотренном дихотомическом дереве учтены ошибки, которые могут возникнуть в результате недостаточных навыков работы с предлагаемым методом, а также ошибки, связанные с возможными проблемами в знаниях элементарной математики у обучаемого. К ошибкам, возникающим в результате плохой ориентации в методе Лобачевского-Греффе-Данделена,

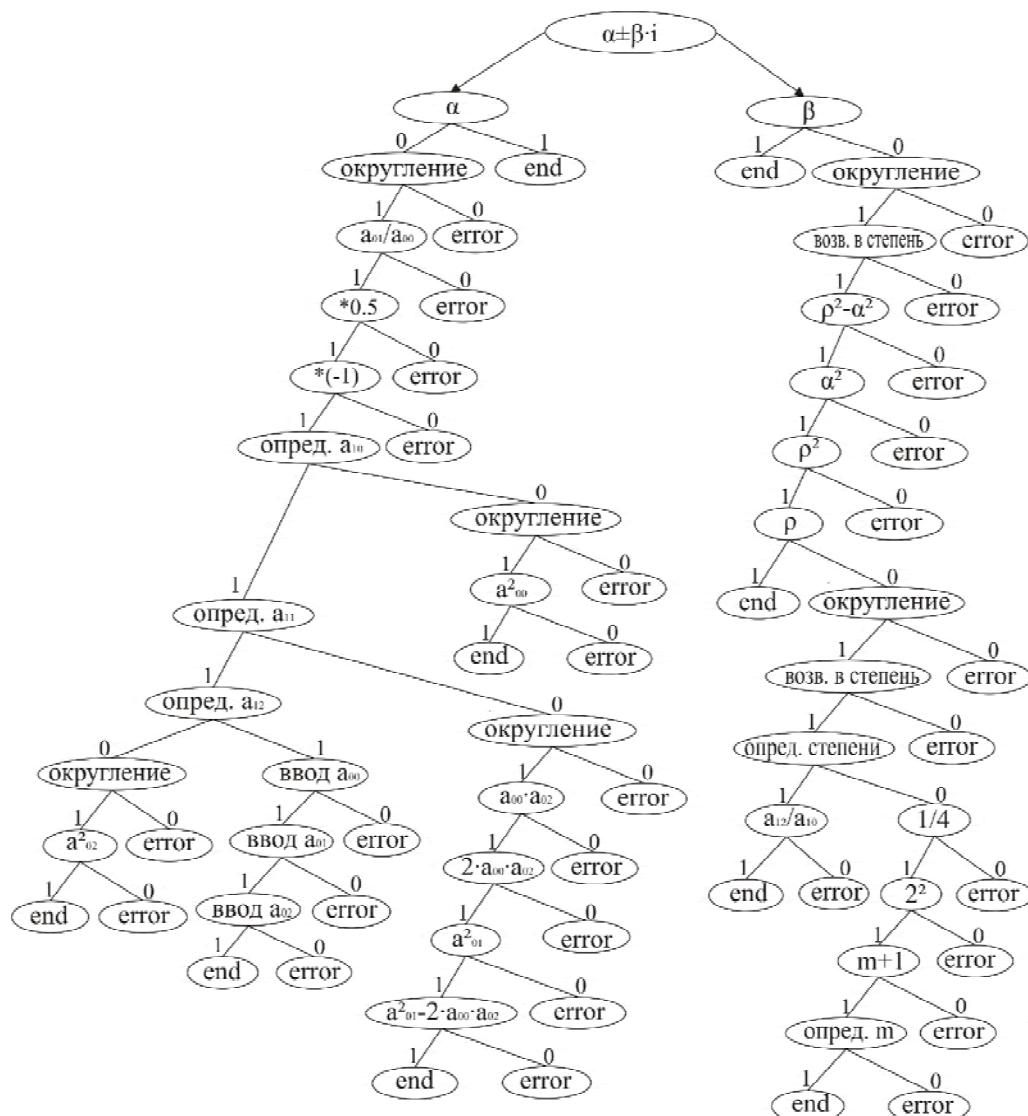


Рис. 1. Дихотомическое дерево поиска ошибок

относятся ошибки, связанные с введением неправильных коэффициентов квадрирования, с недостаточным количеством итераций, а также ошибки, допущенные при определении модуля комплексных корней. К ошибкам второго вида можно отнести ошибки, которые возникают при следующих математических операциях: округление, возвведение в степень, умножение, деление, суммирование, вычитание. При повышении порядка уравнения возникает большее количество ошибок в его решении, а, следовательно, мощность дихотомического дерева значительно увеличивается.

Сформированный алгоритм диагностирования реализован в виде компьютерной оболочки, отражающей итерационную особенность нахождения корней характеристического уравнения данным методом и учитывающей возможные варианты их существования.

Компьютерная оболочка сформирована в рамках универсальной среды разработки компьютерных обучающих программ [3], особенностью которой является интерактивное обучение студентов при получении профессиональных знаний и умений, диагностирование места возникновения ошибки в ходе решения задачи и определение ее вида, а также информирование обучаемого о допущенных ошибках и последующее его оценивание с учетом результатов диагностирования. Экранные формы компьютерной оболочки приведены на рис. 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование данной разработки при изучении базовых дисциплин кафедры систем управления летательных аппаратов позволяет обеспечить не только ознакомление студентов с предложенным теоретическим материалом, но и выработать у них профессиональное умение решать описанную задачу, а также закрепить полученный навык нахождения корней характеристического уравнения, необходимый для моделирования и про-

ектирования систем управления. Следует отметить, что рассмотренный метод Лобачевского-Греффе-Данделена достаточно формализован, поддается алгоритмизации, и, следовательно, может быть использован для обучения студентов технических специальностей, связанных с изучением основ теории и систем автоматического управления. Предложенный результат по оценке точности нахождения корней может быть применим для расширения возможностей математических пакетов анализа и синтеза систем управления.

Особенность предложенной модели поиска ошибок и алгоритма их диагностирования, сформированного в виде дихотомического дерева, состоит в пошаговом контроле усвоения информации, формировании сообщения о неправильном прохождении определенного этапа алгоритма сразу после допущенной ошибки, что более эффективно и целесообразно с педагогической точки зрения, а также помогает обучаемому самостоятельно устраниТЬ ошибку и понять причины ее возникновения.

Дальнейший этап исследований представляет собой тестирование компьютерной оболочки, проведение численных экспериментов с участием обучаемых, а также оценку адекватности разработанной системы процессу обучения и психологических особенностей восприятия студентами предложенного численного метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Информационно-аналитические модели управления технически высшими учебными заведениями / [Гуржий А. Н., Кривцов В. С., Кулик А. С., Мирная Е. В., Чухрай А. Г.]. – Х. : ХАИ, 2004. – 386 с.
- Пищухина, О. А. Информационная технология разработки компьютерных обучающих программ / О. А. Пищухина, Д. В. Бирюкова, О. В. Клименко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 2 (14). – С. 57–62.
- Development of the universal environment for creation and translation of intelligent tutoring programs / [A. Kulik,

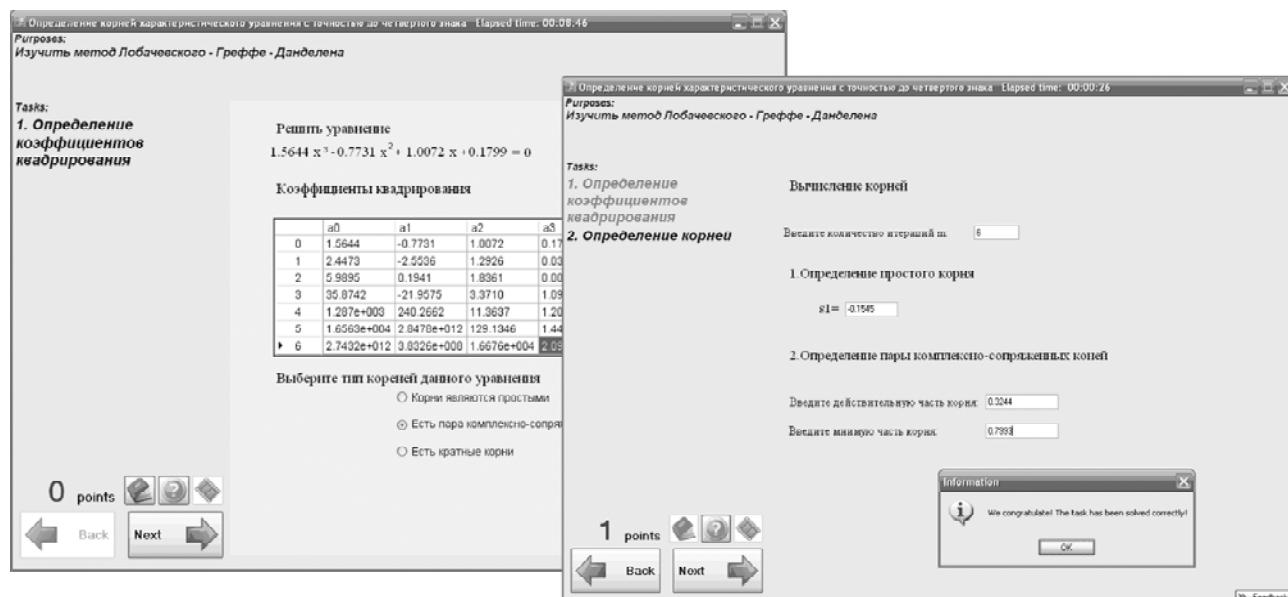


Рис. 2. Экранные формы компьютерной оболочки

- A. Chukhray, S. Pedan, T. Kulik]. – In Proceedings of the International Conference of «Interactive computer aided learning» ICL 2009 : EPortofolio and Quality in e-Learning, Austria, Villach, 2009. – P. 579–588.
4. Педан, С. И. Модели и методы интеллектуальной компьютерной поддержки приобретения профессиональных знаний и умений / Педан С. И. // Системи управління, навігації та зв'язку : збірник наукових праць. – К., 2011. – Вип. 4 (20). – С. 177–190.
5. Свідоцтво № 17725. Комп'ютерна програма «Навчальна програма розв'язання диференційних рівнянь операторним методом» / О. О. Піщухіна, Д. В. Бірюкова, О. В. Клименко (Україна) – Дата реєстрації 28.08.06.
6. Свідоцтво № 17651. Комп'ютерна програма «Навчальна програма розв'язання диференційних рівнянь методом Ейлера» / О. О. Піщухіна, Д. В. Бірюкова, О. В. Клименко (Україна) – Дата реєстрації 15.08.06.
7. Дергачев, К. Ю. Формирование комплекса интеллектуальных обучающих программ при решении навигационных задач / Дергачев К. Ю., Пищухина О. А., Ключок А. Ю. // Людина і космос. – 2011. – С. 211.
8. Пищухина, О. А. Подход к формированию обратной связи в интеллектуальных обучающих системах в сфере высшего технического образования / О. А. Пищухина, А. Ю. Ключок // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 2. – С.107–110.
9. Кулик, А. С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления / А. С. Кулик – Х. : Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ», Бизнес Информ, 2000. – 260 с.
10. Демидович, Б. П. Основы вычислительной математики / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М. : Наука, 1986. – 664 с.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2012.

Кулік А. С., Піщухіна О. О., Ключок А. Ю.

МОДЕЛІ ТА АЛГОРІТМИ ПОШУКУ ПОМИЛОК ПРИ РОЗВ'ЯЗАННІ ЗАДАЧ З ВИКОРИСТАННЯМ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБІВ НАВЧАННЯ

Запропоновано алгоритм діагностування помилок в комп'ютерній навчальній програмі розв'язання характеристичного рівняння системи управління з використанням чисельного методу, особливістю якого є формування продукційної бази знань пошуку помилок і використання дихотомічного дерева в процесі діагностування.

**Ключові слова:** комп'ютерні навчальні програми, діагностування, дихотомічне дерево.

Kulik A. S., Pishchukhina O. A., Klochok A. Yu.

MODELS AND ALGORITHMS FOR FINDING ERRORS WHILE SOLVING TASKS USING COMPUTER-ASSISTED LEARNING

An algorithm for diagnosing errors in a computer training program for solutions of the control system characteristic equation using a numerical method is offered. Its feature is the formation of a product knowledge base for searching errors and using dichotomous tree in the process of diagnosis.

**Key words:** computer training programs, diagnosis, dichotomous tree.

УДК 004.652.4+004.827

Мельникова Н. І.

Асистент Національного університету «Львівська політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕКСПЕРТНИХ СИСТЕМ ПРИЗНАЧЕННЯ ЛІКУВАННЯ

У статті розроблено моделі лікувальної експертної системи, що оптимізують процес призначення лікування та забезпечують підвищення ефективності одужання пацієнтів.

**Ключові слова:** модель експертної системи, оптимізація процесу, медичні системи.

### ВСТУП

Безліч чинників і складність взаємодії в ході прийняття рішень роблять медицину однією з галузей де процедура отримання оптимальних рішень ускладнюється. Ситуацію посилює відсутність стандартизації в термінології, форматі, шкалах вимірювання. Ще немає гнучких і легко використовуваних комп'ютерних методів машинного представлення медичних знань, а також формалізації прийняття рішень. Більш того, на сьогодні практично не існує аналогів лікувальних експертних систем (ЕС), які давали б практичному лікарю-фахівцю структуровані терапевтичні схеми медикаментозного призначення для лікування різних патологій. Складність полягає в створенні інформаційної моделі представлення знань даної предметної області (ПО), яка вимагає знань кваліфікованого експерта в даній області. Внаслідок цього лікувальні

інформаційні системи (ІС) дають потенційну платформу для подальших досліджень та обробок.

Основними задачами, що виникають при моделюванні інформаційних медичних систем, є наступні:

– узагальнення методів представлення складно-формалізованих даних та забезпечення коректного вирішення задач в предметних областях медицини;

– розроблення моделі та методів функціонування лікувальної ІС;

– розроблення алгоритмів підбору оптимального механізму лікувальних фармацевтичних схем;

– розробка системи підтримки лікувальних рішень, які поєднують переваги традиційних методів подання експертних знань;

– впровадження прототипу лікувальної системи в медичному закладі та апробація результатів роботи розроблених алгоритмів.

## 1. ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ ЛІКУВАЛЬНОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ

Описані особливості ЕС призвели до необхідності введення формальної моделі лікувальної експертної системи (ЛЕС). Для формалізованого представлення ЛЕС, завданням якої є підбір оптимального механізму лікувальної фармацевтичної схеми, ми беремо за основу структурну модель продукційної ЕС, яку зазвичай використовують для вирішення такого класу задач.

База знань у відповідності до структурної схеми ЕС полягає в підборі певної множини правил  $P$  [1]:

$$P = \{P_1, \dots, P_n\}, \quad (1)$$

де продукція

$$P_i = s_{i_1} \wedge s_{i_2} \wedge \dots \wedge s_{i_k} \rightarrow s_j, \quad (2)$$

та скінченної множини фактів  $S$ :

$$S = \{s_1, \dots, s_k\}. \quad (3)$$

Усі правила, керуючись механізмом виводу ЛЕС, можна відобразити у вигляді підмножин правил:

$$P : \Psi \rightarrow \Omega, \quad (4)$$

де  $\Psi = \Psi(s_i), s_i \in S$  та  $\Omega = \Omega(s_j), s_j \in S$ ,  $\Omega$  – схема лікування,  $\Psi$  – множина чітких та нечітких параметрів пацієнта.

Прикладом фактів є нечіткі параметри: бактеріальна флора, локалізація запального процесу, анатомічна локалізація, супутня патологія та ін.

Прикладом правил є підбір препаратів на основі обраних чітких та нечітких параметрів.

Можемо стверджувати, що ЛЕС характеризується множиною входів та вихідних параметрів:

$$LS = \langle S, A, P, Z, G, gf, ge, F \rangle, \quad (5)$$

де  $Z$  – множина всіх можливих вихідних даних;  $G$  – кінцева множина станів діалогової системи;  $gf$  – початковий стан системи,  $gf \in G$ ;  $ge$  – кінцевий стан системи,  $ge \in G$ ;  $F$  – множина процедур прийняття рішень;  $P$  – множина правил;  $A$  – множина чітких даних;  $S$  – множина нечітких даних, яка складається з двох підмножин  $S_1$  та  $S_0$ , що представлено на рис. 1:

$$S = S_0 \cup S_1, \quad (6)$$

де  $S_1$  будемо вважати множиною констатованих параметрів та  $S_0$  – множиною непомічених параметрів. На початку роботи ЕС множина  $S_1$  містить параметри, які в процесі системи поповнюються елементами множини  $S_0$ :

$$S_0 = S_{0use} \cup S_{0unuse}, \quad (7)$$

$$S_1 = S_1 \cup S_{0use}, \quad (8)$$

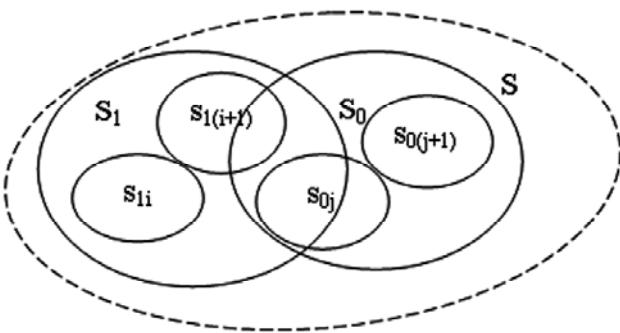


Рис. 1. Формування множини нечітких параметрів

$$S_0 = S_0 \setminus S_{0unuse}. \quad (9)$$

Правила  $\Psi \rightarrow \Omega$  інтерпретуються за допомогою конструкцій:

ЯКЩО  $\Psi$  ТОДІ  $\Omega$ .

Отже механізм виводу передбачає виконання правила, ліва частина якого  $\Psi$  співставляється з існуючими параметрами у множині  $S_1$  і набуває істини. В результаті множина  $S_1$  поповнюється за рахунок фактів, що констатуються у правій частині продукції  $\Omega$ . Це породжує ланцюг виводів проміжних та остаточних рішень [1].

Множини продукцій та вихідних даних організовані в деяку систему, представлену у вигляді дерева рішень. Фрагмент такого дерева підбору терапевтичних схем лікування з вершинами-препаратами  $z_1, z_2, \dots, z_{12}$  представлений на рис. 2.

На основі формулювання математичної моделі ЛЕС була створена концептуальна модель, яка представляє змістовний опис механізму підбору терапевтичної схеми лікування хворих.

На даній схемі до множини чітких даних ( $A$ ) входять параметри, що характеризують особливості певного лікарського засобу, які можна вважати сталими величинами (рис. 3).

Розглядаючи множину нечітких даних ( $S$ ), можна стверджувати, що вони взаємозалежні, так як множина  $S$  складається з двох підмножин  $S_0$  та  $S_1$  (рис. 4). При наявності даних підмножини  $S_1$  формуються дані підмножини  $S_0$ .

Запропонована концептуальна модель (рис. 5) дозволяє оптимізувати процес реалізації в залежності від поширення, характеру диференціювання процесу і, таким чином, забезпечити підвищення ефективності лікування хворих: зменшення частоти повторів захворювання, скорочення тривалості періоду лікування.

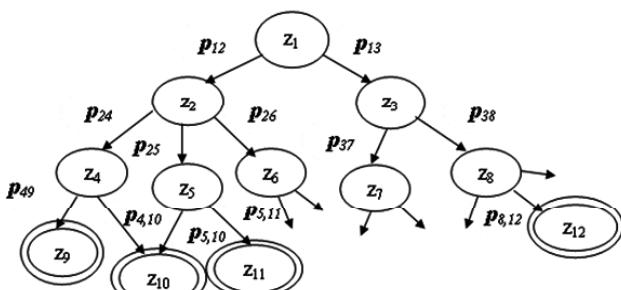


Рис. 2. Граф підбору терапевтичних схем лікування

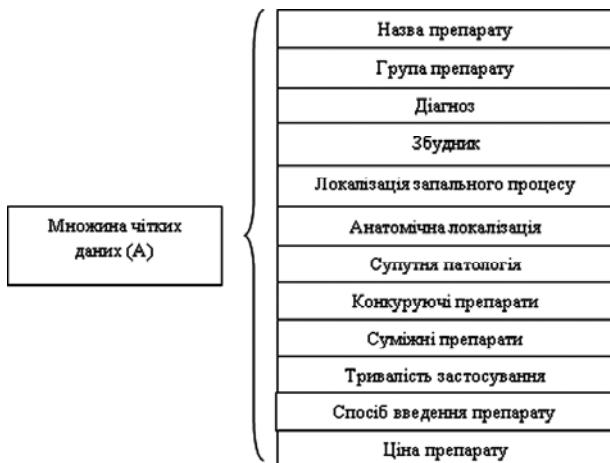


Рис. 3. Перелік параметрів, які входять у групу даних, що належать множині  $A$

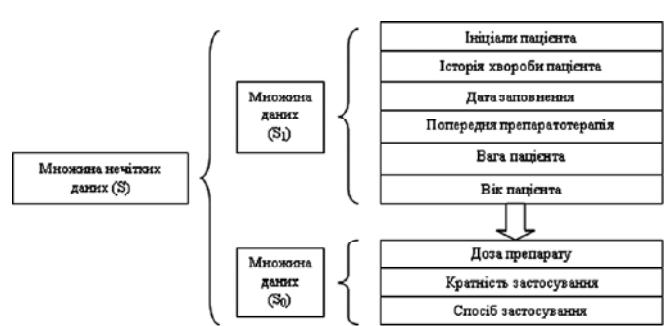


Рис. 4. Перелік параметрів, які входять у групу даних, що належать множині  $S$

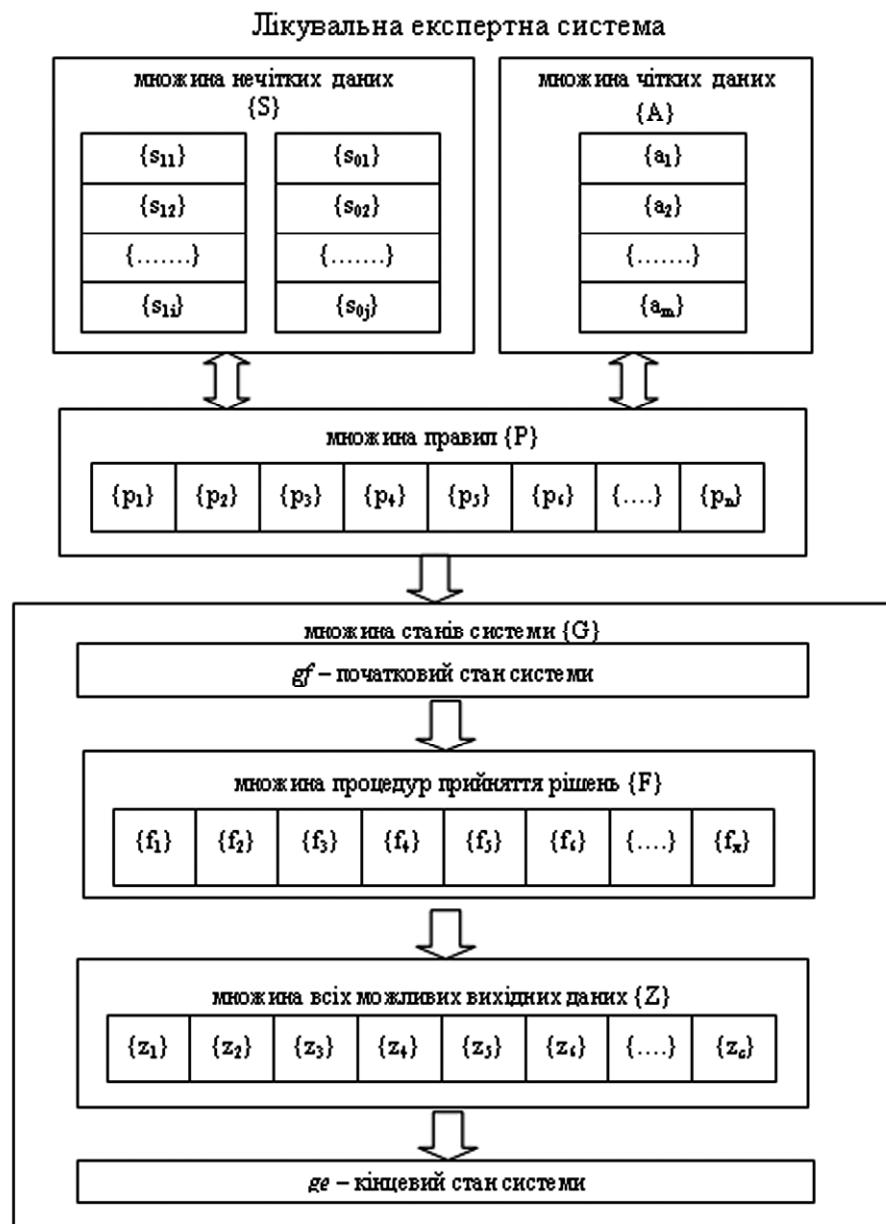


Рис. 5. Концептуальна модель підбору терапевтичної схеми лікування в ЛЕС

## 2. МАТЕМАТИЧНІ АПАРАТИ ОБРОБКИ СКЛАДНОФОРМАЛІЗОВАНИХ ДАНИХ МЕДИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТА ЛІКУВАННЯ

Теорія автоматів – логіко-математична теорія, об’єктом дослідження якої є абстрактні дискретні automati – першні перетворювачі інформації [2, 11]. У дискретній математиці, інформатиці теорія автоматів вивчає абстрактні машини у вигляді математичних моделей і проблеми, які вони можуть вирішувати. За допомогою автомата розв’язано широкий ряд проблем, а саме:

- проблеми «геделівського типу» (повнота, розв’язність тощо);
- проблеми самовдосконалення;
- проблеми самоорганізації;
- проблеми самопроектування.

На даному етапі розгляду перспективності застосування теорії автоматів при вирішенні великого ряду задач динамічних процесів прийняття рішень, можемо стверджувати, що розглянута вище лікувальна експертна система є прототипом скінченного автомата. Концепція запропонованих функціональної схеми та концептуальної моделі ЛЕС базується на опрацюванні вхідних сигналів (множини  $S$  та  $A$ ), які характеризують загальний стан пацієнта, правил (множина  $P$ ), на підставі яких працюють процедури прийняття рішень (множина  $F$ ) при підборі відповідного консервативного лікування патологічного процесу хворого та вихідних сигналів у вигляді підібраних фармаологічних схем лікування (множина  $Z$ ).

Теорія автоматів тісно переплітається з основними принципами теорії алгоритмів. Ідея формується на підставі того, що автомат перетворює дискретну інформацію поетапно в дискретні моменти часу і формує результатуючу інформацію по кроках заданого алгоритму. Ці перетворення реалізуються за допомогою технічних та програмних засобів [9, 11, 12]. На підставі цього інформаційна експертна система за ідеологічним та функціональним призначенням є автомatem, який відображається у вигляді певного пристроя, тобто програмного продукту, куди подаються вхідні сигнали ( $S$  та  $A$ ) і знімаються вихідні ( $Z$ ), що обумовлюється присутністю внутрішніх станів ( $P, F, G$ ).

### Приклад:

У нашому випадку, нехай програмний продукт – це ЛЕС (LS);

– **вихідні сигнали** – це параметри, що характеризують стан пацієнта, а саме:

- діагноз – мастиг;
- локалізація запального процесу – молочна залоза;
- попередня препаратортерапія – парацетамол;
- бактеріальна флора – стафілокок, та ін.;

– **внутрішні стани** – це правила, процедури підбору відповідного лікування ( $P, F$ ) та стани системи, що відтворюють результат взаємодії комуніканта та системи ( $G$ ). Нехай на підставі введених вхідних даних формується запит на мові високого рівня, що конкретизує вибір подальших станів, а саме:

- на підставі діагнозу, локалізації, попередньої препаратортерапії та флори підбираємо ліки. Якщо інформація

за запитом відсутня, генерується повідомлення про пусту множину вихідних даних;

– **вихідні сигнали** – це підібрані терапевтичні схеми лікування хворого ( $Z$ ), а саме: ампіцилін, диклобрю та відповідні схеми застосування.

Можемо описати структуру елементів автомата у вигляді взаємозалежності множин параметрів системи.

Отже,

$$LS = S \times A \cup P \times F \times G \cup Z. \quad (10)$$

Особливістю IEC (інформаційно-експертних систем) є автоматизація вибору і прийняття оптимальних рішень на основі отриманого людиною досвіду та раціонального аналізу зовнішніх дій, описаних у термінах моделі ПО. Керуючись теорією автоматів, реалізація процесу прийняття рішень в ЕС характеризується вхідними сигналами системи у вигляді даних ПО, їхнею обробкою, що забезпечує наявність внутрішніх станів та виведенням кінцевого висновку у вигляді вихідних сигналів.

## 3. ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРИЗНАЧЕННЯ ЛІКУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ СКІНЧЕНОГО АВТОМАТА

Процес призначення лікування, що змодельований за допомогою скінченного автомата (СА), є особливим видом автомата-абстракції, що використовується для опису шляху зміни стану об’єкта (програмного продукту) в залежності від досягнутого стану та інформації [2, 4, 6], отриманої ззовні. Його особливістю є скінченість множини станів. Кількість елементів множини вхідних даних  $\Psi$  системи прийняття рішень є скінченною, тобто існує:

- натуральне число  $k$ , що є числом елементів множини нечітких даних  $S$ ;
- натуральне число  $m$ , що є числом елементів множин чітких даних  $A$ .

Отже,

$$\Psi = S \cup A, \quad (11)$$

де  $A$  – множина чітких даних,  $A \in \Psi$ ;  $S$  – множина нечітких даних,  $S \in \Psi$ ;  $\Psi$  – множина чітких та нечітких параметрів пацієнта.

Теорія скінченних автоматів, що є основною складовою частиною загальної теорії автоматів, має велике прикладне значення. СА можуть розв’язувати велику кількість задач, серед яких автоматизація проектування електронних пристріїв, проектування комунікаційних протоколів, синтаксичний аналіз та інші інженерні застосування. В біології та медицині і дослідженнях штучного інтелекту автомati або їхні ієрархії іноді використовуються для описання неврологічних систем і в лінгвістиці для описання граматики природних мов. На прикладі ЛЕС теорія скінченного автомата дає підґрунття для формалізації процесу прийняття рішень при підборі та призначенні терапевтичного лікування пацієнтів [2, 3, 10]:

$$LS = \Psi \cup P \times F \times G \cup Z. \quad (12)$$

Отже, на підставі введеній множини  $\Psi$ , що містить підмножини  $S$  і  $A$ , множини правил  $P$ , множини процес-

дур  $F$ , множини станів системи та множини вихідних параметрів  $Z$  можемо промоделювати етапи призначення консервативного лікування пацієнтів за допомогою основних складових характеристик скінченного автомата, тобто множин «входів-внутрішніх станів-вихідів».

#### 4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СА НА ПРИКЛАДІ ЛЕС

Поняття СА було запропоновано в якості математичної моделі (ММ) технічних приладів дискретної дії, оскільки будь-який такий пристрій (через скінченість своїх розмірів) може мати тільки скінченну кількість станів. ММ – система математичних спiввiдношень, що описують дослiдjuваний процес або явище, що дозволяють передбачити хiд процесу, розрахувати цiльову функцiю (вихiднi параметри процесу), керувати процесом, проектувати системи з бажаними характеристики [5, 6].

Якщо спiвviдношення задаються аналiтично, то iх можна розв'язати в замкнутому виглядi (явно) вiдносно шуканих змiнних як функцiї вiд параметрiв моделi, або в частково замкнутому виглядi (неявно), коли шуканi змiннi залежать вiд одного або багатьох параметрiв моделi. До моделей цього класу належать диференцiйнi, iнтегральнi, рiзницевi рiвняння, iмовiрнiснi моделi, моделi математичного програмування та iншi.

Базуючись на розробленiй моделi ЛЕС, можна формалiзувати лiкувальну експертну систему у виглядi СА, який характеризується шiст'ма елементами:

$$\langle G, \Psi, Z, \alpha, \beta, g_0 \rangle, \quad (13)$$

де  $G$  – скiнченна множина внутрiшнiх станiв (внутрiшнiй алфавiт або алфавiт станiв);  $\Psi$  – скiнченна множина вихiдних сигналiв (вихiдний алфавiт);  $Z$  – скiнченна множина вихiдних сигналiв (вихiдний алфавiт);  $g_0$  – початковий стан,  $g_0 \in G$ ;  $\alpha$  – функцiя переходiв,  $\beta$  – функцiя вихiдiв:

$$\alpha : G \times \Psi \rightarrow G, \quad (14)$$

$$\beta : G \times \Psi \rightarrow Z, \quad (15)$$

$\alpha(g, \psi)$  та  $\beta(g, \psi)$  – однозначнi функцiї, тобто автомат належить до класу детермiнованих. В детермiнованих автоматах кожен стан має лише один переход для кожного входу. В недетермiнованих автоматах вход може привести до одного, бiльше, нiж одного або зовсiм без переходу для даного стану. Ця рiзниця важлива на практицi, але не в теорiї, через iснування алгоритму трансформацiї будь-якого недетермiнованого СА в бiльш складний детермiнований СА з однаковою функцiональнiстю [3].

Для обох детермiнованих i недетермiнованих СА зручно припустити, що  $\alpha$  неповна функцiя, тобто  $\alpha(g, \psi)$  не має бути вiзначеною для кожної комбiнацiї  $g \in G$  та  $\psi \in \Psi$ . Якщо СА знаходиться в станi  $g$ , i  $\alpha(g, \psi)$  не вiзначенa, тодi система може повiдомити про помилку (тобто вiдхiлити вiвд).

Якщо функцiя вихiду є функцiєю стану i вiхiдного алфавiту ( $\beta : G \times \Psi \rightarrow Z$ ), таke вiзначення вiдповiдає моделi Мiлi, i вона може бути виконана як автомат Мiлi. Якщо функцiя вихiду залежить тiльки вiд стану ( $\beta : G \rightarrow Z$ ), тодi таке вiзначення вiдповiдає моделi Мура, i функцiя може бути виконана як автомат Мура. Скiнченний автомат без функцiї вихiду вiдомий як напiвавтомат або як модель станiв i переходiв [6, 7, 12]. Отже, у даному прикладi ЛЕС скiнченний автомат характеризується на основi концепцiї теорiї автомата Мiлi, i функцiя вихiдних сигналiв залежить вiд множини станiв системи та вiхiдних сигналiв, тобто параметрiв стану пацiєnta. В наступному розглядi модель ЛЕС буде базуватись на моделi автомата Мiлi.

Станам автомата вiдповiдають вершини графа, функцiї переходiв – орiєнтованi ребра, зваженi символами, за якими вiдбувається переход. Заключнi станi позначаються подвiйним кругом. Початковий та заключний стани автомата позначаються стрiлками (рис. 6).

Автомат, що задається  $LC_2$ -схемою, яка характеризує процеси прийняття рiшень в ЛЕС:

$$LC_2 = \langle G, \Psi, Z, \alpha, \beta, g_0 \rangle; \quad (16)$$

функцiонує в дискретному автоматному часi, моментами якого є такти, тобто сумiжнi рiвнi iнтервали часу, кожному з яких вiдповiдають однаковi значення вiхiдних i вiхiдних сигналiв та внутрiшнього стану.

Позначимо  $g(t), \psi(t), z(t)$  – внутрiшнiй стан, вiхiдний та вiхiдний сигнал  $t$ -го такту,  $g(0) = g_0$ .

При вирiшеннi задачi прийняття рiшень мiнiмiзують кiлькiсть станiв автомата для роботи згiдно з заданим алгоритмом, зокрема такий автомат називають абстрактним. Схема абстрактного автомата ЛЕС зображенa на рис. 7.

В момент часu  $t$  абстрактний автомат може сприйняти вiхiдний сигнал  $\psi(t) \in \Psi$ , встановити вiхiдний сигнал  $z(t) \in Z$ ,  $z(t) = \beta[g(t), \psi(t)]$  i перейти зi стану  $g(t) \in G$  в стан  $g(t+1) \in G$ ,  $g(t+1) = \alpha[g(t), \psi(t)]$ . Функцiональна схема абстрактного автомата зображенa на рис. 8.

Виходячи з вищесказаного, автомат Мiлi на прикладi ЛЕС, тобто  $LC_2$ -автомат першого роду, можна описати такими рiвняннями, де станi системи  $g(t+1)$  у певний перiод часу описуються функцiями переходiв

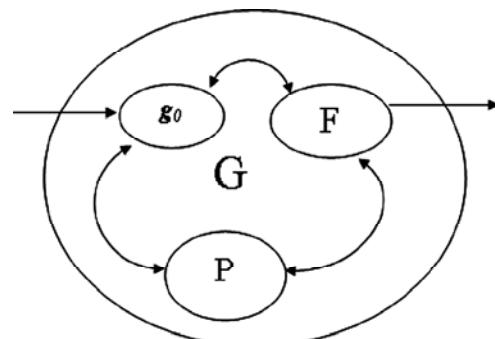


Рис. 6. Дiаграма внутрiшнiх станiв автомата

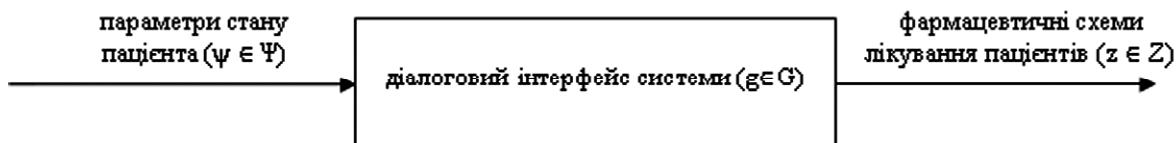


Рис. 7. Схема абстрактного автомата ЛЕС

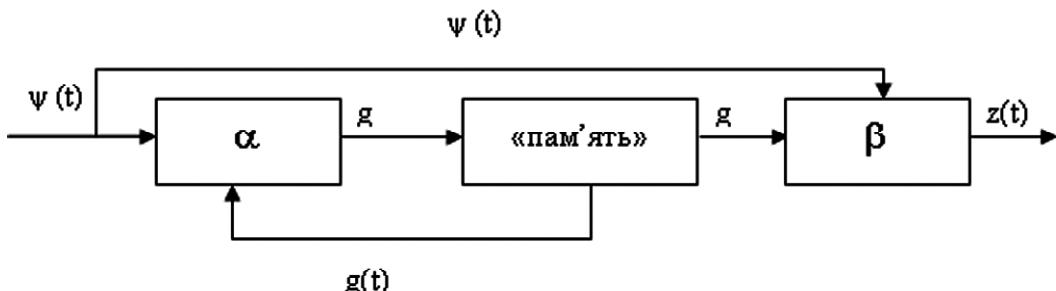


Рис. 8. Функціональна схема абстрактного автомата

$\alpha[g(t), \psi(t)]$ , елементи множини вихідів  $z(t)$  – функціями вихідів, тобто відповідними схемами лікування  $\beta[g(t), \psi(t)]$ , параметрами яких служать елементи множин станів системи та множини вхідних сигналів:

$$g(t+1) = \alpha[g(t), \psi(t)], \quad t = 0, 1, 2, \dots, \quad (17)$$

$$z(t) = \beta[g(t), \psi(t)], \quad t = 0, 1, 2, \dots. \quad (18)$$

$LC_2$ -автомат, що має більше одного стану, називають автоматом з пам'яттю, автомати без пам'яті мають лише один стан [39, 42]. Робота автоматів без пам'яті (комбінаційні або логічні схеми) полягає в тому, що кожному вхідному сигналу ставиться у відповідність один вихідний сигнал.

Опис скінчених  $LC_2$ -автоматів (задання всіх елементів множини  $LC_2 = \langle G, \Psi, Z, \alpha, \beta, g_0 \rangle$ ) на прикладі ЛЕС здійснююмо табличним, графічним та матричним способами.

Найпростіший спосіб – табличний. Він ґрунтуються на використанні таблиць переходів і вихідів, рядки яких відповідають вхідним сигналам автомата, а стовпці – його станам. При цьому звичайно перший зліва стовпець відповідає початковому стану  $g_0$ . На перетині  $i$ -го рядка та  $k$ -го стовпця таблиці переходів знаходитьться відповідне значення функції переходів  $\alpha(g_k, \psi_i)$ , а в таблиці вихідів – відповідне значення функції вихідів  $\beta(g_k, \psi_i)$ , тобто схем лікування (табл. 1, 2).

Для ЛЕС функція виходу  $\beta(g, \psi)$  залежить від множини станів  $G$  та вхідного алфавіту  $\Psi$ . Це дає нам підстави керуватись засадами, на яких ґрунтуються модель автомата Мілі. Приклад табличного задання автомата Мілі  $LC_2$  з трьома станами двома вхідними і двома вихідними сигналами представлено в табл. 3.

При іншому способі опису  $LC_2$ -автомата використовується поняття направленого графа. Граф автомата – це набір вершин, які відповідають певним станам, і дуг,

Таблиця 1. Таблиця переходів Мілі  $LC_2$  автомата

$\Psi \setminus G$	$g_1$	$g_2$	$\dots$	$g_k$
$\Psi_1$	опрацювання запиту 1.1	опрацювання запиту 2.1	$\dots$	опрацювання запиту $k.1$
$\Psi_2$	опрацювання запиту 1.2	опрацювання запиту 2.2	$\dots$	опрацювання запиту $k.2$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$\Psi_{i,i}$	опрацювання запиту $1.i$	опрацювання запиту $2.i$	$\dots$	опрацювання запиту $k.i$

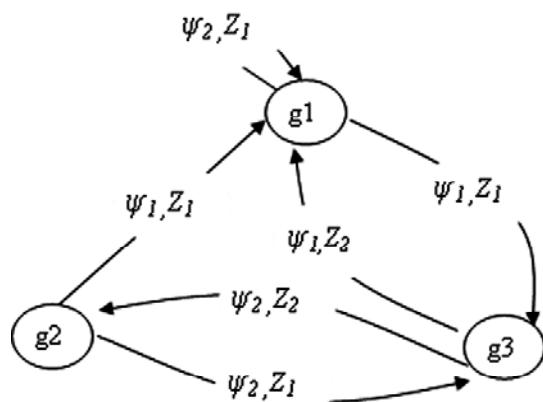
Таблиця 2. Таблиця вихідів Мілі  $LC_2$  автомата

$\Psi \setminus G$	$g_1$	$g_2$	$\dots$	$g_k$
$\Psi_1$	схема 1.1	схема 2.1	$\dots$	схема $k.1$
$\Psi_2$	схема 2.2	схема 2.2	$\dots$	схема $k.2$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$\Psi_{i,i}$	схема 1.i	схема 2.i	$\dots$	схема $k.i$

Таблиця 3. Таблиця переходів та вихідів автомата Мілі  $LC_2$ 

$\Psi \setminus G$	запит на діагноз	запит на флуору	запит на суп. пат.
<i>Переходи</i>			
діагноз	запит на суп. пат.	запит на діагноз	запит на діагноз
бактеріальна флора	запит на діагноз	запит на суп. пат.	запит на флуору
<i>Вихіди</i>			
діагноз	схема 1	схема 1	схема 2
бактеріальна флора	схема 1	схема 2	схема 1

що з'єднують ці вершини та відповідають переходам з одного стану в інший. Якщо вхідний сигнал  $\psi_k$  викликає переход автомата зі стану  $g_i$  в стан  $g_j$ , то на графі автомата дуга, що виходить з вершини  $g_i$  і входить в вершину  $g_j$ , позначається  $\psi_k$ . Для автомата Мілі на цій же дузі позначається вихідний сигнал (рис. 9).

Рис. 9. Граф автомата Mil'i  $LC_2$ 

Математично найзручнішою є матрична форма опису СА. При цьому матриця з'єднань автомата – це квадратна матриця  $C = [c_{ij}]$ , рядки якої відповідають вихідним станам, а стовпці – станам переходу. Для автомата Мілі елемент  $c_{ij} = \psi_k / z_s$ , що стоїть на перетині  $i$ -го рядка і  $j$ -го стовпця, відповідає вхідному сигналу  $\psi_k$ , що викликає переход зі стану  $g_i$  в стан  $g_j$ , і вихідному сигналу  $z_s$ , що видається при цьому переході. Для розглянутого вище автомата  $LC_2$  матриця з'єднань матиме вигляд:

$$C_1 = \begin{pmatrix} \psi_2 / z_1 & - & \psi_1 / z_1 \\ \psi_1 / z_1 & - & \psi_2 / z_2 \\ \psi_1 / z_2 & \psi_2 / z_1 & - \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Якщо переход зі стану  $g_i$  в стан  $g_j$  відбувається під дією декількох сигналів, то елемент матриці  $c_{ij}$  є множиною пар «вхід-вихід» для цього переходу з'єднаних знаком діз'юнкції.

Стан  $g_k$  називається стійким, якщо для довільного вхідного сигналу  $\psi_i \in \Psi_1$  стану  $g_j \in G$ , для яких  $\alpha(g_j, \psi_i) = g_k$ , виконується умова  $\alpha(g_k, \psi_i) = g_k$  та  $\beta(g_k, \psi_i) = z_k$ . Таким чином,  $LC_2$ -автомат називається асинхронним, якщо кожен його стан  $g_k \in G$  є стійким. В асинхронних автоматах зчитування вхідного сигналу відбувається неперервно і, реагуючи на вхідний сигнал певної тривалості, автомат може декілька раз змінювати стан і видавати відповідні вихідні сигнали, поки не перейде в стійкий стан, який вже не може змінитися під дією даного вхідного сигналу [7, 10, 11].

На практиці, автомати завжди є асинхронними, а стійкість їх станів досягається різними способами, наприклад, введенням сигналів синхронізації. Але на рівні абстрактної моделі деколи легше оперувати синхронними скінченими автоматаами [3, 6, 7].

## ВИСНОВКИ

У даній роботі розроблено формальну модель ЛЕС, яка формалізує поведінку людини-експерта при підборі

схеми лікування пацієнтів. Ця модель характеризується сукупністю множин, підмножин чітких і нечітких вхідних параметрів, множини вихідних даних, множини процедур прийняття рішень та множини станів системи.

Запропонована концептуальна модель дозволяє оптимізувати та індивідуалізувати процес реалізації в залежності від поширення, характеру диференціювання процесу захворювання і, таким чином, забезпечити підвищення ефективності лікування хворих: зменшення частоти повторів захворювання, скорочення тривалості періоду лікування.

Припускаємо, що інформаційна експертна система за ідеологічним та функціональним призначенням нагадує автомат, який відображається у вигляді певного пристрою, тобто програмного продукту, куди подаються вхідні сигнали і з'єднуються вихідні, що обумовлюється присутністю внутрішніх станів. Це дало підстави формалізувати модель ЛЕС на основі концепції теорії автомата Мілі, що підтверджує існування функції вихідних сигналів, яка залежить від множини станів системи та вхідних сигналів, тобто параметрів пацієнта.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

- Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий. – С. Пб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
- Глушков, В. М. Енциклопедия кибернетики / ред. В. М. Глушков, в 2 т. АН УРСР. – К. : Голов. ред. Укр. рад. енциклопедії, 1973. – 584, [12] с.
- Шинкарук, В. И. Філософський словник / ред. В. И. Шинкарука. – 2-ге вид. – К. : Голов. Ред. УРЕ, 1986. – 476 с.
- Савельев, А. Я. Прикладная теория цифровых автоматов : учеб. [для вузов по спец. ЭВМ] / А. Я. Савельев. – М. : Высшая школа, 1987. – 272 с.
- Прикладная теория цифровых автоматов / [К. Г. Самофалов, А. М. Романевич, В. Н. Валуйский та ін.]. – К. : Вища школа. Головне видавництво, 1987. – 375 с.
- Майоров, С. А. Структура электронных вычислительных машин / С. А. Майоров, Г. И. Новиков. – Л. : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1979. – 384 с.
- Каган, Б. М. Электронные вычислительные машины и системы : учеб. пособие [для вузов] / Б. М. Каган. – М. : Энергатомиздат, 1991. – 592 с.
- Самофалов, К. Г. Цифровые ЭВМ : теория и проектирование / К. Г. Самофалов, В. И. Корнейчук, В. П. Тарасенко. – К. : Вища школа. Головне видавництво, 1989. – 424 с.
- Савельев, А. Я. Арифметические и логические основы цифровых автоматов / А. Я. Савельев. – М. : Высшая школа, 1999. – 255 с.
- Савельев, А. Я. Прикладная теория цифровых автоматов / А. Я. Савельев. – М. : Высшая школа, 2007. – 272 с.
- Вавилов, Е. Н. Синтез схем электронных цифровых машин / Е. Н. Вавилов, Г. П. Портной. – М. : Советское радио, 2003. – 440 с.
- Соловьев, Г. Н. Арифметические устройства ЭВМ / Г. Н. Соловьев. – М. : Энергия, 1978. – 177 с.

Стаття надійшла до редакції 22.08.2011.

Мельникова Н. И.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСПЕРТНЫХ СИСТЕМ НАЗНАЧЕНИЯ ЛЕЧЕНИЯ

Разработаны модели лечебной экспертной системы, которые оптимизируют процесс назначения лечения и обеспечивают повышение эффективности выздоровления пациентов.

**Ключевые слова:** модель экспертной системы, оптимизация процесса, медицинские системы.

Melnikova N. I.

## MODELING OF EXPERT SYSTEM ASSIGNMENT TREATMENT

Developed models expert system of treatment, that optimize the assignment of treatment and providing efficiency convalescence of patients.

**Key words:** model of expert system, optimization of the process, medical systems.

УДК 539.3

Сабо И. И.<sup>1</sup>, Толок В. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспирант Запорожского национального университета

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор Запорожского национального технического университета

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ О ШТАМПЕ В ДВУМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ

В данной работе строится решение двумерной задачи теории упругости (плоская деформация) о действии штампа на упругую полуплоскость при помощи символьического метода Власова В. З. [1] и точного решения гармонического уравнения для полуплоскости. Замена символьических функций соответствующими гармоническими функциями позволяет получить точное решение рассматриваемой задачи.

**Ключевые слова:** символьический метод, штамп, полуплоскость, гармоническое уравнение, символьическая функция, гармоническая функция, точное решение.

### ВВЕДЕНИЕ

Символьическое решение Власова В. З., полученное методом начальных функций, находит широкое применение при решении задач теории упругости. Суть метода начальных функций состоит в поиске начальных функций. В случае плоской задачи – это поиск функций напряжений и перемещений на плоскости  $y = 0$  [1]:  $U_0(x) = Gu(x, 0)$ ,  $V_0(x) = Gv(x, 0)$ ,  $Y_0(x) = \sigma_y(x, 0)$ ,  $X_0(x) = \tau_{xy}(x, 0)$ . Решение представляется в виде суммы произведений дифференциальных операторов и соответствующих начальных функций [1]:

$$U(x, y) = Gu(x, y) = L_{UU}U_0(x) + L_{UV}V_0(x) + L_{UY}Y_0(x) + L_{UX}X_0(x),$$

$$V(x, y) = Gv(x, y) = L_{VU}U_0(x) + L_{VV}V_0(x) + L_{VY}Y_0(x) + L_{VX}X_0(x),$$

$$Y(x, y) = \sigma_y(x, y) = L_{YU}U_0(x) + L_{YY}V_0(x) + L_{YY}Y_0(x) + L_{YX}X_0(x),$$

$$X(x, y) = \tau_{xy}(x, y) = L_{XU}U_0(x) + L_{XY}V_0(x) + L_{XY}Y_0(x) + L_{XX}X_0(x),$$

$$\sigma_x(x, y) = A_UU_0(x) + A_VV_0(x) + A_YY_0(x) + A_XX_0(x).$$

Дифференциальные операторы могут быть представлены либо в виде бесконечных операционных рядов, либо в виде символьических формул (для плоско-деформируемого состояния) [1]:

$$\frac{1-\nu}{\pi G} \int_{-a}^a p(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi = f(x_1) + h - z_0,$$

$$L_{UV} = -\frac{(1-2\nu)}{2(1-\nu)} \sin(\alpha y) - \frac{\alpha y}{2(1-\nu)} \cos(\alpha y),$$

$$L_{UY} = -\frac{y}{4(1-\nu)} \sin(\alpha y),$$

$$L_{UX} = \frac{1}{\alpha} \sin(\alpha y) - \frac{\sin(\alpha y)}{4\alpha(1-\nu)} - \frac{\alpha y \cos(\alpha y)}{4\alpha(1-\nu)},$$

$$L_{VU} = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \sin(\alpha y) - \frac{\alpha y}{2(1-\nu)} \cos(\alpha y),$$

$$L_{VV} = \frac{\alpha y}{2(1-\nu)} \sin(\alpha y) + \cos(\alpha y),$$

$$L_{VY} = \frac{(3-4\nu)\sin(\alpha y)}{4(1-\nu)\alpha} - \frac{y}{4(1-\nu)} \cos(\alpha y),$$

$$\begin{aligned}
L_{VX} &= L_{UY}, \\
L_{YU} &= \frac{\alpha^2 y}{1-v} \sin(\alpha y), \\
L_{YV} &= \frac{\alpha}{1-v} (\sin(\alpha y) - \alpha y \cos(\alpha y)), \\
L_{YY} &= L_{VV}, \quad L_{YX} = L_{UV}, \\
L_{XU} &= -\frac{\alpha}{1-v} (\sin(\alpha y) + \alpha y \cos(\alpha y)), \\
L_{XV} &= L_{YU}, \quad L_{XY} = L_{VU}, \quad L_{XX} = L_{UU}, \\
A_U &= \frac{2\alpha}{1-v} \cos(\alpha y) - \frac{y\alpha^2}{1-v} \sin(\alpha y), \\
A_V &= -\frac{\alpha}{1-v} (\sin(\alpha y) + \alpha y \cos(\alpha y)),
\end{aligned}$$

$$A_Y = \frac{v}{1-v} \cos(\alpha y) - \frac{y\alpha}{2(1-v)} \sin(\alpha y),$$

$$A_X = \frac{y\alpha}{2(1-v)} \cos(\alpha y) + \frac{3-2v}{2(1-v)} \sin(\alpha y),$$

где  $\alpha = \frac{\partial}{\partial x}$ ;  $f_0(x) \cos(\alpha y)$  и  $f_0(x) \sin(\alpha y)$  – гармонические функции.

В данной работе производится замена дифференциальных операторов гармоническими решениями. Это позволяет получить точное решение задачи о штампе.

### ЗАМЕНА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ОПЕРАТОРОВ ГАРМОНИЧЕСКИМИ РЕШЕНИЯМИ

Рассмотрим гармоническую функцию следующего вида:

$$f(x, y) = f_0(x) \cos(y\alpha). \quad (1)$$

Известно, что если гармоническая функция задана на области:  $-\infty < x < \infty$ ,  $0 \leq y < \infty$ ; а также задано граничное условие:  $f(x, y) = f_0(x)$  при  $y = 0$  (первая краевая задача); то решением будет следующее выражение [2]:

$$Y(x_1, 0) = Y_0(x_1) = \frac{1}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_0(\xi)}{(x_1 - \xi)^2} d\xi. \quad (2)$$

Сопряженной к (1) является следующая функция [3]:

$$f(x, y) = f_0(x) \sin(y\alpha). \quad (3)$$

Ее решением является следующее выражение [4, 5]:

$$f(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(x - \xi) f_0(\xi)}{(x - \xi)^2 + y^2} d\xi. \quad (4)$$

Учитывая решения (2) и (4) дифференциальные операторы примут следующий вид [6]:

$$\begin{aligned}
L_{UU} f_0(x) &= \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi - \frac{y}{2(1-v)} \times \\
&\times \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x - \xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi, \\
L_{UV} f_0(x) &= \frac{2v-1}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x - \xi}{R^2} f_0(\xi) d\xi + \\
&+ \frac{y}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2y(x - \xi)}{R^4} f_0(\xi) d\xi, \\
L_{UY} f_0(x) &= -\frac{y}{4(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x - \xi}{R^2} f_0(\xi) d\xi, \\
L_{UX} f_0(x) &= \frac{3-4v}{4(1-v)} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln(R^2) f_0(\xi) d\xi + \\
&+ \frac{y}{4(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi, \\
L_{VU} f_0(x) &= \frac{1-2v}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x - \xi}{R^2} f_0(\xi) d\xi + \\
&+ \frac{y}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2y(x - \xi)}{R^4} f_0(\xi) d\xi, \\
L_{VV} f_0(x) &= \frac{y}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x - \xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi + \\
&+ \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi, \\
L_{VY} f_0(x) &= \frac{3-4v}{4(1-v)} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln(R^2) f_0(\xi) d\xi - \\
&- \frac{y}{4(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi, \\
L_{VX} &= L_{UY}, \\
L_{YU} f_0(x) &= \frac{y}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2(x - \xi)^3 - 6y^2(x - \xi)}{R^6} f_0(\xi) d\xi, \\
L_{YV} f_0(x) &= -\frac{1}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x - \xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi + \\
&+ \frac{y}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{6y(x - \xi)^2 - 2y^3}{R^6} f_0(\xi) d\xi,
\end{aligned}$$

$$L_{YY} = L_{VV}, \quad L_{YX} = L_{UV},$$

$$L_{XU} f_0(x) = -\frac{1}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x-\xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi -$$

$$-\frac{y}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{6y(x-\xi)^2 - 2y^3}{R^6} f_0(\xi) d\xi,$$

$$L_{XV} = L_{YU}, \quad L_{XY} = L_{VU}, \quad L_{XX} = L_{UU},$$

$$A_U f_0(x) = -\frac{2}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2y(x-\xi)}{R^4} f_0(\xi) d\xi -$$

$$-\frac{y}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2(x-\xi)^3 - 6y^2(x-\xi)}{R^6} f_0(\xi) d\xi,$$

$$A_V f_0(x) = -\frac{1}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x-\xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi -$$

$$-\frac{y}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{6y(x-\xi)^2 - 2y^3}{R^6} f_0(\xi) d\xi,$$

$$A_Y f_0(x) = \frac{v}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y}{R^2} f_0(\xi) d\xi -$$

$$-\frac{y}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{y^2 - (x-\xi)^2}{R^4} f_0(\xi) d\xi,$$

$$A_X f_0(x) = -\frac{y}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2y(x-\xi)}{R^4} f_0(\xi) d\xi +$$

$$+\frac{3-2v}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x-\xi}{R^2} f_0(\xi) d\xi,$$

где  $R^2 = (x-\xi)^2 + y^2$ .

Полученные соотношения удовлетворяют уравнениям теории упругости.

### РЕШЕНІЕ ЗАДАЧІ О ШТАМПЕ НА УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТІ

Пусть в однородную изотропную лінейно упругу полуплоскість  $x_3 \geq 0$  вертикально без тренія вдавливається плоский симметричний недеформируемий штамп (рис. 1) [7].

Ось  $0x_3$  совместим з осью симетрії штампа, а начальо системи координат  $0x_1x_3$  розмістимо на границі полуплоскості. Нижній торець штампа обмежений «подошвою» – гладкою невогнутою поверхністю, уравнення якої в пов’язаній з штампом системі координат  $0_1x_1z$  ( $0_1z$  збігається з  $0x_3$ ,  $z_0$  – відстань між  $0_1$  і лобовою точкою  $M$  – вершиною подошви) має вид [7]:

$$z = f(x_1). \quad (5)$$

Здесь  $f(x_1)$  – четна функція,  $f(0) = z_0$  і  $f''(x_1) \leq 0$ .

Обозначаючи глибину погружения штампа (переміщення вдоль осі  $0x_3$  його лобової точки) через  $h$ , учитувавши формулу (5) і зв’язок координат  $z = x_3 + z_0 - h$  (рис. 1), отримуємо уравнення подошви в системі  $0x_1x_3$  [7]:

$$x_3 = f(x_1) + h - z_0. \quad (6)$$

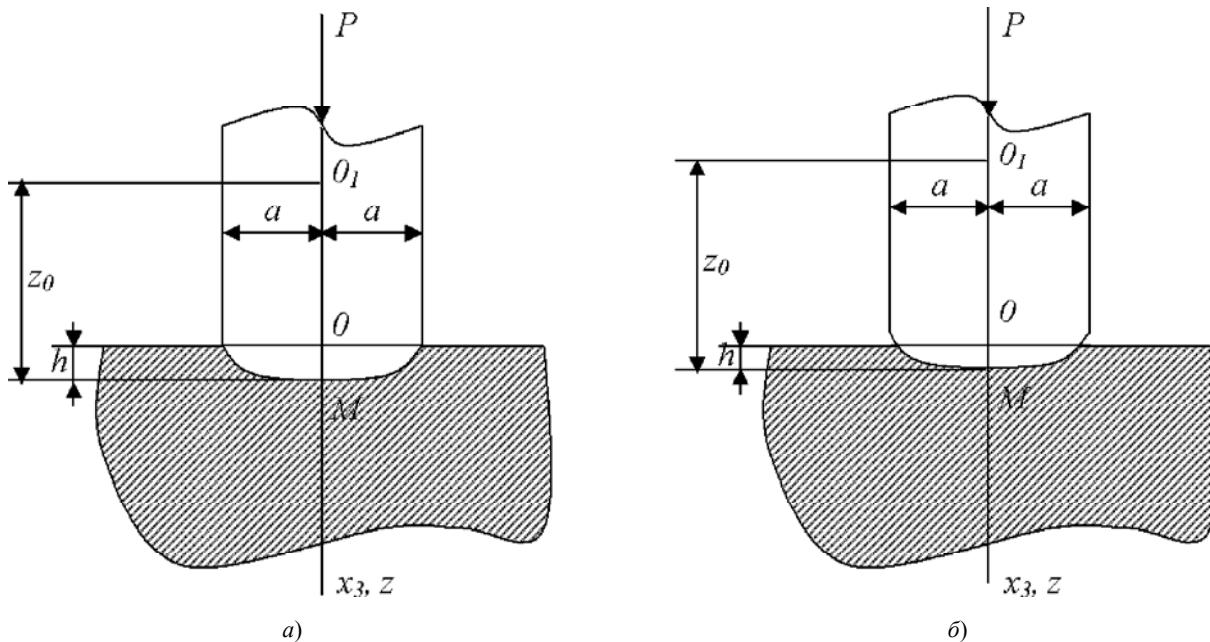


Рис. 1. Штамп на упругій полуплоскості

Правая часть равенства (6) задает нормальные перемещения границы полуплоскости в области контакта.

Будем полагать, что на штамп действует направленная вдоль оси  $0x_3$  сила  $P$ . На поверхности контакта касательные напряжения равны нулю (контакт происходит в условиях полного проскальзывания), а вне этой поверхности граница полуплоскости является свободной. Соответствующая краевая задача включает в себя взятые в той или иной форме уравнения, описывающие плоское деформированное состояние, условие ограниченности решения на бесконечности, а также условия на границе полуплоскости [7]:

$$u_3|_{x_3=0} = f(x_1) + h - z_0 (|x_1| \leq a), \quad (7)$$

$$\sigma_{33}|_{x_3=0} = 0 (|x_1| > a), \quad (8)$$

$$\sigma_{13}|_{x_3=0} = 0 (-\infty < x_1 < \infty). \quad (9)$$

Здесь  $h$  – неизвестная глубина погружения штампа.

В силу линейности задачи условия (7)–(9) снесены на недеформированную границу полуплоскости. Поверхность контакта заменена *областью контакта* – отрезком  $|x_1| \leq a$ . Кроме того, в (7)–(9) сделано еще одно соответствующее линейной теории приближение – не учтены касательные составляющие перемещений материальных точек. Это означает, что точки границы штампа и полупространства, находящиеся в начальный момент взаимодействия на одной вертикальной прямой, остаются на этой же прямой и в процессе контакта. Следовательно, нормальные перемещения в области контакта совпадают с правой частью уравнения (6). В зависимости от геометрии задачи радиус области контакта  $a$  либо задан (рис. 1, *a*), либо неизвестен (рис. 1, *б*) [7].

Замыкает задачу условие равновесия штампа [7]:

$$\int_{-a}^a p(\xi) d\xi = P, \quad (10)$$

$$p(x_1) = -\sigma_{33}(x_1, 0), \quad (11)$$

где  $p$  – контактное давление.

Перепишем все условия задачи в более удобной форме:

$$V(x_1, 0) = V_0(x_1) = -G(f(x_1) + h - z_0), |x_1| \leq a; \quad (12)$$

$$X(x_1, 0) = X_0(x_1) = 0; \quad (13)$$

$$Y(x_1, 0) = Y_0(x_1) = -p(x_1), |x_1| \leq a; \quad (14)$$

$$Y(x_1, 0) = Y_0(x_1) = 0, |x_1| > a;$$

$$\int_{-a}^a p(x_1) dx_1 = - \int_{-a}^a Y_0(x_1) dx_1 = P. \quad (15)$$

Начальные функции с учетом интегральных операторов примут следующий вид:

$$U(x_1, 0) = U_0(x_1) = -\frac{1-2v}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi,$$

$$V(x_1, 0) = V_0(x_1) = \frac{1-2v}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi + \\ + \frac{3-4v}{4(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln|x_1 - \xi| Y_0(\xi) d\xi, \quad (16)$$

$$Y(x_1, 0) = Y_0(x_1) = \frac{1}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{V_0(\xi)}{(x_1 - \xi)^2} d\xi,$$

$$X(x_1, 0) = X_0(x_1) = \frac{1}{1-v} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{(x_1 - \xi)^2} d\xi + \\ + \frac{1-2v}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Y_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi. \quad (17)$$

Подставим выражение (17) в условие (13):

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{(x_1 - \xi)^2} d\xi = \frac{2v-1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Y_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi. \quad (18)$$

Проинтегрируем обе части равенства (18) по  $x_1$ :

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi = \frac{1-2v}{2} \int_{-\infty}^{\infty} Y_0(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi. \quad (19)$$

Подставим выражение (16) в условие (12):

$$\frac{1-2v}{2(1-v)} \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U_0(\xi)}{x_1 - \xi} d\xi + \frac{3-4v}{4(1-v)} \times \\ \times \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \ln|x_1 - \xi| Y_0(\xi) d\xi = -G(f(x_1) + h - z_0), |x_1| \leq a. \quad (20)$$

Подставим равенство (19) в выражение (20):

$$-\frac{1-v}{\pi G} \int_{-\infty}^{\infty} Y_0(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi = f(x_1) + h - z_0,$$

$$-\frac{1-v}{\pi G} \int_{-a}^a Y_0(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi = f(x_1) + h - z_0. \quad (21)$$

Подставим равенство (14) в выражение (21):

$$\frac{1-v}{\pi G} \int_{-a}^a p(\xi) (\ln|x_1 - \xi| + C) d\xi = f(x_1) + h - z_0. \quad (22)$$

Выражение (22) в классическом решении получено путем сведения задачи к интегральному уравнению относительно контактного давления и решении задачи о сосредоточенной нагрузке на границе полуплоскости. Дальнейший алгоритм решения является классическим [7].

Дифференцируя уравнение (22) по  $x_1$ , приходим к уравнению Прандтля. Решение этого уравнения [7]:

$$p(x_1) = \frac{1}{\pi \sqrt{a^2 - x_1^2}} \left( P + \frac{\mu}{1-v} \int_{-a}^a \frac{\sqrt{a^2 - \xi^2}}{x_1 - \xi} f'(\xi) d\xi \right). \quad (23)$$

Если радиус области контакта  $a$  известен (рис. 1, а), то давление (23) и есть решение задачи. Если радиус области контакта  $a$  неизвестен (рис. 1, б), то для его определения используют условие ограниченности контактного давления (нормального напряжения на границе полуплоскости) [7].

Поскольку  $f(0) = z_0$ , то из интегрального уравнения (22) с учетом четности контактного давления, а также равенства (15) получаем следующую формулу для глубины погружения штампа [7]:

$$h = \frac{1-v}{\pi \mu} \left( CP + 2 \int_0^a p(\xi) \ln(\xi) d\xi \right). \quad (24)$$

Равенства (23) и (24) являются решением данной задачи при различных формах подошвы штампа (5).

## ВЫВОДЫ

Замена дифференциальных операторов гармоническими решениями позволяет получать точное решение задачи теории упругости. Эффективность метода показана на примере решения задачи о штампе на упругой полуплоскости. Заменив дифференциальные операторы точными решениями гармонического уравнения для полуплоскости, мы получили тот же промежуточный результат, что и в классическом решении. Но, в отличие от классического решения, не пришлось использовать функцию влияния и решение задачи о сосредоточенной нагрузке на границе полуплоскости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов, В. З. Балки, плиты и оболочки на упругом основании / В. З. Власов, Н. Н. Леонтьев. – М. : Физматгиз, 1960. – 491 с.
2. Полянин, А. Д. Справочник по линейным уравнениям математической физики / А. Д. Полянин. – М. : Физматлит, 2001. – 576 с.
3. Зельдович, Я. Б. Элементы прикладной математики / Я. Б. Зельдович, А. Д. Мышикис. – М. : Наука, 1967. – 648 с.
4. Толок, В. А. Операторно-символьные ряды Власова В. З. в решении задач теории упругости в системе Maple / В. А. Толок, В. В. Шапар // Гідроакустичний журнал. – 2006. – № 3. – С. 66–74.
5. Овский, А. Г. Использование системы Maple при реализации метода начальных функций Власова / Е. Е. Галан, А. Г. Овский, В. А. Толок // Вісник Запорізького національного університету: Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. – 2008. – № 1. – С. 16–26.
6. Овский, А. Г. Моделирование схемы решения трехмерной задачи теории упругости в системе Maple / А. Г. Овский, В. О. Толок // Гідроакустичний журнал. – 2008. – № 3. – С. 88–97.
7. Горшков, А. Г. Теория упругости и пластичности / А. Г. Горшков, Э. И. Старовойтов, Д. В. Тарлаковский. – М. : Физматлит, 2002. – 416 с.

Стаття надійшла до редакції 24.12.2010.  
Після доробки 09.03.2011.

Сабо І. І., Толок В. О.

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ПРО ШТАМП У ДВОВІМІРНІЙ ПОСТАНОВЦІ

У даній роботі будеться розв'язок двовимірної задачі теорії пружності (плоска деформація) про дію штампа на пружну півплощину за допомогою символічного методу Власова В. З. [1] і точного розв'язку гармонічного рівняння для півплощини. Заміна символічних функцій відповідними гармонічними функціями дозволяє отримати точний розв'язок розглянутої задачі.

**Ключові слова:** символічний метод, штамп, півплощина, гармонічне рівняння, символічна функція, гармонічна функція, точний розв'язок.

Sabo I. I., Tolok V. O.

## MODELLING THE STAMP PROBLEM IN TWO-DIMENSIONAL FORMULATION

In this paper we construct a solution of the two-dimensional elasticity problem (plane deformation) about stamp action on an elastic half-plane by using the symbolic method of Vlasov V. Z. [1] and the exact solution of the harmonic equation for the half-plane. The substitution of symbolic functions to appropriate harmonic functions allows us to get the exact solution of this problem.

**Key words:** symbolic method, stamp, half-plane, harmonic equation, symbolic function, harmonic function, exact solution.

## ОПЕРАЦИОННАЯ СПЕЦИФИКАЦІЯ ОБ'ЄКТНО-РЕЛЯЦІОННОЇ МОДЕЛІ ДАННИХ

Статья посвящена разработке общих принципов формирования операционной спецификации объектно-реляционной модели данных. Формально определены основные операции, определен базис операционной спецификации объектно-реляционной модели данных. Предлагается использовать аппарат реляционной алгебры с рекурсивной составляющей для выполнения операций над отношениями, которые содержат вложенные неатомарные атрибуты.

**Ключевые слова:** объектно-реляционная модель данных, вложенные атрибуты, рекурсивная реляционная алгебра, операционная спецификация.

### ВВЕДЕНИЕ

Модели данных являются ключевыми компонентами архитектуры современных систем управления базами данных (СУБД) и служат основой разработки общей методологии проектирования информационных систем.

Объективные обстоятельства, такие как: различные способы формального описания объектов в математике; разнообразие структур данных и средств манипулирования данными, развитых в языках программирования; разнообразие предметных областей, отображаемых в базах данных, способствовали неограниченному росту числа моделей данных и поддерживающих их СУБД. В 1977 году А. Макионучи предложил упростить требования, которые выдвигались к первой нормальной форме реляционной модели данных. В дальнейшем такие ученые как Л. Колби, М. Левен, Х. Ли, С. Абитебол, Н. Бидонт, и др. развивали данное направление и предложили ряд моделей данных, которые основывались на этом упрощении.

Подход на основе слабо нормализованных отношений использовался для решения таких задач как обработка текста, проектирование автоматизированных систем документооборота, обработку составных пользовательских типов данных и многих других.

Преимущества такой нормализации отношения позволяет преодолеть ряд ограничений, которые присутствуют в первой нормальной форме. Использование Н1НФ позволяет представить данные об объекте в одном отношении, а не распределять по нескольким. Одним из главных преимуществ данного подхода является минимальное использование операции соединения отношений, на которую приходятся большие временные затраты при выполнении запросов.

Модель базы данных, основанная на принципах Н1НФ, или объектно-реляционная модель данных [1, 5] позволяет отношению хранить атрибуты, которые содержат неатомарные значения, таким образом, такие атрибуты сами являются отношениями (подсхемами).

### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Статья посвящена разработке общих принципов формирования операционной спецификации объектно-реляционной модели данных. Предлагается использовать аппарат реляционной алгебры с рекурсивной составляющей для выполнения операций над отношениями, которые содержат вложенные неатомарные атрибуты.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ОБ'ЄКТНО-РЕЛЯЦІОННОЇ МОДЕЛІ

Модели Н1НФ были разработаны и разделены на две категории. Модели первой категории назывались нерекурсивными моделями [1, 3, 4], а модели второй категории – рекурсивными моделями [1, 2]. Основным отличием является рекурсивный и нерекурсивный характер операторов модели. Рекурсивные операторы могут неоднократно применяться к вложенным отношениям (подсхемам) на его различных уровнях. Нерекурсивные операторы не обладают такими свойствами. Модели, которые поддерживают вложенность или рекурсию имеют ряд преимуществ по сравнению с нерекурсивными, так как являются универсальными для реляционной модели и объектно-реляционной модели. Этот вывод основан на следующих утверждениях:

- для модели, которая содержит вложенные отношения, основным принципом является сокращение числа обрабатываемых кортежей при выполнении операций;
- традиционные методы оптимизации запросов могут использоваться в операциях рекурсивной алгебры. Кроме того, такие методы могут применяться к запросам, которые выражены с помощью рекурсивной алгебры с рекурсивными операциями на любом уровне вложенности;
- в операциях нерекурсивной алгебры действия производятся только на всем кортеже. Рекурсивная алгебра разрешает прямые манипуляции с кортежем, как на верхнем уровне, так и на нижнем уровне вложенных отношений [2].

Для определения операций объектно-реляционной модели данных используем аппарат рекурсивной реляционной алгебры.

Применение операций рекурсивной реляционной алгебры не ограничено количеством уровней вложенности отношений. Такие операции как объединение, разность, пересечение, проекция, селекция, декартово произведение,  $\theta$ -соединение формально определены и используют рекурсивное определение вложенных отношений. Для каждой рекурсивной операции базовым является определение аналогичной нерекурсивной. Рекурсивное определение может быть переведено в одно нерекурсивное, где отношения не содержат других вложенных атрибутов. Рекурсивные операции для вложенных отношений так же формально определены.

## ФОРМАЛИЗАЦІЯ ОПЕРАЦІЙ РЕКУРСИВНОЇ РЕЛЯЦІОННОЇ АЛГЕБРИ

Для рекурсивных вложенных операций объединения, разности и пересечения необходимо наличие двух вложенных (в общем случае) отношений  $r$  и  $q$  со схемами отношений  $R$  и  $Q$  соответственно. Необходимым условием для выполнения операций является так же идентичность схем отношений:

$$R = Q; \quad R = \{S(R), R_1, R_2, \dots, R_n\}, \quad (1)$$

где  $S(R)$  – множество ключей вложенных атрибутов и все атомарные атрибуты  $R$  и  $Q$  (одинаковые для двух отношений);  $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$  – неключевые вложенные атрибуты  $R$  и  $Q$ .

$\text{Atr}(R)$  – множество всех атрибутов (атомарных и вложенных) двух схем отношений  $R$  и  $Q$ ,  $t_r$  и  $t_q$  – кортежи отношений  $r$  и  $q$  соответственно в итоговом отношении.

Каждое определение для рекурсивных операций реляционной алгебры состоит из двух частей: для плоских отношений и вложенных. При этом, нерекурсивная опе-

рация является частным случаем рекурсивной. Выполнения операций рекурсивной реляционной алгебры рассматриваются на примерах схем отношений с вложенными атрибутами (рис. 1).

Рекурсивная операция объединения ( $\cup$ )

Определение операции объединения двух отношений  $r$  и  $q$ ,  $r \cup q$  является комплексным – состоит из двух определений:

1) нерекурсивная операция объединения для плоских отношений  $r \cup q$ ;

2) рекурсивная операция объединения для вложенных отношений  $r \cup q$ :

$$\begin{aligned} r \cup q = \{t \mid & ((\exists t \in r) \wedge (\forall t_q \in q)(t[S(R)] \neq t_q[S(R)])) \\ & \wedge ((\exists t \in r) \wedge (\forall t_r \in q)(t[S(R)] \neq t_r[S(R)])) \\ & \wedge ((\exists t_r \in r) (\exists t_q \in q)(t[S(R)] = t_r[S(R)] = t_q[S(R)])) \\ & \wedge (t[R_1] = t_r[R_1] \cup t_q[R_1]) \wedge \dots \wedge (t[R_n] = t_r[R_n] \cup t_q[R_n]))\}. \quad (2) \end{aligned}$$

Пример 1. Объединение отношений  $R$  и  $Q$ .

$T_1 = R \cup Q$ . Результатирующее отношение  $T_1$  имеет вид (рис. 2).

A	B		
	C	D	
		M	N
01	$a1$	1	F
		2	G
02	$a2$	4	F
		2	G
03	$a3$	1	H
		2	H
04	$a5$	3	K
		4	H
	$a6$	1	T
		2	P

Рис. 2. Результат операции объединения вложенных отношений

A	B		
	C	D	
		M	N
01	$a1$	1	F
		2	G
02	$a2$	4	F
		1	H
03	$a3$	1	H
		2	H

a) Отношение  $R$

Z	K		
	L	K	
		X	Y
01	$a1$	1	F
		2	G
02	$a2$	4	F
		2	G
04	$a5$	3	K
		4	H
	$a6$	1	T
		2	P

б) Отношение  $Q$

F	K		
	P	O	
		1	2
abc	$a$	1	2
		$n$	5
def	$m$	$m$	
		$y$	1
ert	$x$	$x$	5

в) Отношение  $D$

Рис. 1. Схемы отношений  $R, Q, D$

Разность двух отношений  $r$  и  $q$ ,  $r \sqsupseteq q$  определяется как совокупность определения нерекурсивной разности для плоских отношений ( $r - q$ ) и определение рекурсивной разности для вложенных отношений ( $r \sqsupseteq q$ ):

$$\begin{aligned} r \sqsupseteq q = \{t \mid & ((\exists t_r \in r)(\forall t_q \in q)(t[S(R)] = t_r[S(R)] - t_q[S(R)]) \\ & \wedge t[R_1] = t_r[R_1] \wedge \dots \wedge (t[R_n] = t_r[R_n])) \\ & \vee ((\exists t_r \in r), (\exists t_q \in q))((t[S(R)] \neq t_r[S(R)])) \\ & \wedge ((\exists t_r \in r)(\exists t_q \in q)((t[S(R)] = t_r[S(R)] = t_q[S(R)])) \\ & \wedge (t[R_1] = t_r[R_1] \sqsupseteq t_q[R_1]) \wedge \dots \wedge (t[R_n] = t_r[R_n] \sqsupseteq t_q[R_n])))\} \quad (3) \end{aligned}$$

Пример 2. Операция разности для вложенных отношений имеет вид  $T_2 = R \sqsupseteq Q$  (рис. 3).

Аналогично представлено определение рекурсивной операции пересечения:

$$r \bar{\cap} q = \{t \mid (\exists t_r \in r)(\exists t_q \in q)((t[S(R)] = t_r[S(R)] \cap t_q[S(R)]) \\ \wedge t[R_1] = t_r[R_1] \bar{\cap} t_q[R_1] \wedge \dots \wedge (t[R_n] = t_r[R_n] \bar{\cap} t_q[R_n])))\} \quad (4)$$

Пример 3. Производная операция пересечения  $T_3 = R \bar{\cap} Q$  для отношений с комплексной схемой представлена на рис. 4.

Операция вложенной проекции может быть представлена с помощью нерекурсивно и рекурсивной составляющей.

Пусть  $r$  вложенное отношение со схемой  $R$ .

Пусть так же,  $\{R_{a1}, \dots, R_{ak}\}$  – подмножество атомарных атрибутов верхнего уровня  $R$ , над которыми должна выполняться операция проекции и  $\{R_{n1}, \dots, R_{nm}\}$  – подмножество вложенных атрибутов  $R$ , которые могут участвовать в операции проекции полностью или частично, при этом  $(k, m \geq 0)$ .

Прежде чем определить операцию проекции, необходимо дать определение списку проекции.

		B	
		C	D
			M
02	a2	1	H
	a3	1	H
03	a4	2	H

Рис. 3. Результат выполнения операции разности для вложенных отношений

		B	
		C	D
			M
01	a1	1	F
		2	G
02	a2	4	F
03	a3	1	H
		2	H

Рис. 4. Операция пересечения двух отношений с вложенными атрибутами

В общем случае, список проекций – это список пустых атрибутов, которые могут входить в проекцию.

Определение операции проекции  $\tilde{\pi}(rL_n)$  во вложенном отношении  $r$ :

$$\begin{aligned} \tilde{\pi}_{(R_{a1}, \dots, R_{ak}, R_{n1}, \dots, R_{nm}, L_{n1}, \dots, L_{nm})}(r) = \\ = \{t \mid (\exists t_r \in r)((t[R_{a1}] = t_r[R_{a1}]) \wedge \dots \wedge (t[R_{ak}] = t_r[R_{ak}]) \wedge (t[R_{n1}] = \\ = \tilde{\pi}(t_r[R_{n1}]L_{n1})) \wedge \dots \wedge (t[R_{nm}] = \tilde{\pi}(t_r[R_{nm}]L_{nm})))\}, \quad (5) \end{aligned}$$

где  $t_r$  – кортеж отношения  $r$ ,  $t$  – кортеж результирующего отношения, полученного в результате операции проекции.

Пример 4. Операция проекции для отношения  $R$  имеет вид  $T_4 = \tilde{\pi}_{(A, D, (N))}(R)$  (рис. 5).

Операция селекции для вложенных отношений имеет ряд особенностей.

Пусть  $r$  вложенное отношение со схемой  $R$ . Пусть также,  $\{R_{a1}, \dots, R_{ak}\}$  – подмножество атомарных атрибутов верхнего уровня  $R$ , над которыми должна выполняться операция селекции и  $\{R_{n1}, \dots, R_{nm}\}$  – подмножество вложенных атрибутов  $R$ , где  $k$  и  $m$  меньше или равно числу атомарных или вложенных атрибутов верхнего уровня отношения  $R$  соответственно. Пусть  $c$  – множество условий  $R$ . При этом  $c$  имеет вид  $\{c_a, c_n\}$ , где  $c_a = \{c_{a1}, \dots, c_{ak}\}$  – это множество условий, которые должны быть истинными для каждого атрибута  $R_{a1}, \dots, R_{ak}$  отношения  $R$ , соответственно. И  $c_n = \{c_{n1}, \dots, c_{nm}\}$  – множество условий, которые должны выполняться для вложенных атрибутов  $R_{n1}, \dots, R_{nm}$  отношения  $R$ . Когда применяются два множества условий, то результатом является множество, полученное в результате выполнения операции пересечения результатов двух множеств условий.

Вложенная операция селекции может быть определена как:

$$\begin{aligned} \tilde{\delta}_{c_{n1}, \dots, c_{nm}}(rL_\delta) = \\ = \{t \mid (\exists t_r \in r)((t[Attr(R) - \{R_{n1}, \dots, R_{nm}\}] = t_r[Attr(R) - \{R_{n1}, \dots, R_{nm}\}]) \wedge \\ \wedge ((t[R_{n1}] = \tilde{\delta}(t_r[R_{n1}]L_{n1}) \neq \emptyset) \\ \wedge \dots \wedge ((t[R_{nm}] = \tilde{\delta}(t_r[R_{nm}]L_{nm}) \neq \emptyset))\}, \quad (6) \end{aligned}$$

где  $L_\delta$  – список селекции (аналогично определению списка проекции).

		D	
		A	N
01	a1	F	
		G	
02	a2	F	
		H	
03	a3	H	
		H	

Рис. 5. Отношение  $T_4$  – результат выполнения операции проекции

В общем случае, результатом двух операций селекции является операция пересечения двух селекций:

$$\tilde{\delta}_c(r L_\delta) = \tilde{\delta}_{c_{a1}, \dots, c_{ak}, c_{n1}, \dots, c_{nm}}(r L_\delta) = \tilde{\delta}_{c_{a1}, \dots, c_{ak}}(r) \cap \tilde{\delta}_{c_{n1}, \dots, c_{nm}}(r L_\delta). \quad (7)$$

Пример 5. На рис. 6 представлен результат выполнения операции селекции  $T_5 = \tilde{\sigma}_{(A=02 \text{ AND } B(D(M)) < 3)}(R)$ .

Для отношений с вложенными атрибутами определена операция декартового произведения.

Пусть  $r$  и  $q$  два вложенных (в общем случае) отношения со схемами  $R$  и  $Q$  соответственно. Пусть  $\text{Attr}(R)$  – все атрибуты (вложенные и атомарные)  $R$ , а  $\text{Attr}(Q)$  – все атрибуты  $Q$ , а  $L$  – путь соединения в  $R$ . Определим, также, что  $R_i$  – вложенные атрибуты  $R$ ,  $L_i$  – путь  $R_i$ ,  $t_r$  – кортеж в отношении  $r$ ,  $t_q$  – кортеж отношения  $q$ ,  $t$  – кортеж результирующего отношения, тогда:

$$\begin{aligned} (rL \tilde{\times} q) &= (r(R_i L_i) \tilde{\times} q) \equiv (q \tilde{\times} r(R_i L_i)) = \\ &= \{t \mid (\exists t_r \in r)((t[\text{Attr}(R)] - \{R_i\}) \wedge t[R]_i) = \\ &= (t_r[R_i] L_i \tilde{\times} q)\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Для данной операции выполняется свойство коммутативности. Следовательно, верно равенство:

$$(r(R_i L_i) \tilde{\times} q) \equiv (q \tilde{\times} r(R_i L_i)). \quad (9)$$

Особенностью данной операции декартового произведения является возможность ее выполнения на разных уровнях вложенности, в зависимости от пути атрибутов  $L$ . Для двух вложенных отношений операция  $\tilde{\theta}$ -соединения базируется на операторах сравнения, где  $\theta = \{>, <, =, \leq, \geq, \neq\}$ .

Частным случаем является операция естественного соединения, где в качестве оператора сравнения используется равенство ( $=$ ).

Операция  $\tilde{\theta}$ -соединения выполняется путем применения операции селекции к результатам операции декартового произведения двух отношений. Операция сводится к сравнению двух атрибутов в результирующем отношении. Два атрибута должны иметь одинаковый уровень вложенности в итоговом отношении.

Пусть  $r$  и  $q$  два вложенных (в общем случае) отношения со схемами  $R$  и  $Q$  соответственно. Пусть  $X$  и  $Y$  – два атомарных атрибута, которые принадлежат отношениям  $R$  и  $Q$  соответственно,  $\tilde{\theta}$  – условие, которое должно выполняться. Без потери общности,  $L_{\delta Y \rightarrow Y}$  – путь селекции  $Y$ , который начинается с  $Y'$ , который, в свою очередь, принадлежит такому же уровню вложенности как и  $X$ .

A	B		
	C	D	
		M	N
02	a2	1	H

Рис. 6. Операция селекции для вложенных отношений

Тогда, рекурсивное вложенное соединение двух отношений  $r$  и  $q$  можно определить как:

$$r \tilde{\theta} q = \tilde{\delta}((r \times q)_X \theta Y L_\delta Y \rightarrow Y). \quad (10)$$

Пример 6. Операция естественного соединения для отношений  $R$  и  $D$  представлена в виде  $T_8 = R(B, (C, (D))) [M \equiv O] D(F, (K))$ , при этом, на первом этапе, выполняется операция декартового произведения  $R(B, (C, D)) \tilde{\times} D(F, (K))$ , затем – операция селекции, согласно условию. В результате отношение  $T_8$  имеет вид (рис. 7).

Пример иллюстрирует, что если список селекции пуст, то итоговое отношение так же не содержит значений атрибутов на всех уровнях вложенности. Таким образом, в отношении  $T_8$  исключен атрибут  $A = \{02\}$ , т. к. в данном кортеже не найдено подстрок, удовлетворяющим условию  $R(\dots) [M \equiv O] D(\dots)$ . Таким образом, очевидно, что результат операции  $\tilde{\theta}$ -соединения зависит от списка селекции, и соответственно, от результата выполнения промежуточной операции декартового произведения.

## ВЫВОДЫ

В качестве математического аппарата для описания операционной спецификации объектно-реляционной модели данных предлагается использовать рекурсивную реляционную алгебру. В статье исследованы и усовершенствованы основные операции, с помощью которых может обеспечиваться выполнение действий над вложен-

A	B(C, D, K, F)					
	C	D		K		F
		M	N	P	O	
01	a1	1	F	a	1	abc
		2	G	a	2	
		1	F	a	2	
		2	G	a	1	
02	a2	4	F	n	5	def
		1	H	m	5	
		4	F	n	5	
		1	H	m	5	
03	a3	1	H	y	1	ert
		1	H	x	5	
	a4	2	H	y	1	ert
		2	H	x	5	

$$a) R(B, (C, D)) \tilde{\times} D(F, (K))$$

A	B(C, D, K, F)					
	C	D		K		F
		M	N	P	O	
01	a1	1	F	a	1	abc
		2	G	a	2	
03	a3	1	H	y	1	ert
	a4	2	H	y	1	ert

$$b) T_8 = R(B, (C, (D))) [M \equiv O] D(F, (K))$$

Рис. 7. Отношение  $T_8$  – результат операции  $\tilde{\theta}$ -соединения

ными отношениями. Предложена общая интерпретация операции декартового произведения, и соответственно, производных операций. Существует ряд СУБД, в которых реализован объектно-реляционный подход, но такая реализация не содержит комплексной поддержки всех компонент объектно-реляционной модели, в том числе и операционной спецификации. В данной работе операционная спецификация объектно-реляционной модели представлена в общем виде, сохраняя общность с реляционной моделью данных, и не ассоциирована с конкретной реализацией в СУБД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Makinouchi, A. A consideration on Normal Form of Not-Necessarily-Normalized Relations in the Relational Data Model [Text] // in Proc. of the 3rd International Conference on Very Large Data Bases. – Tokyo, 1977. – P. 447–453.
2. Garani, G. Generalized Relation Data Model [Text]: // International Journal of Computer Systems Science and Engineering (IJCSES). – 2007. – vol. 4, N 1. –P. 43–59.
3. Мейер, Д. Теория реляционных баз данных [Текст] : пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – С. 45–48.
4. Тиори, Т. Проектирование структур баз данных: в 2-х кн. [Текст] / Т. Тиори, Дж. Фрай. – М. : Мир, 1985. – Кн. 1. – С. 287 : Кн. 2 – С. 320.
5. Чапланова, Е. Б. Об одном подходе к построению объектно-реляционной модели данных [Текст] / Н. В. Касаткина, С. С. Танянский, Е. Б. Чапланова // Збірник наукових праць

УДК 519.6

Хомченко А. Н.<sup>1</sup>, Мотайло А. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой Херсонского национального технического университета

<sup>2</sup>Старший преподаватель Херсонского национального технического университета

## ДИСКРЕТНЫЙ АНАЛОГ ИНТЕГРАЛА ПУАССОНА ДЛЯ ШАРА

В работе решена задача Дирихле для шара с дискретно заданными условиями на границе. В роли вычислительного шаблона использована конструкция из гексаэдра и октаэдра, вписанных в шар. Получен дискретный аналог интегральной формулы Пуассона в виде пропорциональной стратифицированной выборки.

**Ключевые слова:** задача Дирихле, шар, интеграл Пуассона, шаблон, гексаэдр, октаэдр.

## ВВЕДЕНИЕ

В 1820 г. французский математик, механик и физик Пуассон нашел интегральное представление решения уравнения Лапласа в круге с граничными условиями Дирихле. Трехмерное обобщение интеграла Пуассона для круга называют интегралом Пуассона для шара. Эффективность практических применений интеграла Пуассона и точность вычислений существенно зависит не только от ядра Пуассона, но и от характера заданных граничных условий. Недостатки интеграла Пуассона общеизвестны. Преодолеть некоторые из них можно путем замены интеграла подходящей интегральной сум-

мой. Для шара это непросто, поскольку весовые коэффициенты должны быть непрерывными функциями координат контрольной точки внутри шара. Кроме того, они должны сохранить усредняющие свойства ядра Пуассона. Ниже рассматриваются вычислительные шаблоны, позволяющие построить дискретный аналог интеграла Пуассона для шара. В качестве весовых коэффициентов, «следящих» за внутренней контрольной точкой, используются базисные интерполяционные функции гексаэдра и октаэдра, вписанные в шар. Для октаэдра это новое применение, поскольку базис октаэдра появился совсем недавно. Предложенный дискретный аналог осу-

Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2009. – Вип. 20. – С. 141–146.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2012.

Чапланова О. Б.

## ОПЕРАЦІЙНА СПЕЦИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТНО-РЕЛЯЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДАННИХ

Стаття присвячена розробці загальних принципів формування операційної специфікації об'єктно-реляційної моделі даних. Формально визначено основні операції, визначено базис операційної специфікації об'єктно-реляційної моделі даних. Пропонується використовувати апарат реляційної алгебри з рекурсивною складовою для виконання операцій над відносинами, які містять вкладені неатомарні атрибути.

**Ключові слова:** об'єктно-реляційна модель даних, вкладені атрибути, рекурсивна реляційна алгебра, операційна специфікація.

Chaplanova E.

## OPERATING SPECIFICATIONS OF THE OBJECT-RELATIONAL DATA MODEL

The article proposed the development of general principles of formation of the operating specifications of object-relational data model. Formally defined the basic operations, and defined basis of the operating specifications of object-relational data model. It is proposed to use the apparatus of the relational algebra with a recursive component to perform operations on relations, which contain nested non-atomic attributes.

**Key words:** object-relational data model, nested attributes recursive relational algebra, the operating specification.

ществляет монте-карловское усреднение граничного потенциала, а весовыми коэффициентами являются гармонические функции.

## АНАЛИЗ ПРЕДШЕСТВУЮЩИХ ПУБЛИКАЦІЙ, ЦЕЛЬ СТАТЬІ

Интегральная формула Пуассона [1, 2] для круга (шара) определяет потенциал в любой внутренней точке области в форме взвешенного среднего граничного потенциала. Анализ формулы Пуассона показывает, что по мере приближения контрольной точки к границе области заметно возрастает погрешность вычислений. Вот почему вблизи границы потенциал приходится вычислять с помощью рядов. Можно воспользоваться адаптируемыми шаблонами МКР [3], однако этот подход связан с составлением и решением СЛАУ. Чтобы избежать громоздких процедур матричной алгебры, мы предлагаем достаточно простой (несеточный) метод усреднения граничных потенциалов в шаре. Используемые здесь адаптируемые шаблоны «следят» за координатами контрольной точки внутри шара, непрерывно изменяя весовые коэффициенты усреднения. В какой-то мере это похоже на алгоритм «блужданий по сферам». Существенное отличие в том, что здесь точка старта (контрольная точка) может быть выбрана произвольно. Такое допущение, безусловно, вызывает специфические трудности, поскольку конечно-разностный шаблон принципиально отличается от стандартного (консервативного). Он не является фрагментом ортогональной или какой-либо другой застывшей решетки. «Центральный» узел шаблона имеет прямой «канал связи» с каждым граничным узлом на поверхности шара. По этим каналам в центральный узел транслируется уже усредненная информация. Самый простой адаптируемый шаблон имеет четыре канала, проложенных из контрольной точки внутри шара в вершины вписанного тетраэдра. Наш опыт показал, что для достижения приемлемой точности нужно использовать несколько «стоп-кадров» – вписанных тетраэдров. В роли весовых коэффициентов выступают барицентрические координаты тетраэдра. В данной работе мы используем вписанные гексаэдр и октаэдр. Усреднение на 8-маршрутном шаблоне осуществляется с помощью трилинейного базиса гексаэдра [4], а на 6-маршрутном – с помощью кусочно-линейного базиса октаэдра [5]. Построенный в [6] базис центрированного октаэдра в данном случае не подходит, хотя способ построения позволяет получать базисы как центрированного, так и нецентрированного октаэдра.

Цель статьи – предложить простой и удобный способ приближенного вычисления интеграла Пуассона для шара.

## ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО АНАЛОГА ИНТЕГРАЛА ПУАССОНА ДЛЯ ШАРА

На рис. 1 изображен шар ( $R = 1$ ) с 14 расчетными узлами на поверхности. Первые 8 узлов расположены в вершинах вписанного гексаэдра, узлы с 9 по 14 – в вер-

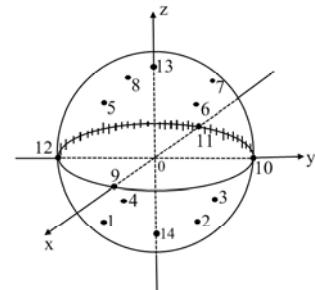


Рис. 1. Шар с расчетными граничными узлами

шинах вписанного октаэдра. Оси ортогональной системы координат  $Oxyz$  проходят через противоположные вершины октаэдра и через барицентры граней гексаэдра.

Классическая формулировка задачи такова: внутри шара  $x^2 + y^2 + z^2 \leq R^2$  найти функцию  $u(x, y, z)$ , удовлетворяющую уравнению Лапласа  $\Delta u = 0$ , если на границе шара  $\sigma$  искомая функция известна  $u|_{\sigma} = f$ .

Интеграл Пуассона для шара имеет вид [2]:

$$u(P_0) = \frac{1}{4\pi R} \iint_{\sigma} \frac{R^2 - r_0^2}{\left( \sqrt{R^2 + r_0^2 - 2Rr_0 \cos \gamma} \right)^3} \cdot f(Q) dS, \quad (1)$$

где  $r_0$  – длина вектора  $\overline{OP_0}$ ;  $P_0$  – контрольная точка внутри шара;  $Q$  – точка на поверхности сферы  $\sigma$ ;  $\gamma$  – угол между векторами  $\overline{OP_0}$  и  $\overline{OQ}$ ;  $f(Q)$  – заданная функция на поверхности  $\sigma$ .

Физическая интерпретация задачи такова: найти температуру внутри шара, если на поверхности шара температура известна. Слово «дискретный» в названии работы отражает характер задания граничных условий на сфере. В данном случае температурное поле моделируется с помощью 14 термоэлементов (термостатов), прикрепленных к поверхности шара. Границная информация представлена выборкой из 14 значений функции  $f(Q)$ . Это типичный пример стратифицированной (двухслойной) выборки. Границная информация усредняется отдельно на каждом шаблоне. Усреднение по вершинам гексаэдра (8 граничных узлов) осуществляется по формуле:

$$\bar{U}_8(P_0) = \sum_{i=1}^8 N_i(x, y, z) \cdot f_i, \quad (2)$$

где  $f_i$  – значения функции  $f(Q)$  в вершинах гексаэдра  $\left( |x| \leq \frac{\sqrt{3}}{3}; |y| \leq \frac{\sqrt{3}}{3}; |z| \leq \frac{\sqrt{3}}{3} \right)$ , а базис гексаэдра имеет вид:

$$N_i(x, y, z) = \frac{1}{8} (1 + \sqrt{3}x_i x)(1 + \sqrt{3}y_i y)(1 + \sqrt{3}z_i z),$$

$$x_i, y_i, z_i = \pm 1. \quad (3)$$

Функції  $N_i(x, y, z)$  удовлетворюють інтерполяційної гіпотезі типу Лагранжа:

$$N_i(x_k, y_k, z_k) = \delta_{ik}, \sum_{i=1}^8 N_i(x, y, z) = 1, \quad (4)$$

где  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера,  $i$  – номер функції,  $k$  – номер розрахункового узла на поверхні шара.

Усереднення по вершинам октаедра (6 граничних узлов) осуществляється по формуле:

$$\bar{U}_6(P_0) = \sum_{i=9}^{14} N_i(x, y, z) \cdot f_i, \quad (5)$$

где

$$N_{9,11}(x, y, z) = \frac{1}{6} (1 + 2|x| \pm 3x - |y| - |z|),$$

$$N_{10,12}(x, y, z) = \frac{1}{6} (1 + 2|y| \pm 3y - |z| - |x|),$$

$$N_{13,14}(x, y, z) = \frac{1}{6} (1 + 2|z| \pm 3z - |x| - |y|). \quad (6)$$

Понятно, что функції (6) обладають властивостями (4). Ось важливо, що оба розв'язки (2) і (5) удовлетворюють рівнянню Лапласа. Поскольку вибірка стратифікована, ці два середніх значення в точці  $P_0$  ще раз усереднюються з коефіцієнтами  $\frac{3}{7}$  і  $\frac{4}{7}$ :

$$\bar{U}(P_0) = \frac{3}{7} \cdot \bar{U}_8(P_0) + \frac{4}{7} \cdot \bar{U}_6(P_0). \quad (7)$$

Така вибірка називається пропорціональною стратифікованою. Формула (7) являється дискретним аналогом інтеграла Пуассона (1) для шара. Нетрудно зазначити, що ця проста формула являється статистичною оцінкою математичного очікування. Роль простих моделей в математичному моделюванні дуже складна. По мнению академика В.В.Новожилова [7], проста модель свідчить про глибокий проникнення автора в существо явища (процеса). Даже якщо проста модель недостаточно точна, вона слугує хорошим нульовим приближенням в ітераційних процедурах. Ось часто усунення моделі досягається усередненням простих моделей. Достаточно вспомнити общеизвестні формули приближеного інтегрування Ньютона-Котеса. Наприклад, формула парабол підходить зваженим усередненням формул центральних прямокутників і формул трапецій. А формула «трех восьмых» – результат зваженого усереднення двох формул трапецій (для внутрішніх і граничних узлов). Легко убедитися, що цей упрощений метод розширяється на двумерні і тривимірні моделі.

Для перевірки точності формули (7) ми використовували результатами обчислень інтеграла Пуассона, приведеними в праці [2]. В.І.Левин обчислив значення інтеграла (1) для трьох точок на вертикальному диаметрі шара:  $O(0,0,0), A\left(0,0,-\frac{1}{2}\right), B\left(0,0,\frac{1}{2}\right)$ .

Границі умови дуже прості: на верхній півсфері поділяється температура  $1^\circ\text{C}$ , на нижній – температура  $0^\circ\text{C}$ . Обчислення за формулою (7) дали наступні результати:  $\bar{U}(0) = 0,5^\circ$ ;  $\bar{U}(A) = 0,171^\circ$ ;  $\bar{U}(B) = 0,829^\circ$ , що в точності співпадає з результатами [2]. Чим складніше граничні умови задачі, тим отримані результати переважають переваги формули (7) перед формулою (1).

Замітка. В цих точках шара, в яких формула (2) завищує результат, формула (5) його занижує, і наоборот. Погрешність в якій-небудь мірі зменшує арифметичне усереднення. І тільки зважене усереднення за формулою (7) практично усуває погрешність. Це означає, що пропорціональна стратифікована вибірка ефективніша простої вибірки.

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

В праці отримано дискретний аналог інтеграла Пуассона для шара, використання якого веде до точних результатів в контрольних точках вертикального диаметра всередині шара [2].

Наукова новизна праці полягає в використанні нового обчислювального шаблону на основі комбінації октаедра і гексаедра в задачі Дирихле для шара [2], яка є першою тестовою задачею для функцій кусочно-лінійного базиса шестиузлового октаедра, отриманого авторами в праці [8].

Практична цінність праці полягає в тому, що становлення стаціонарного поля в будь-якій точці всередині шара може бути встановлено як зважене середнє з узлових граничних значень, розташованих в вершинах октаедра і гексаедра, вписаних в шар.

Використання тел Платона в ролі обчислювальних шаблонів для встановлення температурного поля в шарі стало можливим після появи інтерполяційних базисів гексаедра і октаедра. Нет сомнів, що зявленням базиса икосаедра ми отримаємо не менше ефективну обчислювальну формулу на основі простої вибірки з 12 граничних значень іскомої функції.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фарлоу, С. Уравнения с частными производными для научных работников и инженеров / С. Фарлоу. – М. : Мир, 1985. – 384 с.
2. Левин, В. И. Методы математической физики / В. И. Левин. – М. : Учпедгиз, 1956. – 243 с.
3. Хомченко, А. Н. Две модели усереднения граничных потенциалов на адаптируемом шаблоне / А. Н. Хомченко, М. Т. Наджафов, Н. В. Валько // Геометричне та комп'ютерне моделювання. – 2004. – № 8. – С. 26–30.

4. Козуб, Н. А. От равномерного распределения случайных точек базису трилинейной интерполяции / Н. А. Козуб, А. Н. Хомченко // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2006. – № 1(24). – С. 99–102.
5. Хомченко, А. Н. Барицентрическая задача Мебиуса и односторонние блуждания со случайным стартом / А. Н. Хомченко, А. П. Мотайло // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2011. – № 2(41). – С. 23–26.
6. Хомченко, А. Н. Вероятностная концепция полиномиальной интерполяции в октаэдре / А. Н. Хомченко, А. П. Мотайло // Проблеми математичного моделювання : міждерж. наук.-метод. конф., 25–27 травня 2011 р.: тези доп. – Дніпродзержинськ, 2011. – С. 20–22.
7. Новожилов, В. В. Вопросы механики сплошной среды / В. В. Новожилов. – Л. : Судостроение, 1989. – 400 с.
8. Мотайло, А. П. Базисы шестиугольного октаэдра [Электронный ресурс] / А. П. Мотайло. // Перспективные научные исследования – 2011 : междунар. науч.-практич. конф., 17–25 февр. 2011г. : тезисы докл. – София, Болгария, 2011. – Режим доступа: <http://www.rusnauka.com>.

Стаття надійшла до редакції 29.06.2011.  
Після доробки 15.11.2011.

УДК 681.5.004.94

Хомченко А. Н., Мотайло А. П.

#### ДИСКРЕТНИЙ АНАЛОГ ІНТЕГРАЛА ПУАССОНА ДЛЯ КУЛІ

У роботі розв'язана задача Діріхле для кулі з дискретно заданими умовами на границі. У ролі обчислювального шаблону використано конструкцію із гексаедра та октаедра, вписаніх в кулю. Отримано дискретний аналог інтегральної формулі Пуассона у вигляді пропорціональної стратифікованої вибірки.

**Ключові слова:** задача Діріхле, куля, інтеграл Пуассона, шаблон, гексаедр, октаедр.

Khomchenko A. N., Motailo A. P.

#### DISCRETE ANALOGUE OF THE POISSON INTEGRAL FOR A BALL

The Dirichlet problem for the ball with discretely given conditions on the boundary is solved in the work. Construction from hexahedron and octahedron inscribed in a ball is used in the role of computational template. A discrete analogue of the Poisson integral formula in the form of a proportional stratified sampling is obtained.

**Key words:** Dirichlet problem, ball, Poisson integral, pattern, hexahedron, octahedron.

Высоцина О. С.<sup>1</sup>, Данич В. Н.<sup>2</sup>, Пархоменко В. П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля

<sup>2</sup>Д-р эконом. наук, декан Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля

<sup>3</sup>Канд. государственного управления, доцент Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПРОМЫШЛЕННОМ ПРЕДПРИЯТИИ ПРИ ПОМОЩИ СИСТЕМЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ARENA

В статье представлена имитационная модель производственного процесса промышленного предприятия по производству автомобильных клапанов. Приведено описание процесса построения модели и полученных результатов моделирования.

**Ключевые слова:** Arena, дискретно-событийный подход, имитационное моделирование, моделирование производственных систем.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Современный этап развития экономики Украины характеризуется изменением условий хозяйственной деятельности. Для новых, рыночных условий функционирования промышленных предприятий характерны жесткая конкуренция, недостаточные инвестиции в производство, а также многочисленные факторы неопределенности внутренней и внешней среды. В сочетании со сверхнормативным износом оборудования это приводит к появлению разнообразных видов рисков, ставящих под сомнение возможность стабильной работы предприятий. Используемые на предприятиях системы управления производством позволяют осуществлять контроль состояния и распределения ресурсов, диспетчеризацию производства, управление документами, сбор и хранение данных о технологических процессах. Однако указанных возможностей недостаточно для принятия эффективных управленческих решений. В связи с этим

возникает необходимость разработки единой модели производства, позволяющей осуществлять комплексный анализ и прогноз развития предприятия, позволяя при этом оценить возможные риски реализации тех или иных проектов, а также их взаимное влияние. Разработка единой аналитической модели производства на современном этапе развития науки остается неразрешимой задачей, что в совокупности со стремительным прогрессом информационных технологий создает предпосылки к широкому применению средств имитационного моделирования в решении управленческих задач. Поэтому разработка эффективной и гибкой имитационной модели производственных процессов промышленного предприятия является чрезвычайно актуальной задачей.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Имитационное моделирование является средством решения задач анализа, планирования и реконструкции произ-

водственных и логистических систем. В настоящее время существует три базовых подхода к созданию имитационных моделей, отображающих процессы в системах такого типа: агентный подход, непрерывный подход в форме системной динамики по Форрестеру и дискретно-событийный подход.

Агентный подход используется для исследования децентрализованных систем, когда глобальные правила и законы являются результатом индивидуальной активности членов группы. Цель агентных моделей – получение представлений о глобальных правилах, общем поведении системы, исходя из предположений об индивидуальном, частном поведении ее отдельных активных объектов и взаимодействии этих объектов в системе [1]. Системно-динамический подход представляет собой мощный инструментарий для исследования динамических процессов, направленный на изучение сложных систем и позволяющий выявить причинно-следственные связи между объектами и явлениями [2]. Дискретно-событийный подход предполагает абстрагирование от природы событий и рассматривает только основные события моделируемой системы, такие как: «ожидание», «обработка заказа», «движение с грузом», «разгрузка» и другие. В отличие от системно-динамического подхода для управления системным временем используется принцип особых состояний, когда текущее начальное состояние изменяется на величину, определяемую значением ближайшего момента наступления события, что является удобным при описании технологических процессов, когда возникает необходимость отображения в модели таких событий, как «поломка станка», «окончание обработки детали» и т. д. [3]. В работе [4] проведен сравнительный анализ систем имитационного моделирования и сделан вывод о том, что для моделирования производственных процессов на предприятии одним из наиболее эффективных является использование системы имитационного моделирования Arena в рамках дискретно-событийного подхода.

**Целью** статьи является разработка имитационной модели производственных процессов Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов, которая позволяет рассчитывать основные экономические показатели работы предприятия и оценивать мероприятия, направленные на повышение эффективности его функционирования.

## МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Процесс работы Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов можно представить как множество определенным образом организованных материальных, финансовых и информационных потоков. Концептуальная модель представлена на рис. 1, где – материальный поток, – информационный поток, – финансовый поток.

Для разработки имитационной модели производственных процессов на предприятии рассматривалось движение материальных потоков. Под материальными потоками понимались как сырье и материалы, так и полуфабрикаты, и готовые изделия, в процессе приложения к ним различных логистических операций и отнесенные к определенному временному интервалу. Под логистическими операциями понимались «отгрузка», «транспортировка», «разгрузка», «комплектация», «складирование», «упаковка», а также другие вспомогательные операции. Движение материальных потоков зависит от содержания информационных потоков, так как в основе процесса управления материальными потоками лежит обработка информации. Информационный поток – совокупность сообщений, циркулирующих как внутри предприятия, так и между предприятием и внешней средой. На базе этих сообщений организуется управление производственными и логистическими процессами на предприятии. Совокупность движения денежных средств во времени, сгруппированных по какому-либо признаку и представленных в виде функции времени, представлена в качестве финансового потока. Материальные потоки на своем пути проходят несколько этапов преобразования. В ходе логистического процесса сырье поступает на предприятие от поставщиков, затем на производственных участках организуется его рациональное использование, на последнем этапе готовая продукция (автомобильные клапана) поставляется потребителям в соответствии с принятыми от них заказами.

Для генерации поступления сырья при построении имитационной модели производственных процессов Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов в системе имитационного моделирования Arena использовался блок ‘CREATE’. Интервал времени

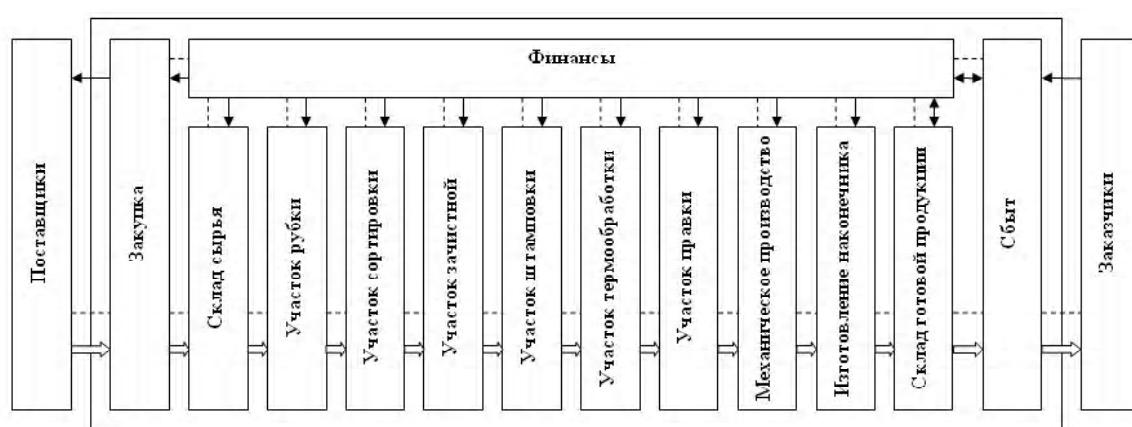


Рис. 1. Концептуальная модель предприятия по производству автомобильных клапанов

между появлением требований составлял 0,169 часов, что соответствует реальной интенсивности поступления прутка из клапанной стали на данный участок предприятия. Блок ‘ASSIGN’ использовался для задания времени обработки детали на станке. Для хорошей визуализации модели данный блок представлен для каждого станка, которые объявлены в элементе ‘ATTRIBUTES’. Блок ‘QUEUE’ использовался для удержания требований до тех пор, пока станок не станет доступным. В элементе ‘QUEUES’ задавались характеристики очередей. При помощи блока ‘SEIZE’ за деталью закреплялся определенный ресурс. Блоки ‘CREATE’, ‘ASSIGN’, ‘QUEUE’ и ‘SEIZE’ представлены на рис. 2.

Для имитации вероятностных и детерминированных решений использовался блок ‘BRANCH’ (см. рис. 3).

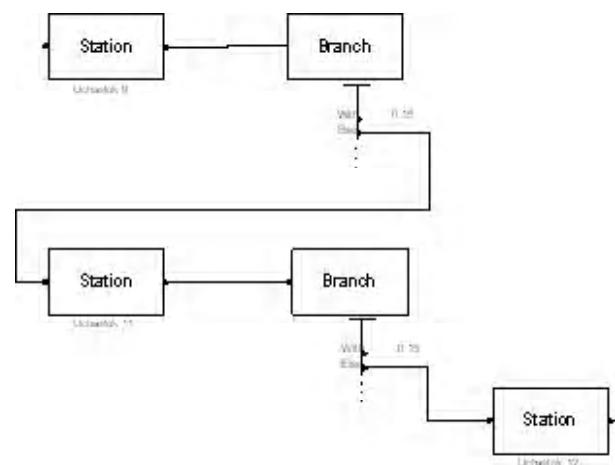
Элемент ‘RESOURCES’ содержит всю информацию, необходимую для полного задания роли прибора обслуживания (станка) в модели. Для имитации обработки каждой детали на станке использовался блок ‘DELAY’. При помощи блока ‘RELEASE’ деталь освобождает станок.

Для изменения мощности ресурсов, а именно для составления расписания работы станков, использовался элемент ‘SCHEDULES’ (см. рис. 4).

Для подсчета количества требований, проходящих через определенные точки в модели, совместно с элементом ‘COUNTERS’ использовался блок ‘COUNT’. Для сбора статистических данных об отдельных наблюдени-

ях в сочетании с элементом ‘TALLIES’ использовался блок ‘TALLY’ (см. рис. 5).

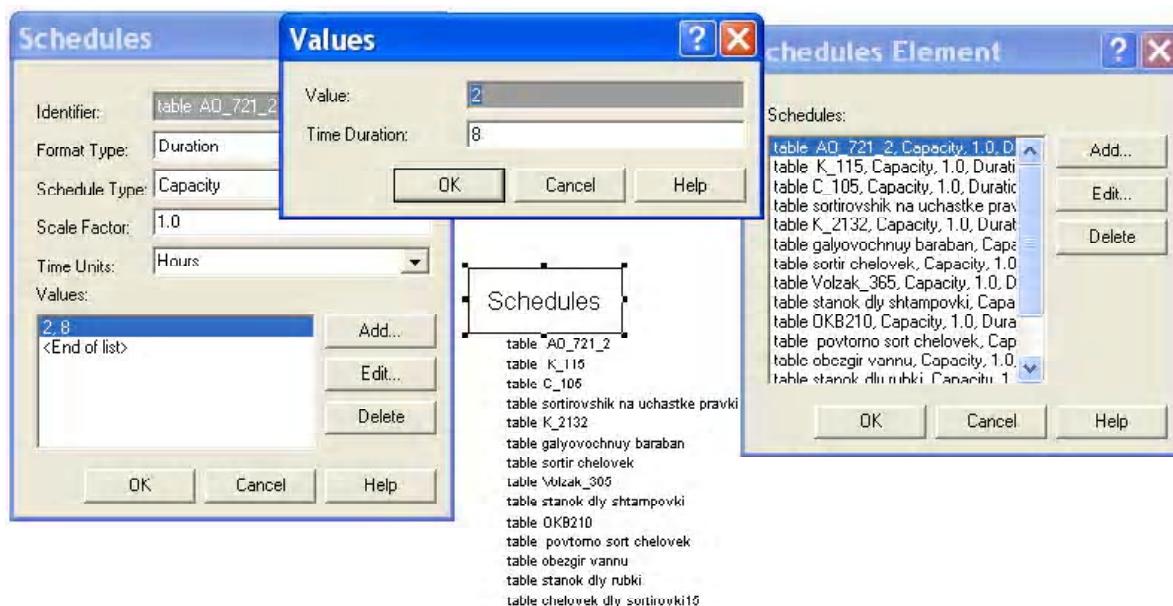
При помощи блока ‘DISPOSE’ моделировался уход требований из системы. Элемент ‘REPLICATE’ применялся для задания множественных прогонов с различными параметрами. Для проверки логики модели использовались средства анимации.



**Рис. 3.** Использование элемента ‘BRANCH’ в модели производства автомобильных клапанов в системе имитационного моделирования Arena



**Рис. 2.** Использование блоков ‘CREATE’, ‘ASSIGN’, ‘QUEUE’ и ‘SEIZE’ в модели производства автомобильных клапанов в системе имитационного моделирования Arena



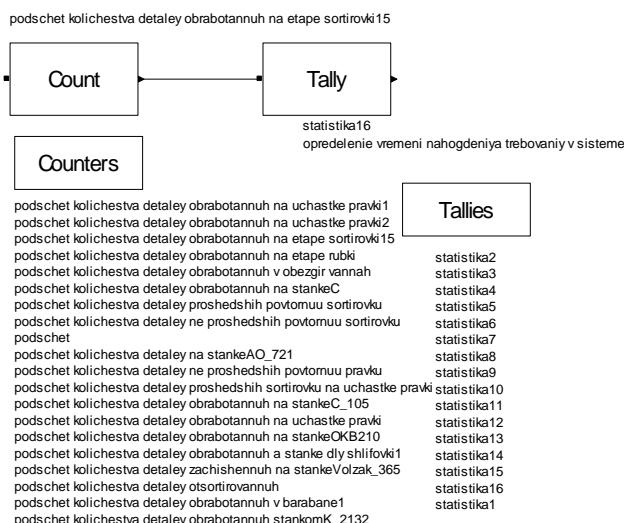
**Рис. 4.** Использование элемента ‘SCHEDULES’ в модели производства автомобильных клапанов в системе имитационного моделирования Arena

Для оценки адекватности разработанной модели проведено сравнение характеристик, полученных при помощи операционного анализа сетей систем массового обслуживания [5], с характеристиками, полученными при моделировании. На основании полученных результатов сделан вывод о том, что имитационная модель производственных процессов Луганского предприятия по производству автомобильных клапанов является адекватной.

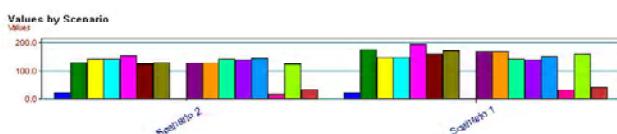
По результатам имитационного моделирования выявлено, что одним из наиболее проблемных является участок штамповки. За один рабочий день в очереди на обслуживание скапливается 2136 заготовок. Стоимость пресса для штамповки клапанов составляет 1800000 грн. Полная стоимость одной единицы клапана составляет 47,66 грн. Себестоимость одной единицы клапана составляет 30,50 грн. Если предприятие приобретет еще один станок, то очередь, в которой детали ожидают освобождение станка, уменьшится в 89 раз (см. рис. 6), производительность предприятия увеличится на 700 единиц в день. Срок окупаемости оборудования составит 7 с половиной месяцев (7,494295), после чего предприятие будет получать чистую прибыль в месяц на 240182,7 грн. больше, чем до покупки оборудования.

## ВЫВОДЫ

В рамках дискретно-событийного подхода при помощи системы моделирования Arena разработана имитационная модель производственных процессов Луганского предприятия по производству автомобильных кла-



**Рис. 5.** Сбор статистических данных в модели производства автомобильных клапанов в системе имитационного моделирования Arena



**Рис 6.** Сравнительная диаграмма производительности ресурсов, полученная в результате анализа данных при помощи инструмента Process Analyzer (Scenario 1 – состояние очередей в модели до оптимизации, Scenario 2 – состояние очередей в модели после оптимизации)

панов. Рассмотрены основные экономические показатели работы предприятия, на основе анализа полученных результатов выявлено, что наиболее проблемным участком в процессе производства автомобильных клапанов является участок штамповки. Для повышения эффективности функционирования предприятия предложено купить дополнительный пресс для штамповки, тогда по результатам моделирования очередь, в которой детали ожидают освобождение станка для штамповки, уменьшится в 89 раз, производительность предприятия увеличится на 700 единиц в день, срок окупаемости оборудования составит 7 с половиной месяцев, после чего прибыль увеличится на 240182,7 грн. в месяц.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что разработанная имитационная модель является мощным научно-прикладным средством для решения задач с целью повышения эффективности работы предприятия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данич, В. Н. Моделирование быстрых и лавинообразных процессов / В. Н. Данич. – Луганск : ВНУ, 2010. – № 3 (145). – С. 86–101.
2. Международное общество системной динамики [Электронный ресурс] = System Dynamics Society : представляет собой профессиональную ассоциацию специалистов в области системной динамики – профессоров ВУЗов, практиков-консультантов и преподавателей со всего мира. – Электрон. дан. – [199-?]. – Режим доступа: <http://www.systemdynamics.org>, свободный – Загл. с экрана. – Яз. англ.
3. Дигрис, А. В. Дискретно-событийное моделирование / А. В. Дигрис. – Минск : БГУ, 2011. – 201 с.
4. Высочина, О. С. Сравнительный анализ систем имитационного моделирования для решения задачи оптимизации производственных процессов промышленного предприятия / О. С. Высочина, В. Н. Данич., М. К. Демин // Вестник Восточноукр. национ. ун-та им. В. Даля – Луганск : ВНУ им. В. Даля, 2012. – № 8 (179), ч. 1. – С. 47–51.
5. Лоу Аверилл, М. Имитационное моделирование / Аверилл М., Лоу, В. Дэвид Кельтон С. Пб. : Питер, 2004. – 848 с.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2012.

Высочина О. С., Даніч В. М., Пархоменко В. П.

МОДЕЛЮВАННЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ НА ПРОМИСЛОВОМУ ПІДПРИЄМСТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ARENA

У статті представлена імітаційну модель виробничого процесу промислового підприємства з виробництва автомобільних клапанів. Наведено опис процесу побудови моделі та отриманих результатів моделювання.

**Ключові слова:** Arena, дискретно-подієвий підхід, імітаційне моделювання, моделювання виробничих систем.

Vysochyna O. S. Danich V. N., Parkhomenko V. P.

MANUFACTURING PROCESSES MODELING OF INDUSTRIAL ENTERPRISES BY MEANS OF ARENA SYSTEM SIMULATION

The article presents a manufacturing processes simulation model of industrial car valves production enterprises. A description of the model building and simulation results were considered.

**Key words:** Arena, discrete-event approach, simulation modelling, simulation of manufacturing systems.

# НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

## НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

### NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 519.7:004.8

Дейнеко А. О.<sup>1</sup>, Плісс І. П.<sup>2</sup>, Бодянський Є. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Аспірантка Харківського національного університету радіоелектроніки

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, провідний науковий співробітник Харківського національного університету радіоелектроніки

<sup>3</sup>Д-р техн. наук, професор Харківського національного університету радіоелектроніки

#### КОМБІНОВАНЕ НАВЧАННЯ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ НЕЙРО-ФАЗЗІ СИСТЕМИ

Запропоновано архітектуру еволюційної нейро-фаззі системи, що не схильна до прокльону розмірності, здатна обробляти інформацію в режимі реального часу, адаптуючи при цьому свої параметри і структуру до умов задачі. У якості активаційних функцій було використано ядерні функції.

**Ключові слова:** еволюційна нейро-фаззі система, нормалізована радіально-базисна нейронна мережа, узагальнена регресійна нейро-фаззі мережа, нечітка машина опорних векторів, ядерна функція активації.

#### ВСТУП

В цей час штучні нейронні мережі отримали широке поширення для вирішення різноманітних задач Data Mining, інтелектуального управління, прогнозування, розпізнавання образів тощо, в умовах невизначеності, нелінійності, стохастичності, хаотичності, різного роду збурень і завад, завдяки своїм універсальним апроксимуючим властивостям і можливостями навчання за даними, що характеризують функціонування явища або об'єкта, що досліджуються.

Процес навчання, як правило, ґрунтується на використанні тієї або іншої процедури оптимізації прийнятого критерію, при цьому швидкість збіжності такої процедури може бути досить низькою, особливо при навчанні багатошарових мереж, що створює істотні проблеми в ситуаціях, коли навчальна вибірка задана не пакетом, а у вигляді послідовності спостережень, що надходять у on-line режимі.

Прискорити цей процес можливо в нейронних мережах, чий вихідний сигнал лінійно залежить від синаптичних ваг, наприклад, радіально-базисних (RBFN) [1, 2] і нормалізованих радіально-базисних (NRBFN) [3, 4] нейронних мереж, однак, їх використання часто ускладнюється, так званим, прокльоном розмірності. І справа тут зовсім не у виникаючих обчислювальних складно-

щах, а в тому, що наявних даних просто може не вистачити для визначення великої кількості синаптичних ваг.

Альтернативою навчанню, яке базується на оптимізації, є навчання, що базується на пам'яті [3] і пов'язане з концепцією «нейрони в точках даних» [5]. Найбільш характерним представником систем, навчання яких засновано на цьому принципі, є узагальнені регресійні нейронні мережі [6], проте, по-перше, вони вирішують задачу інтерполяції, а не апроксимації, а, по-друге, кількість нейронів в цих мережах визначається числом спостережень у навчальній вибірці.

Є доцільною розробка системи, яка в процесі настроювання використовувала б обидва принципи навчання, налаштовуючи при цьому не тільки синаптичні ваги, але і свою архітектуру, еволюціонуючи у часі і пристосовуючись до розв'язуваної задачі [7]. Спроба синтезу такої мережі була зроблена в [8, 9], де запропонована система складалася з кількох паралельно працюючих нейронних мереж з однаковою архітектурою, але навчених на основі різних принципів, і блоку оптимізації, що об'єднує виходи цих мереж та синтезує оптимальний вихідний сигнал системи в цілому.

У порівнянні з нейронними мережами більші можливості мають нейро-фаззі системи [2, 10–12], що поєднують в собі можливості до навчання, апроксимації та

лінгвістичної інтерпретації отриманих результатів. Найбільшого поширення серед цих систем отримала ANFIS [10], вихідний шар якої може бути налаштований за допомогою традиційних процедур ідентифікації. Загалом же абсолютна більшість нейро-фаззі систем навчається на основі тих чи інших процедур оптимізації.

У зв'язку з цим, доцільним є поширення підходу, що використаний у [8, 9], на навчання нейро-фаззі систем.

## 1. АРХІТЕКТУРА НЕЙРО-ФАЗЗІ СИСТЕМИ ТА ЇЇ НАВЧАННЯ НА ОСНОВІ ОПТИМІЗАЦІЇ

Архітектура еволюційної нейро-фаззі системи, що розглядається, наведена, на рис. 1 і складається з п'ятьох послідовно з'єднаних шарів. На вхідний (нульовий) шар подається ( $n \times 1$ ) – вимірний вектор вхідних сигналів  $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$ , що підлягає обробці. Перший прихований шар містить  $nh$  функцій належності  $\mu_{il}(x)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, h$  і виконує фаззіфікацію вхідних змінних, при цьому значення  $h$  може змінюватися в процесі навчання (еволюції) системи. Другий прихований шар здійснює агрегування рівнів належностей, обчислені у першому шарі, і складається з  $h$  блоків множення. Третій прихований шар – це шар синаптичних ваг, що підлягають визначення в процесі навчання системи. Четвертий шар утворено двома суматорами й обчислює суми вихідних сигналів другого й третього шарів. І, нарешті, у п'ятому (вихідному) шарі проводиться нормалізація, в результаті якої обчислюється вихідний сигнал системи  $\hat{y}^{NF}$ .

Таким чином, якщо на вхід системи поданий векторний сигнал  $x$ , елементи першого шару обчислюють рівні належності  $0 < \mu_{li} \leq 1$ , при цьому в якості функцій належності використовуються дзвонуваті конструкції з не строго локальним рецепторним полем, що дозволяє уникнути виникнення «дір» у фаззіфікованому просторі [4]. Найчастіше це гавсіані

$$\mu_{li}(x) = \exp\left(-\frac{(x_i - c_{li})^2}{2\sigma_i^2}\right),$$

де  $c_{li}$  – параметр центру,  $\sigma_i$  – параметр ширини, що обирається емпірично або настроюється в процесі навчання за допомогою процедури зворотного поширення помилок. Помітимо також, що попереднє нормування даних на обмежений інтервал, наприклад,  $-1 \leq x_i \leq 1$ , у ряді випадків спрощує обчислення, оскільки параметр ширини  $\sigma_i$  може бути прийнятий однаковим для всіх компонентів вхідного вектора-образу.

На виходах другого прихованого шару обчислюють-

ся агреговані значення  $\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)$ , при цьому для гавсіанів з одинаковими параметрами ширини  $\sigma$

$$\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x) = \prod_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i - c_{li})^2}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\frac{\|x - c_l\|^2}{2\sigma^2}\right)$$

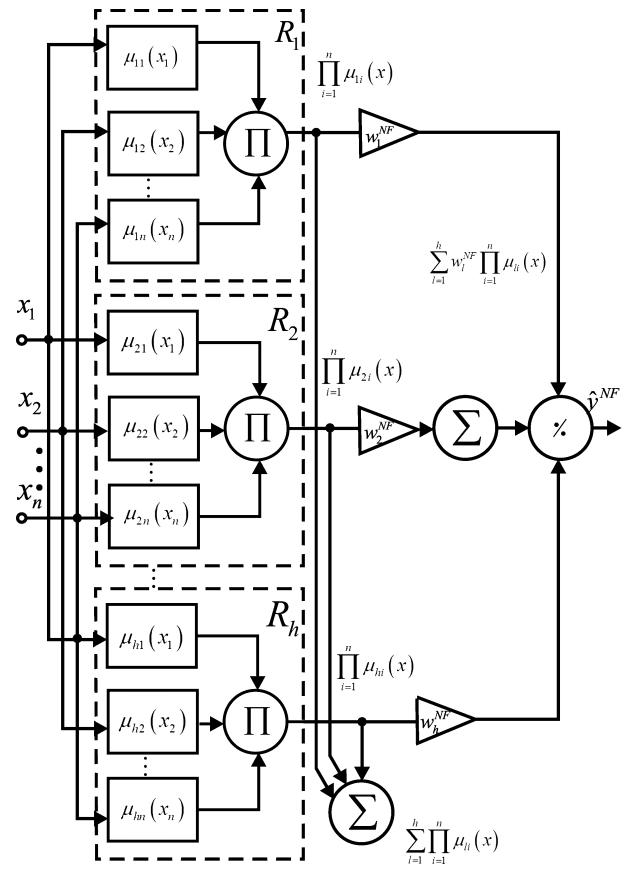


Рис. 1. Еволюційна нейро-фаззі система

(тут  $c_l = (c_{l1}, c_{l2}, \dots, c_{ln})^T$ ), тобто блоки системи обведені пунктиром, фактично обробляють інформацію як радіально-базисні нейрони ( $R$ -нейрони) нейронних мереж.

Виходами третього прихованого шару є значення

$w_l^{NF} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)$  (тут  $w_l^{NF}, l = 1, 2, \dots, h$  – синаптичні ваги), четвертого –  $\sum_{l=1}^h w_l^{NF} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)$  і  $\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)$  й, нарешті, на виході системи в цілому з'являється сигнал

$$\begin{aligned} \hat{y}^{NF}(x) &= \frac{\sum_{l=1}^h w_l^{NF} \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)} = \sum_{l=1}^h w_l^{NF} \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)}{\sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x)} = \\ &= \sum_{l=1}^h w_l^{NF} \varphi_l^{NF}(x) = \left( w^{NF} \right)^T \varphi^{NF}(x), \end{aligned} \quad (1)$$

де

$$\varphi_l^{NF}(x) = \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x) \left( \sum_{l=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{li}(x) \right)^{-1}, \quad w^{NF} = (w_1^{NF}, w_2^{NF}, \dots, w_h^{NF}),$$

$$\varphi^{NF}(x) = (\varphi_1^{NF}(x), \varphi_2^{NF}(x), \dots, \varphi_h^{NF}(x))^T.$$

Нескладно бачити, що розглянута система реалізує нелінійне відображення входів у вихідний сигнал подібно нормалізований радіально-базисній мережі (NRBFN), а по архітектурі збігається із системами Такагі-Сугено-Кангага нульового порядку [10, 13], Ванга-Менделя [1, 11, 14] і структурою Ларсена [2].

Навчання синаптичних ваг цих систем (надалі будемо позначати їх  $w^{TS}$ ) здійснюється шляхом оптимізації (мінімізації) критерію навчання

$$E^{TS} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left( y(k) - (w^{TS})^T \varphi^{NF}(x(k)) \right)^2 \quad (2)$$

що веде до стандартної оцінки найменших квадратів

$$w^{TS}(N) = \left( \sum_{k=1}^N \varphi^{NF}(x(k))(\varphi^{NF}(x(k))^T) \right)^{-1} \left( \sum_{k=1}^N \varphi^{NF}(x(k))y(k) \right), \quad (3)$$

де  $y(k)$  – зовнішній навчальний сигнал.

Вводячи у розгляд  $(h \times N)$ -матрицю значень функцій  $\Phi^{NF} = (\varphi^{NF}(x(1)), \dots, \varphi^{NF}(x(k)), \dots, \varphi^{NF}(x(N)))$  і  $(N \times 1)$ -вектори  $Y = (y(1), \dots, y(k), \dots, y(N))^T$ ,  $\hat{Y}^{TS} = (\hat{y}^{TS}(1), \dots, \hat{y}^{TS}(k), \dots, \hat{y}^{TS}(N))^T$ , можна переписати співвідношення (1)–(3) у вигляді

$$\hat{Y}^{TS} = (\Phi^{NF})^T w^{TS},$$

$$E^{TS} = \frac{1}{2} \|Y - (\Phi^{NF})^T w^{TS}\|^2, \quad (4)$$

$$w^{TS}(N) = \left( \Phi^{NF} (\Phi^{NF})^T \right)^{-1} \Phi^{NF} Y.$$

Якість апроксимації, що забезпечується розв'язком задачі оптимізації, у ряді випадків можна підвищити, використовуючи замість критерію навчання (4), його регуляризовану модифікацію

$$E_R^{TS} = \frac{1}{2} \|Y - (\Phi^{NF})^T w_R^{TS}\|^2 + \frac{\delta}{2} \|w_R^{TS}\|^2,$$

що веде до ридж-оцінок синаптичних ваг

$$w_R^{TS}(N) = (\Phi^{NF} (\Phi^{NF})^T + \delta I_{h,h})^{-1} \Phi^{NF} Y, \quad (5)$$

де  $\delta > 0$  – параметр регуляризації,  $I_{h,h} – (h \times h)$  – одинична матриця.

Якщо дані надходять на обробку послідовно в on-line режимі, для отримання оцінок (3)–(5) може бути використаний рекурентний метод найменших квадратів:

$$\begin{aligned} w^{TS}(k+1) &= w^{TS}(k) + \frac{P(k)(y(k+1) - (w^{TS}(k))^T \varphi^{NF}(x(k+1)))}{1 + (\varphi^{NF}(x(k+1))^T P(k) \varphi^{NF}(x(k+1)))} \times \\ &\quad \times \varphi^{NF}(x(k+1)), \end{aligned}$$

$$P(k+1) = P(k) - \frac{P(k)\varphi^{NF}(x(k+1))(\varphi^{NF}(x(k+1))^T P(k))}{1 + (\varphi^{NF}(x(k+1))^T P(k) \varphi^{NF}(x(k+1)))},$$

причому для ридж-оцінки (5) у якості початкових умов приймається

$$P(0) = \delta^{-1} I_{h,h}.$$

## 2. УЗАГАЛЬНЕНА РЕГРЕСІЙНА НЕЙРО-ФАЗЗІ СИСТЕМА

Як відзначалося вище, альтернативою навчанню, заснованому на оптимізації, є навчання, яке базується на пам'яті, що лежить в основі узагальненої регресійної нейронної мережі (GRNN). В [15–17] була запропонована узагальнена регресійна нейро-фаззі мережа (GRNFN), що є поширенням мережі Шпехта на нейро-фаззі архітектуру, наведену на рис. 1, та яка має низку переваг у порівнянні зі своїм нейромережевим прототипом.

Синтез, навчання й еволюція GRNFN відбуваються в такий спосіб. Вектори навчальної вибірки  $x(1), \dots, x(k), \dots, x(h)$ ,  $h \leq N$ , попередньо нормуються так, що  $-1 \leq x_i \leq 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , після чого для кожного з  $x(k)$  у першому прихованому шарі формується власний набір функцій належності  $\mu_{k1}(x), \mu_{k2}(x), \dots, \mu_{kn}(x)$  так, що їх центри співпадають з  $x_i(k)$ , тобто

$$\mu_{ki}(x) = \exp\left(-\frac{(x_i - x_i(k))^2}{2\sigma_i^2}\right).$$

Одночасно з формуванням функцій належності першого прихованого шару в третьому шарі відбувається установка синаптических ваг  $w_k^{GF}$  (індексом GF позначені параметри й сигналі GRNFN), які покладаються рівними навчальним сигналам  $y(k)$ . Таким чином, при подачі на вхід GRNFN довільного сигналу  $x$ , в першому прихованому шарі обчислюються рівні належності  $\mu_{ki}(x_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $k = 1, 2, \dots, h$ ; у другому шарі відбувається інше агрегування шляхом формування багатовимірних функцій

$$y^{GF}(x(k)) = \prod_{k=1}^{h \leq N} \mu_{ki}(x_i),$$

у третьому шарі обчислюються добутки  $y(k)\varphi^{GF}(x(k))$ , четвертий шар обчислює значення сигналів  $\sum_{k=1}^h y(k)\varphi^{GF}(x(k))$  і  $\sum_{k=1}^h \varphi^{GF}(x(k))$  й, нарешті, у вихідному шарі формується оцінка вихідного сигналу

$$\hat{y}^{GF}(x) = \frac{\sum_{k=1}^h y(k)\varphi^{GF}(x(k))}{\sum_{k=1}^h \varphi^{GF}(x(k))} = \sum_{k=1}^h w_k^{GF} \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{ki}(x_i)}{\sum_{k=1}^h \prod_{i=1}^n \mu_{ki}(x_i)} =$$

$$= \sum_{k=1}^h w_k^{GF} \varphi^{GF}(x(k)) = (w^{GF})^T \varphi^{GF}(x)$$

Процес навчання GRNN може протікати як у пакетному режимі, коли задані навчальна вибірка  $\{x(k), y(k)\}$  й максимальне число функцій належності для кожного входу  $h$ , так і в on-line режимі, коли пари  $x(k), y(k)$  надходять на обробку послідовно, формуючи багатовимірні функції  $\varphi_k^{GF}$ . При цьому досить просто організувати процес виключення спостережень, що містять не суттєву інформацію. Якщо для якогось  $x(k)$  виконується нерівність

$$\max_i D_i^{\min}(x_i(k)) < r < \frac{2}{h-1} \quad (6)$$

(тут  $D_i^{\min}(x_i(k))$  – найменша відстань між  $x_i(k)$  і раніше сформованими центрами функцій належності), то  $x(k)$  не формує нову  $\varphi^{GF}(x(k))$  і виключається з розгляду. Помітимо, що в нейро-фаззі системі з одновимірними функціями, граничний параметр  $r$  і відстань  $D_i^{\min}(x_i(k))$  визначити значно простіше ніж в GRNN з багатовимірними функціями активації, де загальна рекомендація до вибору  $r$  визначається малим перекриттям сусідніх багатовимірних гаусіанів [18].

Роботу GRNN нескладно організувати в режимі безперервного еволюціонування, що важливо при обробці суттєво нестационарних сигналів. Тут можливе використання двох підходів: на ковзному вікні з  $h$  спостережень, коли при надходженні на вход системи навчальної пари  $x(h+1), y(h+1)$  у першому й третьому шарах виключаються всі  $\mu_{1i}$  й  $w_1^{GF}$ , а замість них установлюються  $\mu_{h+1,i}$  й  $w_{h+1}^{GF}$ , і заснований на нерівності (6). У цьому випадку нова пара замінює найближчу до неї пару «старих» даних.

Оскільки процес навчання відбувається практично миттєво, еволюція нейро-фаззі системи також відбувається дуже швидко.

### 3. НЕЧІТКА МАШИНА ОПОРНИХ ВЕКТОРІВ

Своєрідним гібридом систем, які базуються як на оптимізації, так і на пам'яті одночасно, є машини опорних векторів (SVM), які є нейронними мережами, що збігаються по архітектурі з RBFN і GRNN, іх синаптичні ваги визначаються в результаті розв'язання задачі оптимізації, а центри активаційних функцій установлюються за принципом «нейрони в точках даних». І хоча ці мережі мають цілу низку безсумнівних переваг [19, 20], їхнє навчання з обчислювальної точки зору є досить трудомістким, оскільки пов'язане з розв'язанням задачі не лінійного програмування високої розмірності.

У зв'язку із цим, у якості альтернативи SVM були запропоновані машини опорних векторів, засновані на методі найменших квадратів (LS-SVM) [21], навчання яких зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь.

Фаззі-аналогом SVM є нечітка машина опорних векторів (FSVM) [22], у якій багатовимірні активаційні функції замінені одновимірними функціями належності. В [23] була розглянута FSVM, заснована на методі найменших квадратів (LS-FSVM) і призначена для розв'язання задачі розпізнавання образів, що коли в процесі навчання сигнали  $y(k)$  можуть приймати значення +1 або -1.

У межах досліджуваної нами задачі перетворення, що реалізується LS-FSVM (далі використовується позначення FS), може бути записане у вигляді

$$\begin{aligned} \hat{y}^{FS}(x) &= \sum_{k=1}^N w_k^{FS} \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{ki}(x_i)}{\sum_{k=1}^N \prod_{i=1}^n \mu_{ki}(x_i)} = \sum_{k=1}^N w_k^{FS} \varphi^{FS}(x(k)) = \\ &= (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x), \end{aligned} \quad (7)$$

а її навчання зводиться до установки центрів функцій належності  $\mu_{ki}(x_i)$  в точках  $x_i(k)$  і оптимізації квадратичного критерія навчання

$$E^{FS} = \frac{1}{2} \|w^{FS}\|^2 + \frac{\gamma}{2} \sum_{k=1}^N e^2(k) \quad (8)$$

з урахуванням обмежень у вигляді системи з  $N$  лінійних рівнянь

$$y(k) = (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) + e(k) \quad (9)$$

де  $\gamma > 0$  – параметр регуляризації,

$$e(k) = y(k) - \hat{y}^{FS}(x(k)).$$

Оптимізація критерію (8) без урахування обмежень (9) веде до виразу

$$\begin{aligned} w^{FS}(N) &= \left( \sum_{k=1}^N \varphi^{FS}(x(k))(\varphi^{FS}(x(k)))^T + \gamma^{-1} I_{N,N} \right)^{-1} \times \\ &\times \left( \sum_{k=1}^N \varphi^{FS}(x(k))y(k) \right), \end{aligned}$$

що є по суті ридж-оцінкою при  $\delta = \gamma^{-1}$ .

Для урахування системи обмежень (9) введемо в розгляд функцію Лагранжа

$$\begin{aligned} L(w^{FS}, e(k), \lambda(k)) &= E^{FS} + \sum_{k=1}^N \lambda(k)(y(k) - (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) - e(k)) = \\ &= \frac{1}{2} (w^{FS})^T w^{FS} + \frac{\gamma}{2} \sum_{k=1}^N e^2(k) + \sum_{k=1}^N (y(k) - (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) - e(k)) \end{aligned}$$

(тут  $\lambda(k) - N$  невизначених множників Лагранжа) і систему рівнянь Каруша-Куна-Таккера:

$$\begin{cases} \nabla_{w^{FS}} L = w^{FS} - \sum_{k=1}^N \lambda(k) \varphi^{FS}(x(k)) = \vec{0}_N, \\ \frac{\partial L}{\partial e(k)} = \gamma e(k) - \lambda(k) = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda(k)} = y(k) - (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) - e(k) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

де  $\vec{0}_N - (N \times 1)$  – вектор, утворений нулями.

З (10) випливає

$$\begin{cases} w^{FS}(N) = \sum_{k=1}^N \lambda(k) \varphi^{FS}(x(k)), \\ \lambda(k) = \gamma e(k), \\ y(k) = (w^{FS})^T \varphi^{FS}(x(k)) + e(k), \end{cases} \quad (11)$$

або в матричному вигляді

$$\left( \gamma^{-1} I_{N,N} + \Omega \right) \begin{pmatrix} \lambda(1) \\ \lambda(2) \\ \vdots \\ \lambda(N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{pmatrix},$$

або

$$\left( \gamma^{-1} I_{N,N} + \Omega \right) \bar{\lambda} = Y,$$

(тут  $\Omega = \{ \Omega_{ij} = (\varphi^{FS}(x(i)))^T \varphi^{FS}(x(j)) \}$ ),

звідки

$$\bar{\lambda} = (\gamma^{-1} I_{N,N} + \Omega)^{-1} Y. \quad (12)$$

Остаточно (7) з урахуванням (11) і (12) набуває вигляд

$$\hat{y}^{FS}(x) = \left( \sum_{k=1}^N \lambda(k) \varphi^{FS}(x(k)) \right)^T \varphi^{FS}(x).$$

#### 4. ОПТИМАЛЬНИЙ АНСАМБЛЬ НЕЙРО-ФАЗЗІ СИСТЕМ

При розв'язанні конкретної задачі не можна встановити заздалегідь яка з окремих синтезованих систем (TS, GRNFN, FSVM або яка-небудь ще) покаже найкращі результати. Більше того, при обробці нестационарних сигналів на різних часових інтервалах, найкращими можуть виявитися різні системи. У цій ситуації доцільно скористатися ансамблем одночасно працюючих систем [24–27] з наступним об'єднанням їх вихідних сигналів з метою одержання оптимального результату так, як це показане на рис. 2.

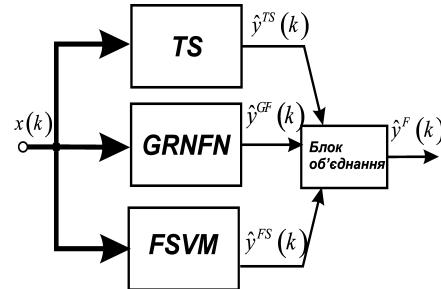


Рис. 2. Ансамбль нейро-фаззі систем

Вводячи в розгляд вектори вихідних сигналів

$$\hat{y}(k) = (\hat{y}^{TS}(k), \hat{y}^{GF}(k), \hat{y}^{FS}(k))^T$$

і параметрів об'єднання  $w^F = (w_{TS}^F, w_{GF}^F, w_{FS}^F)^T$ , будемо шукати оптимальний вихідний сигнал у вигляді

$$\hat{y}^F(k) = (w^F)^T \hat{y}(k)$$

при обмеженнях на незміщеність

$$I_3^T w^F = 1,$$

де  $I_3 - (3 \times 1)$  – вектор, утворений одиницями.

Невідомий вектор параметрів  $w^F$  може бути визначений за допомогою методу штрафних функцій, для чого вводиться  $(N \times 3)$  матриця вихідних сигналів  $\hat{Y} = (\hat{y}(1), \hat{y}(2), \dots, \hat{y}(N))^T$  і критерій оптимізації

$$E^F = (\hat{Y} - \hat{Y} w^F)^T (\hat{Y} - \hat{Y} w^F) + \rho^{-2} (1 - I_3^T w^F), \quad (13)$$

де  $\rho$  – штрафний коефіцієнт.

Мінімізація (13) по  $w^F$  веде до виразу

$$w^F(\rho) = (\hat{Y}^T \hat{Y} + \rho^{-2} I_3 I_3^T)^{-1} (\hat{Y}^T \hat{Y} + \rho^{-2} I_3),$$

яке після нескладних перетворень [28] і прирівнювання  $\rho$  до нуля, набуває вигляд

$$w^F(N) = \lim_{\rho \rightarrow 0} w^F(\rho) = w^{LS}(N) + P^F(N) \frac{1 - I_3^T w^{LS}(N)}{I_3^T P^F(N) I_3}, \quad (14)$$

де

$$w^{LS}(N) = (\hat{Y}^T \hat{Y})^{-1} \hat{Y}^T Y = P^F(N) \hat{Y}^T Y \quad (15)$$

– звичайна оцінка найменших квадратів типу (4).

Елементам вектора  $w^F(N)$  (14) можна надати зміст належностей кожної з підсистем ансамблю TS, GRNFN і FSVM до деякої гіпотетичної оптимальної системи, якщо забезпечити їх невід'ємність у процесі об'єднання.

Вводячи у розгляд лагранжіан

$$L(\mu^F, \lambda^F, \rho^F) = (Y - \hat{Y}\mu^F)^T (Y - \hat{Y}\mu^F) + \lambda^F (I_3^T \mu^F - 1) - (\rho^F)^T \mu^F,$$

(тут  $\mu^F - (3 \times 1)$  – вектор рівнів належності,  $\lambda^F$  – невизначеній множник Лагранжа,  $\rho^F - (3 \times 1)$  – вектор невід'ємних множників Лагранжа, що відповідають умовам додаткової нежорсткості), і систему рівнянь

$$\begin{cases} \nabla_{\mu^F} L = \vec{0}_3, \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda^F} = 0, \end{cases}$$

розв'язок якої має вигляд

$$\begin{cases} \mu^F = P^F(N) \left( \hat{Y}^T \hat{Y} + 0,5\lambda^F I_3 + 0,5\rho^F \right), \\ \lambda^F = \frac{I_3^T P^F(N) \hat{Y}^T Y - 1 + 0,5I_3^T P^F(N) \rho^F}{0,5I_3^T P^F(N) I_3}, \end{cases}$$

і використовуючи процедуру Ерроу-Гурвіца-Удзави [29], одержуємо алгоритм навчання вектора  $\mu^F$  у вигляді

$$\begin{cases} \mu^F(k+1) = w^{LS}(k+1) - P^F(k+1) \times \\ \times \left( I_3^T w^{LS}(k+1) - 1 + 0,5I_3^T P^F(k+1) \rho^F(k) \right) \left( I_3^T P^F(k+1) I_3 \right)^{-1} I_3 + 0,5P^F(k+1) \rho^F(k), \\ \rho^F(k+1) = \text{Pr}_+ \left( \rho^F(k) - \eta_\rho(k+1) \mu^F(k+1) \right), \end{cases} \quad (16)$$

де  $w^{LS}$  – визначається виразом (15),  $\text{Pr}_+(\cdot)$  – проектор на додатний ортант.

Нескладно показати, що алгоритм (16) елементарно поширюється на довільну кількість систем, що входять в ансамбль.

## ВИСНОВКИ

Введено систему еволюційних нейро-фаззі систем, що використовують різні принципи навчання та налаштовують не тільки синаптичні ваги, але й свою архітектуру. Запропоновано адаптивну процедуру об'єднання цих систем, що дозволяє синтезувати оптимальний вихідний сигнал і встановлювати рівні належності до деякої гіпотетичної оптимальної системи. Підхід, що розвивається, відрізняється обчислювальною простотою й дозволяє обробляти інформацію в on-line режимі в міру її надходження.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осовский, С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
2. Rutkowski, L. Computational Intelligence. Methods and Techniques / L. Rutkowski. – Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2008. – 514 p.
3. Nelles, O. Nonlinear System Identification / O. Nelles. – Berlin : Springer, 2001. – 785 p.
4. Friedman, J. The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference and Prediction / J. Friedman, T. Hastie, R. Tibshirani. – Berlin : Springer, 2003. – 552 p.
5. Pattern recognition using radial basis function network / D. Zahirniak, R. Chapman, S. Rogers [and other] // Dayton, OH : Application of AI Conf. – 1990. – P. 249–260.
6. Specht, D. F. A general regression neural network / D. F. Specht // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1991. – Vol. 2. – P. 568–576.
7. Kasabov, N. Evolving Connectionist Systems / N. Kasabov. – London : Springer – Verlag, 2003. – 307 p.
8. Bodyanskiy, Ye. Hibrid evolving neural network using kernel activation functions / Ye. Bodyanskiy, N. Teslenko, P. Grimm // Conf. Proc. 17<sup>th</sup> Zittau East-West Fuzzy Coll. – Zittau Goerlitz : HS. – 2010. – P. 39–46.
9. Бодянський, Є. В. Еволюційна нейронна мережа з ядерними функціями активації та адаптивний алгоритм її навчання / Є. В. Бодянський, А. О. Дайнеко, Н. О. Тесленко. – Наукові праці – Вип. 130. – Т. 143. – Комп’ютерні технології. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2010. – С. 71–78.
10. Jang, J.-S. Neuro-Fuzzy and Soft Computing : A Computational Approach to Learning and Maching Intelligence / J.-S. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani // Upper Saddle River : Prentice Hall. – 1997. – 640 p.
11. Wang, L.-X. Fuzzy basis functions, universal approximation and orthogonal least squares learning / L.-X. Wang, J. M. Mendel // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1993. – Vol. 3. – P. 807–814.
12. Cios, K. J. Neuro-fuzzy algorithms / K. J. Cios, W. Pedrycz // Oxford : IOP Publishing Ltd and Oxford University Press. – Handbook of Neural Computation, 1997. – D1. 3:1 – D1. 3:7.
13. Takagi, T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / Takagi T., Sugeno M. // IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15. – P. 116–132.
14. Wang, L.-X. Adaptive Fuzzy Systems and Control. Design and Stability Analysis / L.-X. Wang // Upper Saddle, N. J. : Prentice Hall, 1994. – 256 p.
15. Bodyanskiy, Ye. Generalized regression neuro-fuzzy network / Ye. Bodyanskiy, N. Teslenko. – Proc. XIII-th Int. Conf. «Information Reaserch & Application», i. TECH 2007. – V. 1. – Varna, 2007. – P. 219–225.
16. Bodyanskiy, Ye. Nonliner process identification and modeling using general regression neuro-fuzzy network / Bodyanskiy Ye., Otto P., Pliss I., Teslenko N. // Proc. 52 nd Int. Sci. Coll. «Computer Science Meets Automation.» – TU Ilmenau (Thuer.) – 2007. – P. 23–27.
17. Bodyanskiy, Ye. General regression neuro-fuzzy network for identification of nonstationary plants / Ye. Bodyanskiy, N. Teslenko // Int. J. Information Technologies and Knowledge, 2008. – Vol. 2, № 2 – P. 136–142.

18. *Bishop, C. M.* Neural Networks for Pattern Recognition / C. M. Bishop // Oxford : Clarendon Press, 1995. – 482 p.
19. *Vapnik, V. N.* The Nature of Statistical Learning Theory / V. N. Vapnik – N. Y. : Springer, 1995. – 188 p.
20. *Vapnik, V. N.* Statistical Learning Theory: Adaptive and Learning Systems / V. N. Vapnik – N. Y. : John Wiley & Sons, 1998. – 736 p.
21. Least Squares Support Vector Machines / [Suykens J.A.K., Gestel T.V., Brabanter J.D. and other]. – Singapore : World Scientific, 2002. – 294 p.
22. *Lin, Ch.-F.* Fuzzy Support Vector Machines / Ch.-F. Lin, Sh.-D. Wang. – IEEE Trans. on Neural Networks. – 2002. – T. 13., № 2. – P. 646–671.
23. *Tsujinishi, D.* Fuzzy Least Squares Support Vector Machines for multiclass problems / D. Tsujinishi, S. Abe. – Neural Networks, 2003. – Vol. 16. – P. 785–792.
24. *Hansen, L. K.* Neural networks ensembles / L. K. Hansen, P. Salamon // IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1990. – Vol. 12. – P. 993–1000.
25. *Sharkey, A. J. C.* On combining artificial neural nets / A. J. C. Sharkey // Connect. Sci. – 1996. – Vol. 8. – P. 299–313.
26. *Hashem, S.* Optimal linear combination of neural networks / S. Hashem // Neural Networks. – 1997. – Vol. 10. – P. 599–614.
27. *Naftaly, U.* Optimal ensemble averaging of neural networks / U. Naftaly, N. Intrator, D. Horn // Network : Comput. Neural Syst. – 1997. – Vol. 8. – P. 283–296.
28. *Бодянський С. В.* Адаптивне виявлення розладнань в об'єктах керування за допомогою штучних нейронних мереж / С. В. Бодянський, О. І. Михальов, І. П. Плісс. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2000. – 140 с.
29. *Поляк, Б. Т.* Введение в оптимизацию / Б. Т. Поляк. – М. : Мир, 1984. – 541 с.
30. *Бодянський, Е. В.* Адаптивное обобщенное прогнозирование многомерных случайных последовательностей / Е. В. Бодянский, И. П. Плисс, Т. В. Соловьева. – Доклады АН УССР. – 1989. – А. – № 9. – С. 73–75.

Стаття надійшла до редакції 20.02.2012.

Дейнеко А. А., Плісс І. П., Бодянський Е. В.  
КОМБІНИРОВАННОЕ ОБУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННОЙ НЕЙРО-ФАЗЗИ СИСТЕМЫ

Предложена архитектура эволюционной нейро-фаззи системы, которая не склонна к проклятию размерности, способна обрабатывать информацию в режиме реального времени, адаптируя при этом свои параметры и структуру к условиям задачи. В качестве активационных функций были использованы ядерные функции активации.

**Ключевые слова:** эволюционная нейро-фаззи система, нормализованная радиально-базисная нейронная сеть, обобщенная регрессионная нейро-фаззи сеть, нечеткая машина опорных векторов, ядерная функция активации.

Deineko A. A., Pliss I. P., Bodyanskiy Ye.  
EVOLVING NEURO-FUZZY SYSTEM COMBINED LEARNING

In this work the evolving neuro-fuzzy system with kernel activation function that contains fuzzy support vector machine, normalized radial basis function neural network and general regression neuro-fuzzy network as subsystems is proposed. This network is tuned using both optimization and memory based approaches and does not inclined to the «curse of dimensionality», is able to real time mode information processing by adapting its parameters and structure to problem conditions.

**Key words:** evolving neuro-fuzzy system, normalized radial-basis function neural network, general regression neuro-fuzzy network, fuzzy support vector machine, kernel activation function.

UDC 519.832.4

Romanuke V. V.

Candidate of Technical Science, docent of Khmelnytsky National University

## OPTIMAL STRATEGIES CONTINUUM FOR PROJECTING THE FOUR-MOUNT CONSTRUCTION UNDER INTERVAL UNCERTAINTIES WITH INCORRECTLY PRE-EVALUATED TWO LEFT AND ONE RIGHT ENDPOINTS

There is investigated a two-person game model of optimizing cross-section squares of the four-mount construction, where the model kernel is defined on the six-dimensional hyperparallelepiped as the product of three closed intervals of unit-normed loads and of three closed intervals of unit-normed cross-section squares. For the case of incorrectly pre-evaluated two left and one right endpoints of those interval uncertainties there has been proved that the projector may obtain an optimal strategies continuum. A criterion for singularizing that continuum has been proposed.

**Key words:** optimizing cross-section squares, two-person game model, four-mount construction, incorrect pre-evaluation.

### INVESTIGATION AREA

There are many uncertain factors in building mount constructions, one of which is interval-valued potential load on the construction pivots, pillars, bars or other mount

elements [1, 2]. If the potential load on the construction with four mounts is unit-normed, then the unit-normed load on the  $i$ -th mount  $x_i$  is enclosed within the closed interval  $[a_i; b_i] \subset (0; 1)$  by  $b_i > a_i$  for  $i = \overline{1, 3}$  [3, 4]. The nonzero

fourth unit-normed load is

$$x_4 = 1 - x_1 - x_2 - x_3 \quad (1)$$

due to the unit-normalization. The problem is to take some mounting square against that potential load, and this square may be unit-normed also. Thus the  $i$ -th mount cross-section square is  $y_i$ , and due to analogous unit-normalization  $y_i \in [a_i; b_i] \subset (0; 1)$  for  $i = \overline{1, 3}$  by

$$y_4 = 1 - y_1 - y_2 - y_3. \quad (2)$$

Obviously, that taking the unit-normed values shouldn't be arbitrary, but be optimal in the sense of minimizing the potential load and mounting square relationship [3, 5, 6].

#### AVAILABLE REFERENCES ANALYSIS

There is a known model of optimizing the values  $\{y_i\}_{i=1}^3$ , stated as a convex game with the kernel [3, 7]

$$\begin{aligned} T(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) &= T(x_1, x_2, x_3; y_1, y_2, y_3) = \\ &= \max \left\{ x_1 y_1^{-2}, x_2 y_2^{-2}, x_3 y_3^{-2}, \frac{1 - x_1 - x_2 - x_3}{(1 - y_1 - y_2 - y_3)^2} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

on the hyperparallelepiped

$$\begin{aligned} \mathbf{X} \times \mathbf{Y} &= \prod_{p=1}^2 [a_p; b_p] \times [a_2; b_2] \times [a_3; b_3] = \\ &= \prod_{p=1}^2 \left( \prod_{i=1}^3 [a_i; b_i] \right) \subset \prod_{d=1}^6 (0; 1) \subset \prod_{d=1}^6 [0; 1] \subset \mathbb{R}^6 \end{aligned} \quad (4)$$

of pure strategies

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [x_1 \ x_2 \ x_3] \in \\ &\in \mathbf{X} = [a_1; b_1] \times [a_2; b_2] \times [a_3; b_3] = \\ &= \prod_{i=1}^3 [a_i; b_i] \subset \prod_{i=1}^3 (0; 1) \subset \prod_{i=1}^3 [0; 1] \subset \mathbb{R}^3 \end{aligned} \quad (5)$$

of the first player and of pure strategies

$$\begin{aligned} \mathbf{Y} &= [y_1 \ y_2 \ y_3] \in \\ &\in \mathbf{Y} = [a_1; b_1] \times [a_2; b_2] \times [a_3; b_3] = \\ &= \prod_{i=1}^3 [a_i; b_i] \subset \prod_{i=1}^3 (0; 1) \subset \prod_{i=1}^3 [0; 1] \subset \mathbb{R}^3 \end{aligned} \quad (6)$$

of the second. The first player personifies the natural factors, which can't be foreseen, and the second player personifies the projector or the person responsible for projecting the four-mount construction, being investigated. The optimal strategy

$$\mathbf{Y}_* = [y_1^* \ y_2^* \ y_3^*] \in [a_1; b_1] \times [a_2; b_2] \times [a_3; b_3] = \mathbf{Y} \quad (7)$$

of the projector, existing by the theorem on the second player optimal strategies in the convex game [3, 8], is determined from the four-parted equality

$$\frac{b_i}{(y_i^*)^2} = \frac{1 - a_1 - a_2 - a_3}{(1 - y_1^* - y_2^* - y_3^*)^2} \text{ by } i = \overline{1, 3}. \quad (8)$$

However, the given bounded intervals  $\{[a_i; b_i]\}_{i=1}^3$  uncertainties may occur such that the equality (8) is not true [9] within the parallelepiped (6). Then it is spoken about incorrectness of left or right endpoints of those intervals. If these endpoints were corrected (increased or decreased, as needed) then the equality (8) would have been turned true within the parallelepiped (6). But this is impossible, so pre-evaluations  $\{a_i\}_{i=1}^3$  and  $\{b_i\}_{i=1}^3$  are held still.

#### WORK GOAL

Will find the projector optimal strategy (7) in supposition that here are interval uncertainties  $\{[a_i; b_i]\}_{i=1}^3$  with incorrectly pre-evaluated two left and one right endpoints. If they all were correct the components of the projector optimal strategy (7) would have been [7]

$$y_i^* = \frac{\sqrt{b_i}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} \quad \forall i = \overline{1, 3}. \quad (9)$$

But the endpoints  $a_p, a_q$  and  $b_k$  by  $\{p, q, k\} = \{1, 2, 3\}$  have occurred such that

$$\frac{\sqrt{b_p}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} < a_p, \quad (10)$$

$$\frac{\sqrt{b_q}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} < a_q, \quad (11)$$

$$\frac{\sqrt{b_k}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}} > b_k. \quad (12)$$

It means that

$$y_p^* > \frac{\sqrt{b_p}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1 - a_1 - a_2 - a_3}}, \quad (13)$$

$$y_q^* > \frac{\sqrt{b_q}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1-a_1-a_2-a_3}}, \quad (14)$$

$$y_k^* < \frac{\sqrt{b_k}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1-a_1-a_2-a_3}}, \quad (15)$$

and for finding the projector optimal strategy (7) there has to be used the impossibility of the equality (8) within the parallelepiped (6) up with the conditions (10)–(12). Clearly that the conditions (10)–(12), meaning (13)–(15), also give one of the four following inequalities, which breaks the equality (8):

$$\frac{1}{b_k} > \frac{b_r}{a_r^2} > \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \text{ by } r \in \{p, q\}, \quad (16)$$

$$\frac{1}{b_k} > \frac{b_p}{a_p^2} \geq \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \geq \frac{b_q}{a_q^2}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{b_k} > \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} > \frac{b_r}{a_r^2} \text{ by } r \in \{p, q\}, \quad (18)$$

$$\frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} > \frac{1}{b_k} > \frac{b_r}{a_r^2} \text{ by } r \in \{p, q\}. \quad (19)$$

The inequalities (16)–(18) are united into the single inequality

$$\frac{1}{b_k} \geq \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \quad (20)$$

that is going to be the last pre-condition for finding the projector optimal strategy (7).

### THEOREM ON CONTINUUM OF PROJECTOR OPTIMAL STRATEGIES (7) UNDER (10)–(12) BY (20)

**Theorem.** In the game with kernel (3) on the hyperparallelepiped (4) by the conditions (10)–(12) and (20) the components of the projector optimal strategy (7) are

$$y_r^* \in [a_r; b_r] \text{ by } r \in \{p, q\} \quad (21)$$

at

$$b_p + b_q \leq 1 - b_k - \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)} \quad (22)$$

or

$$y_r^* \in [a_r; y_r^{\max}] \text{ by } r \in \{p, q\} \quad (23)$$

at

$$b_p + b_q > 1 - b_k - \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)} \quad (24)$$

for

$$y_p^{\max} + y_q^{\max} = 1 - b_k - \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)}, \quad (25)$$

where

$$y_k^* = b_k. \quad (26)$$

In the case of the inequality

$$\frac{1}{b_k} > \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \quad (27)$$

the projector has a continuum of its optimal strategies (7).

**Proof.** As the inequality (20), being the corollary of the conditions (10)–(15), is true then the second player cannot make its payoff less than  $\frac{1}{b_k}$ . This payoff value is the optimal game value  $v_* = \frac{1}{b_k}$ , which is reached at the right endpoint

of the  $k$ -th rib of the parallelepiped (6). If  $y_k < b_k$  then the payoff is greater than  $v_*$ , what is unacceptable for the projector, so (26) is the single possible  $k$ -th component of the projector optimal strategy (7). Going further, the inequality (20) may be overstated as

$$(1-a_p-a_q-b_k)^2 \geq b_k(1-a_1-a_2-a_3) \quad (28)$$

or

$$1-a_p-a_q-b_k \geq \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)}, \quad (29)$$

where it has been root-extracted due to positiveness of the fourth unit-normed cross-section square. So, the projector should select such  $y_p^*$  and  $y_q^*$  that the inequality

$$1-y_p^*-y_q^*-b_k \geq \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)} \quad (30)$$

would turn true. The inequality (30) is overstated as the condition

$$y_p^* + y_q^* \leq 1 - b_k - \sqrt{b_k(1-a_1-a_2-a_3)} \quad (31)$$

for selecting the components  $y_p^*$  and  $y_q^*$ . Then if (22) is true then (31) is true  $\forall y_r^* \in [a_r; b_r]$  by  $r \in \{p, q\}$  and therefore the  $r$ -th component of the projector optimal strategy (7) is (21). Otherwise, if (24) is true then (31) is true for such  $y_p^*$  and  $y_q^*$  that their sum is not greater than the right side of (31). So, the  $r$ -th component is selected as (23) for (25). The

continuum of projector optimal strategies with the inequality (27) is subsequent to that  $y_r^* > a_r$  at  $r \in \{p, q\}$  for the case with (22) and either  $y_p^{(\max)} > a_p$  or  $y_q^{(\max)} > a_q$  for the case with (24). The theorem has been proved.

It remains only to constate that in the case of the equality

$$\frac{1}{b_k} = \frac{1-a_1-a_2-a_3}{(1-a_p-a_q-b_k)^2} \quad (32)$$

the projector does not have more than the single optimal strategy (7) as here its components are  $y_r^* = a_r$  by  $r \in \{p, q\}$  and, undoubtedly, (26).

Consider an example of applying the proved theorem. Let

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,24, b_1 = 0,26, a_2 = 0,26, \\ b_2 &= 0,29, a_3 = 0,1, b_3 = 0,2. \end{aligned} \quad (33)$$

Having calculated the values (9), here (10)–(12) are true:

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{b_1}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1-a_1-a_2-a_3}} < \\ < 0,23961 < a_1 = 0,24, \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{b_2}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1-a_1-a_2-a_3}} < \\ < 0,2531 < a_2 = 0,26, \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \frac{\sqrt{b_3}}{\sqrt{b_1} + \sqrt{b_2} + \sqrt{b_3} + \sqrt{1-a_1-a_2-a_3}} > \\ > 0,2101 > b_3 = 0,2. \end{aligned} \quad (36)$$

Also the inequality (17) is true, that is (20) is the pre-condition for finding the projector optimal strategy (7). So, as

$$\begin{aligned} b_1 + b_2 &= 0,55 > 0,5172 > \\ &> 1 - b_3 - \sqrt{b_3(1-a_1-a_2-a_3)} \end{aligned} \quad (37)$$

is true, that is the condition (24) is true, then here the projector optimal strategy (7) components are (23) for (25) and (26):

$$\begin{aligned} y_1^* &\in \left[ 0,24; y_1^{(\max)} \right], \\ y_2^* &\in \left[ 0,26; y_2^{(\max)} \right], y_3^* = 0,2, \end{aligned} \quad (38)$$

where

$$y_1^{(\max)} + y_2^{(\max)} = 0,8 - 0,2\sqrt{2}. \quad (39)$$

## CONCLUSION AND WORKING FURTHER PERSPECTIVE

The disclosed continuum of the projector optimal strategy (7) under strictness in the inequality sign must not delude an explorer or a real constructor, because the summed unit-normed cross-section squares are fixed at unit, and it may select  $y_p^*$  and  $y_q^*$  whatever, just satisfying (21) or (23) with (25). Nevertheless, this selection could have been rational due to some criterion with respect to  $y_p^*, y_q^*$ ,  $y_4^* = 1 - y_p^* - y_q^* - b_k$ . One of suchlike criterions is equalization of values  $y_p^*, y_q^*, y_4^*$ , that is solving the problem

$$\min_{[a_p; b_p] \times [a_q; b_q]} \left( \max \left\{ \frac{y_p^*}{y_q^*}, \frac{y_q^*}{y_p^*}, \frac{y_p^*}{y_4^*}, \frac{y_4^*}{y_p^*}, \frac{y_q^*}{y_4^*}, \frac{y_4^*}{y_q^*} \right\} \right) \quad (40)$$

or

$$\min_{[a_p; y_p^{(\max)}] \times [a_q; y_q^{(\max)}]} \left( \max \left\{ \frac{y_p^*}{y_q^*}, \frac{y_q^*}{y_p^*}, \frac{y_p^*}{y_4^*}, \frac{y_4^*}{y_p^*}, \frac{y_q^*}{y_4^*}, \frac{y_4^*}{y_q^*} \right\} \right). \quad (41)$$

In perspective, there should be worked the situation with the inequality (19), which seems to be more complicated in finding the projector optimal strategy (7).

## REFERENCES

- Дарков, А. В. Строительная механика : [учебник для строит. спец. вузов] / А. В. Дарков, Н. Н. Шапошников. – [8-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш. шк., 1986. – 607 с.
- Киселев, В. А. Строительная механика: Спец. курс. Динамика и устойчивость сооружений : [учебник для вузов] / В. А. Киселев. – [3-е изд., испр. и доп.]. – М. : Стройиздат, 1980. – 616 с.
- Воробьев, Н. Н. Теория игр для экономистов-кибернетиков / Н. Н. Воробьев. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 272 с.
- Романюк, В. В. Моделювання дії нормованого одиничного навантаження на три колони однакової висоти у будівельній конструкції і знаходження оптимальної площини кожної опори / В. В. Романюк // Проблеми трибології. – 2010. – № 3. – С. 18–25.
- Трухаев, Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Р. И. Трухаев. – М. : Наука, 1981. – 258 с.
- Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / И. Г. Черноруцкий – С. Пб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
- Романюк, В. В. Регулярна оптимальна стратегія проектувальника у моделі дії нормованого одиничного навантаження на N-колонну будівельну конструкцію-опору / В. В. Романюк // Проблеми трибології. – 2011. – № 2. – С. 111–114.
- Теория игр : [учеб. пособие для ун-тов] / Л. А. Петросян, Н. А. Зенкевич, Е. А. Семина. – М. : Высшая школа, Книжный дом «Университет», 1998. – 304 с.

9. Романюк, В. В. Про особливі компоненти оптимальної стратегії проектувальника у моделі дії нормованого однічного навантаження на триколонну будівельну конструкцію / В. В. Романюк // Проблеми трибології. – 2011. – № 1. – С. 44–46.

Стаття надійшла до редакції 04.10.2011.

Романюк В. В.

### КОНТИНУУМ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАННЯ ЧЕТЫРЕХОПОРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ В УСЛОВІЯХ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕОПРЕДЕЛЕНОСТЕЙ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НЕКОРРЕКТНО ОЦІНЕННЫМИ ДВУМЯ ЛЕВЫМИ И ОДНИМ ПРАВЫМ КОНЦАМИ

Исследуется игровая модель двух лиц в оптимизации площадей поперечного сечения четырехпорной конструкции, где модельное ядро определяется на шестимерном гиперпараллелепипеде как произведении трех замкнутых интервалов единично нормированных нагрузок и трех замкнутых интервалов единично нормированных площадей поперечного сечения. Для случая предварительно некорректно оцененных двух левых и одного правого концов этих интервальных неопределеностей доказано, что проектировщик может получать континуум оптимальных стратегий. Предложен критерий для выделения единственного элемента из этого континуума.

**Ключевые слова:** оптимизация площадей поперечного сечения, игровая модель двух лиц, четырехпорная конструкция, некорректное предварительное оценивание.

Романюк В. В.

### КОНТИНУУМ ОПТИМАЛЬНИХ СТРАТЕГІЙ ДЛЯ ПРОЕКТИВАННЯ ЧОТИРЬОХОПОРНОЇ КОНСТРУКЦІЇ В УМОВАХ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕВІЗНАЧЕНОСТЕЙ З ПОПЕРЕДНЬО НЕКОРРЕКТНО ОЦІНЕННИМИ ДВОМА ЛІВИМИ Й ОДНИМ ПРАВИМ КІНЦЯМИ

Досліджується ігрова модель двох осіб в оптимізації площ поперечного перерізу чотирьохопорної конструкції, де модельне ядро задається на шестивимірному гіперпаралелепіпеді як добутку трьох замкнених інтервалів одинично нормованих навантажень і трьох замкнених інтервалів одинично нормованих площ поперечного перерізу. Для випадку попередньо некоректно оцінених двох лівих і одного правого кінців цих інтервальних невізначеностей доведено, що проектувальник може отримувати континуум оптимальних стратегій. Запропоновано критерій для виокремлення єдиного елемента з цього континуума.

**Ключові слова:** оптимізація площ поперечного перерізу, ігрова модель двох осіб, чотирьохопорна конструкція, некоректне попереднє оцінювання.

УДК 004.93

Субботин С. А.

Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

## КОНСТРУИРУЕМЫЕ ПРИЗНАКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВО ВРЕМЕНИ СТАЦИОНАРНЫХ СИГНАЛОВ

Решена актуальная задача автоматизации сокращения размерности данных для построения диагностических и распознающих моделей на основе стационарных одномерных сигналов, распределенных во времени. Впервые предложен комплекс показателей, характеризующих свойства сигналов, позволяющий существенно сократить описание классифицируемых объектов. Проведены эксперименты по исследованию предложенного комплекса показателей при решении практических задач.

**Ключевые слова:** распознавание образов, техническое диагностирование, признак, стационарный сигнал, извлечение признаков.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем, возникающих при построении распознающих и диагностических моделей стационарных объектов на основе сигналов, распределенных во времени, является низкая индивидуальная информативность признаков, которая при ограниченном объеме выборки отягощается большим числом признаков. В результате получаемая распознающая модель, как правило, оказывается громоздкой и сложной (как следствие этого, также характеризуется низким уровнем обобщения обучающих данных), а также крайне неудобной для последующего анализа и интерпретации человеком. Процесс построения распознающей модели по выборкам, характеризующимся большим числом признаков,

также требует значительных затрат ресурсов памяти ЭВМ (как оперативной, так и дисковой) для хранения и обработки обучающих данных.

Поэтому актуальной является задача сокращения описания стационарных сигналов, распределенных во времени с целью получения интерпретабельных распознающих и диагностических моделей, обеспечивающих высокий уровень обобщения относительно обучающей выборки данных.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СОКРАЩЕНИЯ ОПИСАНИЯ СИГНАЛОВ

Пусть задана исходная выборка наблюдений  $\langle x, y \rangle$ , где  $x = \{x^s\}, x_j = \{x_j^s\}, x^s = \{x_j^s\}, x_j = \{x_j^s\}, y = \{y^s\}, s = 1, 2, \dots, S, j = 1, 2, \dots, N$ ,  $x_j^s$  – значение  $j$ -го диагностического признака  $x_j$ , характе-

ризуюче прецедент (екземпляр)  $x^s, y^s$  – значення вихідного признака, сопоставлене прецеденту  $x^s, S$  – число прецедентів,  $N$  – число диагностических признаків.

Тогда задача сокращения описания выборки  $\langle x, y \rangle$  может быть представлена как задача отбора признаков и (или) задача конструирования искусственных признаков [1–3].

Задача отбора информативных признаков может быть сформулирована следующим образом: из заданной выборки  $\langle x, y \rangle$  необходимо получить сокращенную выборку  $\langle x', y' \rangle, x' \subset \{x_j\}, N_1 < N, f(\langle x', y' \rangle, \langle x, y \rangle) \rightarrow \text{opt}$ . Здесь  $N_1$  – число отобранных признаков,  $f()$  – пользовательский критерий, характеризующий качество аргумента относительно решаемої задачи,  $\text{opt}$  – оптимальное (желаемое или приемлемое) значение функционала  $f()$  для решаемої задачи.

Задача конструирования искусственных признаков, в свою очередь, может быть поставлена следующим образом: для заданной выборки  $\langle x, y \rangle$  необходимо получить сокращенную выборку  $\langle x', y' \rangle, x' = \{x'_i\}, x'_i = I_i(\{x_j\}), f(\langle x', y' \rangle, \langle x, y \rangle) \rightarrow \text{opt}$ . Здесь  $I_i$  – преобразование, позволяющее получить  $i$ -й конструируемый искусственный признак.

## 2. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ

Наиболее простым решением задачи сокращения описания сигналов для классификации стационарних обєктів является использование методов отбора информативных признаков (feature selection methods) [1–3, 4]. Однако для индивидуально малоинформационных признаков методы отбора фільтрующего типа [4], не требующие построения моделей и оценивания их качества для определения информативности набора признаков, оказываются практически малопригодными из-за того, что информативности отдельных признаков исходных сигналов, как правило, мало отличаются. Использование оболочечных методов типа «wgrapper» [1–3], предполагающих построение моделей и оценивание их качества для определения информативностей комбинаций признаков, оказывается сильно зависимым от способности выбранного метода построения моделей выделять информативные сочетания признаков и сопряжено с большими затратами времени и памяти ЭВМ, поскольку требуют построения и хранения в памяти ЭВМ моделей для каждого сочетания признаков, и поэтому также с практической точки зрения малопригодно.

Методы конструирования искусственных признаков (feature extraction methods) [5–7] предполагают формирование искусственных признаков, рассчитываемых на основе исходных сигналов, характеризуючих экземпляры выборки. Главним недостатком подавляющего большинства этих методов является потеря интерпретабельності синтезируемых моделей, а также отсутствие гаранції улучшения разделимості класів в новом пространстві признаков. Кроме того, большинство методов формирования искусственных признаков характеризуються большими затратами вычислительных ресурсов, а синтезируемые с их помощью преобразования для искусственных признаков оказываются сильно зависимими от экземпляров исходной выборки.

Методы цифровой обработки сигналов [8, 9] в контексті решаемої задачи можно рассматривать как средства предварительной обработки данных для последующого конструирования и отбора признаков или как специфическую разновидность методов конструирования признаков. Среди методов цифровой обработки сигналов наибольшее распространение в задачах диагностирования и распознавания сигналов, распределенных во времени, получили преобразование Фурье [8] и вейвлет-разложение [9], общим недостатком которых применительно к решаемої задаче является то, что формируемое ими пространство признаков является достаточно большим (сопоставимо с числом признаков в исходном сигнале) и требует последующего отбора признаков, а также навязывает данным неестественную форму (Фурье и вейвлет-разложения выделяют в исходном сигнале, соответственно, периодические и непериодические составляющие в заданном пользователем базисе функций, которые могут не соответствовать истинной природе сигнала).

Целью данной работы является создание комплекса искусственных признаков  $\{I_i(\{x_j\})\}$ , позволяющего для стационарных обєктів, характеризуемых распределенным во времени сигналами, обеспечить существенное сокращение размерности выборки, а, следовательно, упростить формируемые на их основе распознавающие и диагностическіе модели и повысить их обобщающие свойства, а также интерпретабельность.

## 3. РАЗЛОЖЕНИЕ СИГНАЛА НА СОСТАВЛЯЮЩІ І ФОРМИРОВАННЯ ЕГО ІНТЕГРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Представим исходный сигнал  $x^s$  как совокупность участков, в каждом из которых значения сигнала находятся в окрестности соответствующего локального максимума. Тогда, определив для каждого участка сигнала значения его локальных характеристик, можно задать способ их объединения в интегральные характеристики сигнала:

$$I_{k,p,q}^s = \sum_{z=1}^Z w_{z,k,p}(x^s) v_q(\{x_i^s \mid v_z(x_i^s) = 1, i = 1, 2, \dots, N\}),$$

где  $Z$  – число локальных максимумов (и их окрестностей) сигнала,  $p$  – номер способа формирования весов,  $q$  – номер локальной характеристики  $z$ -го фрагмента сигнала  $x^s$ ,  $k$  – основание для формирования весов,  $k > 0$  (при  $p \leq 4$  рекомендуется принять:  $k = 2$ , при  $p > 4$  – принять:  $k = 1$ ),

$$v_z(x_i^s) = \begin{cases} 0, x_i^s > \tau_z(x^s); \\ 1, x_i^s \leq \tau_z(x^s), \forall x_j^s, i < j < \tau_z^{\arg}(x^s) : x_i^s \leq x_j^s \leq \tau_z(x^s); \\ 0, x_i^s \leq \tau_z(x^s), \exists x_j^s, i < j < \tau_z^{\arg}(x^s) : x_i^s > x_j^s; \\ 1, x_i^s \leq \tau_z(x^s), \forall x_j^s, \tau_z^{\arg}(x^s) > j > i : x_i^s \leq x_j^s \leq \tau_z(x^s); \\ 0, x_i^s \leq \tau_z(x^s), \exists x_j^s, \tau_z^{\arg}(x^s) > j > i : x_i^s > x_j^s; \end{cases}$$

$\tau_z(x^s)$ ,  $\tau_z^{\arg}(x^s)$  – соответственно, значение и номер признака  $-z$ -го максимума среди  $\{x_i^s\}$ ,  $w_{z,k,p}$  – вес локальной характеристики окрестности  $z$ -го максимума при  $p$ -ом способе формирования весов по основанию  $k$ :

$$w_{z,k,p}(x^s) = \begin{cases} k^{z-1}, p = 1; \\ k^{N-z}, p = 2; \\ k^{\left| \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \{x_i^s\} - z \right|}, p = 3; \\ k^{N - \left| \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \{x_i^s\} - z \right|}, p = 4; \\ k(z-1), p = 5; \\ k(N-z), p = 6; \\ k^{\left| \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \{x_i^s\} - z \right|}, p = 7; \\ k \left( N - \left| \arg \max_{i=1,2,\dots,N} \{x_i^s\} - z \right| \right), p = 8. \end{cases}$$

Достоинством данного подхода к разбиению сигнала на составляющие, в отличие от вейвлет-разложения и преобразования Фурье, является то, что характеристики сигнала анализируются в исходной форме без навязывания ему искусственного базиса.

#### 4. ЛОКАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРАГМЕНТА СИГНАЛА В ОКРЕСТНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО МАКСИМУМА

Фрагмент сигнала  $\{x_i^s\}_z$  в окрестности  $z$ -го максимума (далее используется локальная нумерация отчетов сигнала внутри соответствующего фрагмента, а  $N'$  – число отсчетов соответствующего фрагмента сигнала) предлагаются характеризовать на основе следующих показателей:

- значение  $z$ -го максимума:  $v_1(\{x_i^s\}_z) = \max_i \{x_i^s\}_z$ ;
- левое граничное значение  $z$ -го фрагмента сигнала:

$$v_2(\{x_i^s\}_z) = x_1^s;$$

- правое граничное значение  $z$ -го фрагмента сигнала:  $v_3(\{x_i^s\}_z) = x_{N'}^s$ ;
- длина  $z$ -го фрагмента сигнала:  $v_4(\{x_i^s\}_z) = N'$ ;
- разность границ  $z$ -го фрагмента сигнала:

$$v_5(\{x_i^s\}_z) = |x_{N'}^s - x_1^s|;$$

- площадь огибающей  $z$ -го фрагмента сигнала [11]:

$$v_6(\{x_i^s\}_z) = \sum_{i=1}^{N'-1} \left( \min \{x_{i+1}^s, x_i^s\} + 0,5 |x_{i+1}^s - x_i^s| \right);$$

- периметр огибающей  $z$ -го фрагмента сигнала [11]:

$$v_7(\{x_i^s\}_z) = \sum_{i=1}^{N'-1} \sqrt{(x_{i+1}^s - x_i^s)^2 + 1};$$

- среднее арифметическое значение  $z$ -го фрагмента сигнала:

$$v_8(\{x_i^s\}_z) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} x_i^s;$$

- дисперсия (мера рассеяния)  $z$ -го фрагмента сигнала:

$$v_9(\{x_i^s\}_z) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left( x_i^s - \sum_{j=1}^{N'} x_j^s \right)^2;$$

- асимметрия  $z$ -го фрагмента сигнала:

$$v_{10}(\{x_i^s\}_z) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left( x_i^s - \sum_{j=1}^{N'} x_j^s \right)^3;$$

- эксцесс  $z$ -го фрагмента сигнала:

$$v_{11}(\{x_i^s\}_z) = \frac{1}{N'} \sum_{i=1}^{N'} \left( x_i^s - \sum_{j=1}^{N'} x_j^s \right)^4;$$

- абсолютный показатель выпуклости  $z$ -го фрагмента сигнала:

$$\begin{aligned} v_{12}(\{x_i^s\}) = & \sum_{i=1}^{\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}} \left( \frac{\max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - x_1^s}{\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - 1} (i-1) + x_1^s - x_i^s \right) + \\ & + \sum_{i=\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}}^{N'} \left( \frac{x_{N'}^s - \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}}{N' - \arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}} (i - \arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}) + \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - x_i^s \right); \end{aligned}$$

- средний показатель выпуклости  $z$ -го фрагмента сигнала:  $v_{12}(\{x_i^s\}) = v_{12}(\{x_i^s\}) / N'$ ;

– качественный показатель выпуклости  $z$ -го фрагмента сигнала:

$$\nu_{13}(\{x_i^s\}) = \frac{1}{4} \left( 2 + \operatorname{sgn} \left( \sum_{i=1}^{\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}} \left( \frac{\max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - x_1^s}{\max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - 1} (i-1) + x_1^s - x_i^s \right) \right) + \right. \\ \left. + \operatorname{sgn} \left( \sum_{i=\arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}}^{N'} \left( \frac{x_{N'}^s - \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}}{N' - \arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}} (i - \arg \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\}) + \max_{j=1,2,\dots,N'} \{x_j^s\} - x_i^s \right) \right) \right).$$

## 5. ОБОБЩЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОРМЫ ОДНОМЕРНОГО СТАЦИОНАРНОГО СИГНАЛА

Данные показатели на основе значений единичных отсчетов сигнала  $x^s$  описывают общие свойства сигнала. Форму одномерного стационарного сигнала будем характеризовать с помощью следующих показателей:

– совокупная длина участков возрастания сигнала:

$$I_{\wedge}^s = \sum_{i=1}^{N-1} \{1 | x_{i+1}^s > x_i^s\};$$

– совокупная длина участков убывания сигнала:

$$I_{\vee}^s = \sum_{i=1}^{N-1} \{1 | x_{i+1}^s < x_i^s\},$$

– доля участков неубывания сигнала:

$$I_{\Sigma}^s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau(x_i^s),$$

$$\tau(x_i^s) = \begin{cases} 0, i = 0; \\ 0, i > 1, x_i^s < x_{i-1}^s; \\ 1, i > 1, x_i^s > x_{i-1}^s; \\ \tau(x_{i-1}^s), i > 1, x_i^s = x_{i-1}^s. \end{cases}$$

Данная группа показателей позволяет в целом описать соотношения между длинами участков возрастания и убывания сигнала.

По аналогии с методом потенциалов [10] определим показатели, учитывающие совместное влияние отсчетов сигнала друг на друга:

$$I_1^s = \sum_{i=1}^N x_i^s \left( \sum_{j=1}^N e^{-|i-j| |x_i^s - x_j^s|} \right),$$

$$I_2^s = \sum_{i=1}^N x_i^s \left( \sum_{j=1}^N |x_i^s - x_j^s| e^{-|i-j|} \right),$$

$$I_3^s = \sum_{i=1}^N x_i^s \left( \sum_{j=1}^N e^{-|i-j|} e^{-|x_i^s - x_j^s|} \right),$$

а также показатель, учитывающий положение отсчета относительно максимального значения сигнала:

$$I_4^s = \frac{1}{\max_{j=1,2,\dots,N} \{x_j^s\}} \sum_{i=1}^N x_i^s \left| \arg \max_{j=1,2,\dots,N} \{x_j^s\} - i + 1 \right|.$$

Учет совместного влияния отсчетов сигнала позволяет понизить влияние помех, а также усилить влияние совместно расположенных отсчетов на интегральную характеристику формы сигнала.

Также по аналогии с описанием формы изображений [11] будем характеризовать форму одномерного стационарного сигнала периметром его огибающей:

$$I_{\Pi}^s = \sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1}^s - x_i^s)^2 + 1}$$

и ее площадью:

$$I_{\int}^s = \sum_{i=1}^{N-1} \left( \min \{x_{i+1}^s, x_i^s\} + 0,5 |x_{i+1}^s - x_i^s| \right),$$

на основе которых можно определить отношение периметра к площади огибающей сигнала:

$$I_{\%}^s = \frac{I_{\Pi}^s}{I_{\int}^s}.$$

Заметим, что периметр огибающей сигнала характеризует скорость его изменения, а площадь – энергию сигнала.

Также сигнал  $x^s$  возможно охарактеризовать с помощью взвешенной суммы его отсчетов:

$$I_{k,p}^s = \sum_{i=1}^N w_{i,k,p}(x^s) x_i^s,$$

полагая  $z$  при расчете  $W_{i,k,p}$ :

$$z = \arg \max_{j=1,2,\dots,N} \{x_j^s\}.$$

## 6. ОТБОР ИСКУССТВЕННЫХ ПРИЗНАКОВ

Для выбора наиболее информативной комбинации из предложенного набора искусственных признаков возможно использовать различные методы отбора признаков [1–4].

При использовании методов фильтрующего типа [4] целесообразно использовать предложенный автором в [12] критерий компактности-отделимости классов:

$$SC = 1 - \exp \left( - \frac{\min_{\substack{s \neq p, \\ s=1,2,\dots,S; \\ p=s+1,\dots,S}} \left\{ \sum_{i=1}^N (x_i^s - x_i^p)^2 \mid y^s \neq y^p \right\} \right)}{1 + \min_{\substack{s \neq p, \\ s=1,2,\dots,S; \\ p=s+1,\dots,S}} \left\{ \sum_{i=1}^N (x_i^s - x_i^p)^2 \right\}} \right).$$

Значения показателя  $SC$  будут расположены в интервале от нуля до единицы: чем меньше значение критерия, тем более тесно расположены (более сложно разделимы) разные классы и тем менее сконцентрированы экземпляры одного и того же класса.

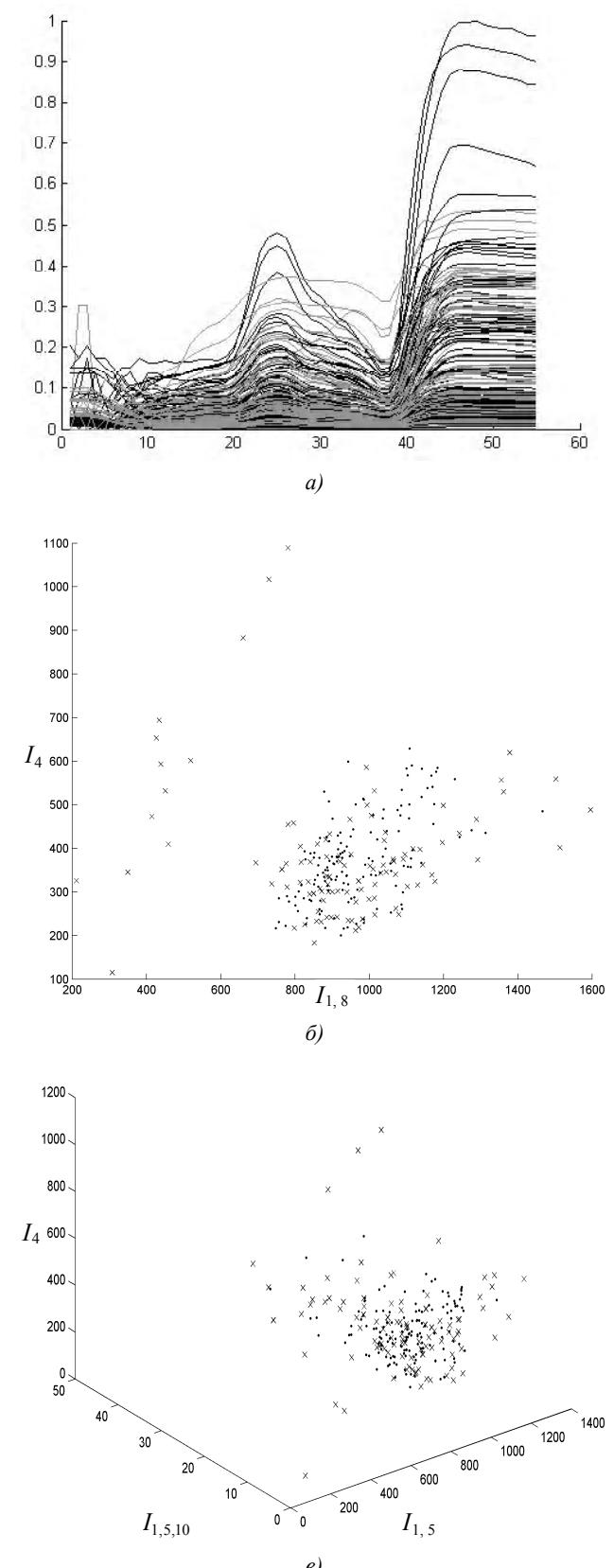
Из набора сочетаний признаков наиболее предпочтительным будет то сочетание, которое при минимуме используемых признаков максимизирует значение критерия компактности-отделимости классов.

## 7. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

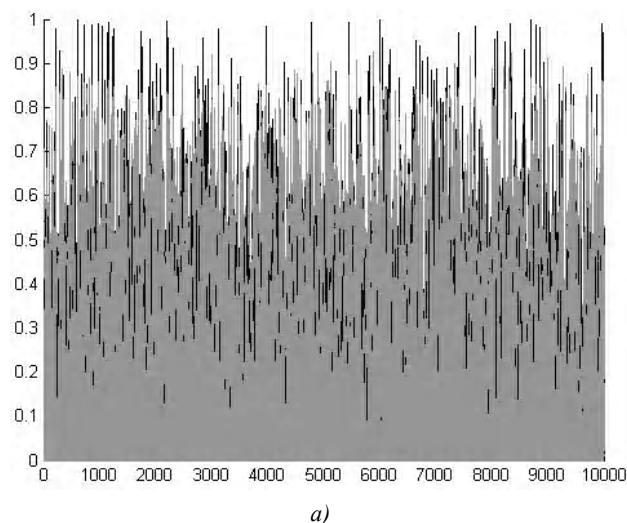
Для экспериментальной проверки применимости предложенного комплекса показателей было разработано программное обеспечение, интегрируемое со средой пакета MATLAB. Разработанное программное обеспечение использовалось для обработки сигналов и спектров сигналов (перед обработкой данные нормировались) в задачах автоматической классификации растительных объектов [13] (рис. 1), диагностирования рака [14] (рис. 2) и неразрушающего диагностирования лопаток газотурбинных авиадвигателей [15] (рис. 3–4).

На рис. 1, а, 2, а, 3, а и 4, а изображены все экземпляры исходных выборок. Экземпляры разных классов показаны черным и серым цветами, соответственно. Из рис. 1, а, 2, а, 3, а и 4, а легко видеть, что сигналы в каждом исходном наборе признаков сложно разделимы, а сами наборы исходных признаков характеризуются существенной многомерностью. Поэтому для решения соответствующих задач необходимо преобразование исходного набора признаков в искусственный набор, меньшего размера, сохраняющий основные свойства исходных сигналов.

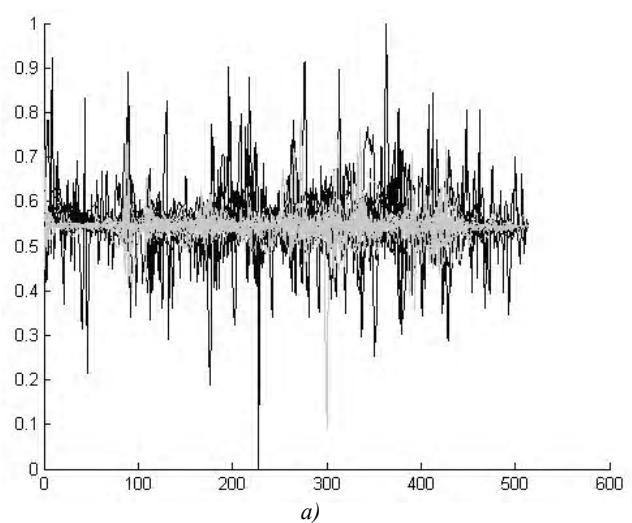
На рис. 1, б, 2, б, 3, б и 4, б представлены соответствующие выборки в пространствах лучших двупризнаковых



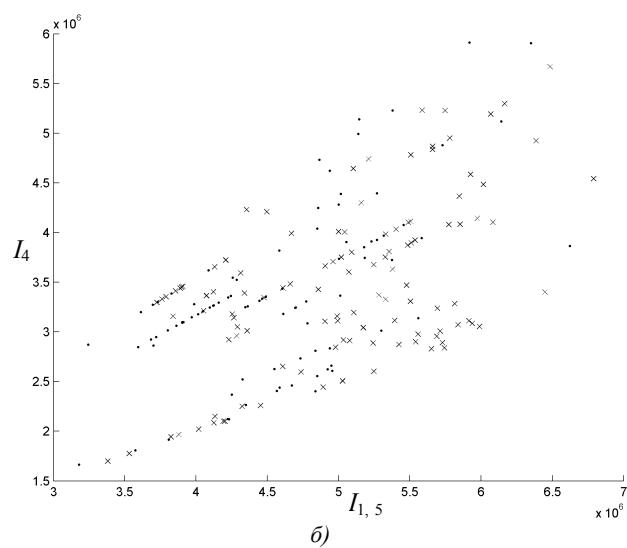
**Рис. 1.** Выборка в нормализованном исходном (а) и конструктивном двумерном (б) и трехмерном (в) пространствах признаков для задачи автоматической классификации растительных объектов по коэффициентам спектральной яркости



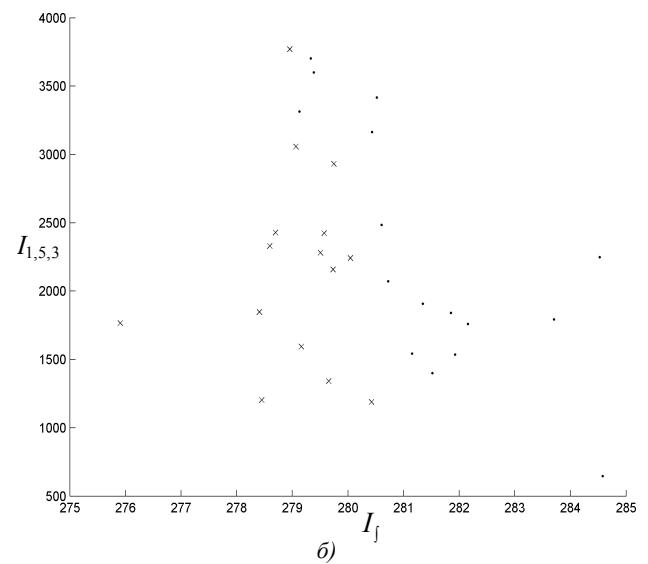
*a)*



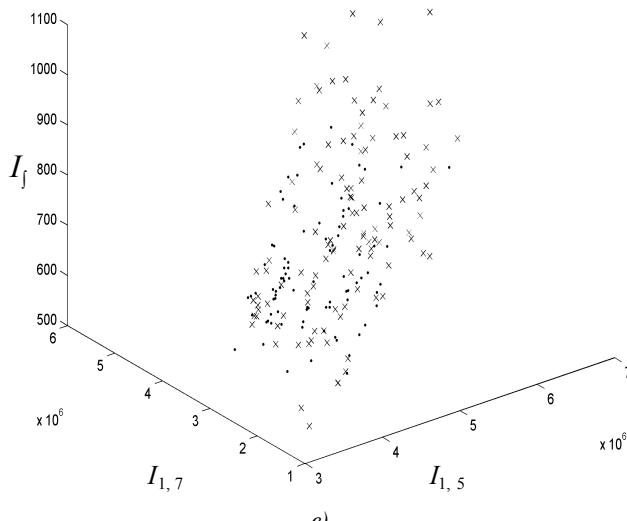
*a)*



*b)*

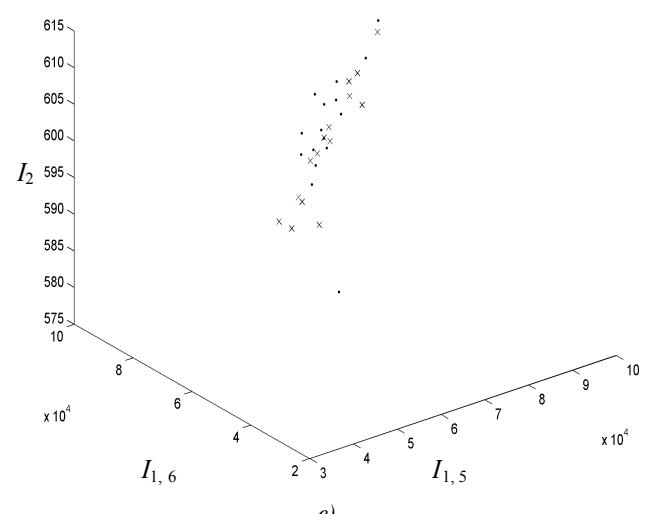


*c)*



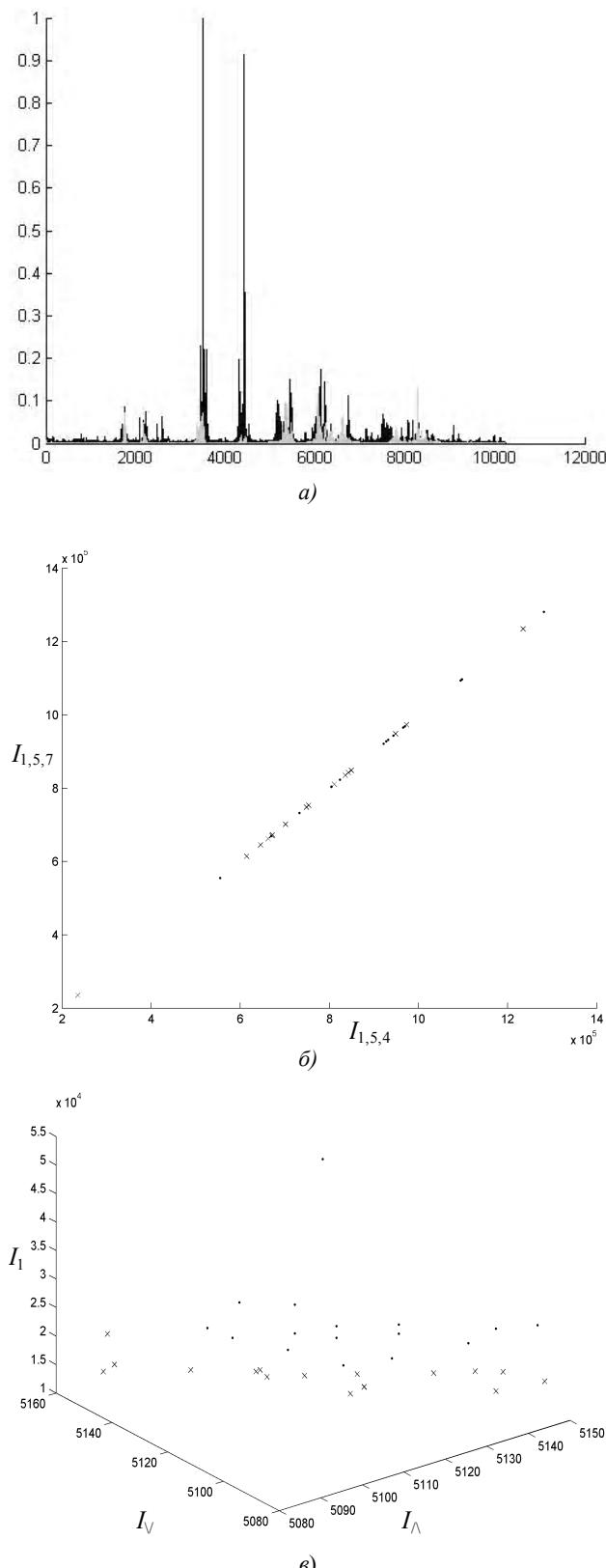
*d)*

**Рис. 2.** Выборка в нормализованном исходном (а) и конструктивном двумерном (б) и трехмерном (в) пространствах признаков для задачи диагностирования рака по данным спектрального анализа



*a)*

**Рис. 3.** Выборка в нормализованном исходном (а) и конструктивном двумерном (б) и трехмерном (в) пространствах признаков для задачи диагностирования лопаток газотурбинных авиадвигателей по разностям полупериодов свободных затухающих колебаний после ударного возбуждения



**Рис. 4.** Вибірка в нормалізованому ісходному (а) і конструктивнім двумерному (б) і тривимірному (в) просторах признаків для задачі діагностування лопаток газотурбінних авіадвигунів по спектрам свободних затухаючих коливань після ударного відродження

сочетаний предложенными показателями по критерию  $SC$ , а на рис. 1, б, 2, в, 3, в и 4, в – в пространстве лучших трехпризнаковых сочетаний. Экземпляры разных классов показаны маркерами «.» и «x», соответственно. Из рис. 1–4, б–в можно видеть, что предложенные показатели позволяют существенно снизить размерность решаемых задач, обеспечивая при этом также улучшение разделимости классов. Предложенные показатели также могут быть рекомендованы для использования с целью картографирования и визуализации больших массивов сигналов.

### ЗАКЛЮЧЕННЯ

В работе решена актуальная задача автоматизации сокращения размерности данных для построения диагностических и распознающих моделей на основе стационарных одномерных сигналов, распределенных во времени.

*Научная новизна* результатов работы заключается в том, что впервые предложен комплекс показателей, характеризующих свойства сигналов для автоматической классификации объектов, позволяющий существенно сократить описание классифицируемых объектов, уменьшить влияние помех и погрешностей измерений на результаты классификации, сохранить и повысить интерпретабельность синтезируемых распознающих и диагностических моделей.

*Практическая значимость* результатов работы состоит в том, что: разработано программное обеспечение, реализующее предложенный комплекс показателей и позволяющее решать задачи сокращения описания сигналов для построения распознающих и диагностических моделей; проведены эксперименты по исследованию предложенного комплекса показателей при решении практических задач, подтвердившие его работоспособность и позволяющие рекомендовать его для применения на практике.

*Перспективы дальнейших исследований* заключаются в том, чтобы: дополнить предложенный комплекс показателями, позволяющими характеризовать свойства нестационарных, а также многомерных сигналов; исследовать практическую применимость предложенных показателей и реализующего их программного обеспечения при решении широкого класса практических задач распознавания образов, технического и биомедицинского диагностирования.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем «Методы, модели и устройства принятия решений в системах распознавания образов» (№ гос. регистрации 0111U0000059) и «Информационные технологии автоматизации распознавания образов и принятия решений для диагностирования в условиях неопределенности на основе гибридных нечеткологических, нейросетевых и мультиагентных методов вычислительного интеллекта» (№ гос. регистрации 0109U007673) Запорожского национального технического университета.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

- Субботін, С. О. Нейтеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моде-

- лей : монографія [Текст] / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.
2. Прогресивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей : монография [Текст] / [А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин] ; под ред. Д. В. Павленко, С. А. Субботина. – Запорожье : ОАО «Мотор-Сич», 2009. – 468 с.
3. Олійник, А. О. Еволюційні обчислення та програмування : навчальний посібник [Текст] / А. О. Олійник, С. О. Субботін, О. О. Олійник. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – 324 с.
4. Dash, M. Feature selection for classification [Text] / M. Dash, H. Liu // Intelligent data analysis. – 1997. – №1. – P. 131–156.
5. Hyvärinen, A. Independent component analysis [Text] / A. Hyvärinen, J. Karhunen, E. Oja. –New York : John Wiley & Sons, 2001. – 481 p.
6. Lee, J. A. Nonlinear dimensionality reduction [Text] / J. A. Lee, M. Verleysen. – New York: Springer, 2007. – 308 p.
7. Multifactor dimensionality reduction for detecting haplotype-haplotype interaction [Text] / Y. Jiang, R. Zhang, G. Liu [et al.] // Fuzzy systems and knowledge discovery : sixth international conference, 14–16 August 2009, Tianjin : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2009. – P. 241 –245.
8. Оппенгейм, А. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А. Оппенгейм, Р. Шафер. – М. : Техносфера, 2007. – 856 с.
9. Mallat, S. A wavelet tour of signal processing: the sparse way [Text] / S. Mallat. – Waltham : Academic Press, 2008. – 832 p.
10. Фор, А. Восприятие и распознавание образов [Текст] / А. Фор ; под ред. Г. П. Катыса. – М. : Машиностроение, 1989. – 271 с.
11. Forsyth, D. Computer vision: a modern approach [Text] / D. Forsyth, J. Ponce. – New Jersey : Prentice Hall, 2002. – 693 p.
12. Subbotin, S. A. The training set quality measures for neural network learning / S. A. Subbotin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2010. – Vol. 19. – № 2. – P. 126–139.
13. The plant recognition on remote sensing results by the feed-forward neural networks / [V. Dubrovin, S. Subbotin, S. Morshchavka,
- D. Piza] // Smart Engineering System Design. – 2001. – № 3. – P. 251–256.
14. Arcene data set [Electronic resource] / I. Guyon. – Access mode: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Arcene>.
15. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей : монография [Текст] / [В. И. Дубровин, С. А. Субботин, А. В. Богуслаев, В. К. Яценко]. – Запорожье : ОАО «Мотор-Сич», 2003. – 279 с.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2011.

Субботін С. О.

КОНСТРУЙОВНІ ОЗНАКИ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ У ЧАСІ СТАЦІОНАРНИХ СИГНАЛІВ

Вирішено актуальне завдання автоматизації скорочення розмірності даних для побудови діагностичних і розпізнавальних моделей на основі стаціонарних одновимірних сигналів, розподілених у часі. Уперше запропоновано комплекс показників, які характеризують властивості сигналів, що дозволяє істотно скоротити опис об'єктів, які класифікуються. Проведено експерименти з дослідження запропонованого комплексу показників при вирішенні практичних задач.

**Ключові слова:** розпізнавання образів, технічне діагностування, ознака, стаціонарний сигнал, витяг ознак.

Subbotin S. A.

CONSTRUCTED FEATURES FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF STATIONARY TIMING SIGNALS

The challenge for automation to reduce the dimension of the data has been solved for the construction of diagnostic and recognizing patterns, based on steady-state one-dimensional signals, distributed in time. The set of indicators characterizing the properties of the signals, which allows to reduce the description of the classified objects is firstly proposed. The experiments on studying of the proposed indicator set at practical problem solving s are conducted.

**Key words:** pattern recognition, technical diagnosis, feature, stationary signal, feature extraction.

УДК 004.832

Ткаченко Р. О.<sup>1</sup>, Машевська М. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор Національного університету «Львівська політехніка»

<sup>2</sup>Аспірант Національного університету «Львівська політехніка»

## НЕЙРОНЕЧІТКА СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО СИНТЕЗУ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКА РІВНЯ БІОКОМФОРТУ

Описано процес розроблення математичних моделей за допомогою нейронечіткого моделювання. Розглянуто етапи побудови нечіткої моделі для оцінювання рівня біокомфорту житла.

**Ключові слова:** нейронечітка система, компактна модель, параметри біокомфорту.

### ВСТУП

Оцінювання якості житла на основі показника рівня біокомфорту передбачає визначення відповідності

співвідношення значень основних параметрів середовища проживання до вимог щодо оптимальних умов для збереження здоров'я та рівноваги систем організму лю-

дини в моделі «людина – житлове середовище». Рівень біокомфорту визначається на основі теплових параметрів житлового середовища, показника природного освітлення, а також «фактора впливу» конструкції будинку на організм людини [1]. Тепловий рівень комфорту людини забезпечується оптимальним співвідношенням параметрів мікроклімату: температури повітря, температури внутрішніх поверхонь стін та відносної вологості повітря. Інтенсивність та характер впливу чинників житлового середовища на людину залежать від степеня її чутливості до коливань значень параметрів біокомфорту та від показника режиму проживання.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Задача оцінювання параметрів біокомфорту передбачає врахування ряду показників, які не можливо отримати прямими методами вимірювання або описати за допомогою імітаційного моделювання. В такому випадку доцільно використати методи нечіткого моделювання для представлення деяких параметрів за допомогою лінгвістичних змінних. В результаті підготовки даних для вирішення задачі оцінювання показника рівня біокомфорту на вході системи маємо набір різномінітних даних, що описують внутрішні параметри житлового середовища та індивідуальні характеристики мешканців. Для розроблення математичних залежностей, які дозволяють представити оцінку сукупного впливу чинників житлового середовища на організм людини у вигляді показника рівня біокомфорту, доцільно застосувати комплексний підхід до побудови моделей, що базується на використанні синтетичної інформації. Формування синтетичного набору даних здійснюється на основі інформації різного походження, зокрема, отриманої одночасно за допомогою імітаційного моделювання, експериментальних даних та висновків експертів. Побудова компактної інформаційної моделі на основі синтетичної вибірки даних, на етапі обчислення вихідних значень показника рівня біокомфорту для відповідних векторів вихідних параметрів, передбачає використання нейронечіткого *T*-контролера, а на етапі розроблення залежності в аналітичному вигляді – нейромережевого генератора формул.

## РОЗРОБЛЕННЯ НЕЙРОНЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ БІОКОМФОРТУ

На етапі передбачення значень показника рівня біокомфорту на основі вихідних параметрів житлового середовища розроблено нечітку модель для *T*-контролера. Функціонування *T*-контролера нечіткої логіки, що реалізується в програмному середовищі *T*-Controller Workshop [2], передбачає три етапи: фазифікацію змінних, логічне виведення на основі бази правил та дефазифікацію вихідного значення. Особливістю такого контролера є нейромережевий метод дефазифікації, що здійснюється на основі навчання нейроподібних структур моделі геометричних перетворень (МГП) [3]. Такий метод дефазифікації забезпечує нульову методичну похибку перетворення для відомих точних значень на вході, тобто похибка результату

залежить лише від точності обчислення відповідних функцій належності. Перевагою *T*-контролера є підвищення точність функціонування і можливість розв'язання завдань з багатьма вхідними параметрами.

Розроблення контролера в програмному середовищі *T*-Controller Workshop можливе в двох варіантах: побудова з використанням введеного користувачем опису нечіткої моделі та створення на основі таблиць даних. В процесі вирішення задачі оцінювання рівня біокомфорту розглядається варіант введення опису нечіткої моделі у відповідні поля робочого інтерфейсу програмного пакету *T*-Controller Workshop (рис. 1).

Вхідними параметрами розробленої нечіткої моделі є:

- $T_{in}$  – температура повітря всередині приміщення – з базовою терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [13, 27];

- $dt$  – максимальний перепад температур повітря і внутрішніх поверхонь стін – з терм-множиною {«low», «high»} на універсальній множині [1, 6];

- $RH$  – показник відносної вологості повітря – з терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [35, 80];

- $sens$  – степінь чутливості людини до впливів зовнішніх чинників – з терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [0, 1];

- $res$  – режим проживання людини – з терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [1, 3];

- $y$  – показник впливу житлового середовища на людину – з терм-множиною {«low», «med», «high»} на універсальній множині [200, 2500];

- $insol$  – ступінь природного освітлення – з терм-множиною {«low», «high»} на універсальній множині [0, 1, 0, 5];

Виходом контролера є параметр *PLC* (Predicted Level of Comfort) – передбачене значення рівня біокомфорту в житловому середовищі – з терм-множиною {«very\_low», «low», «med», «high», «very\_high»}, терми якої відповідають чітким значенням «1», «2», «3», «4» та «5» рівнів біокомфорту.

Визначення чітких значень термів лінгвістичних змінних нечіткої моделі, побудова функцій належності, формування правил нечіткої логіки виконується на ос-

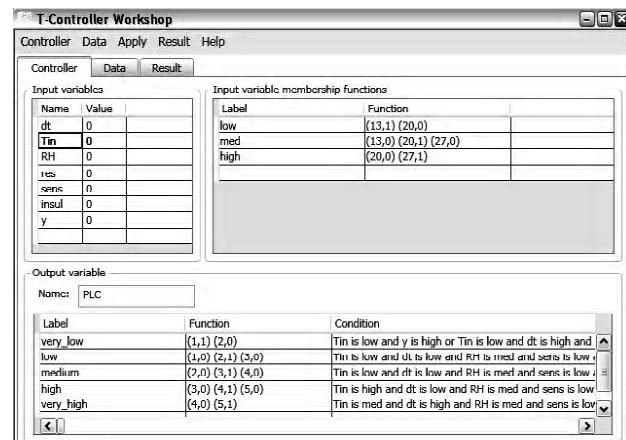


Рис. 1. Розробка нечіткого контролера в середовищі *T*-Controller Workshop

нові інформації від експертів, даних від обстеження кількох малоповерхових житлових будинків та проведених опитувань мешканців з метою визначення степеня їх задоволення та відчуття комфорту перебування тривалий час в житловому середовищі.

Сформовані набори правил, згідно вимог *T*-контролера [2], записуються у стовпці *Condition* (рис. 1) у такому вигляді (для умови PLC is very\_low):

*Tin* is low and *y* is high or *Tin* is low and *dt* is high and *RH* is low and *y* is med or *Tin* is low and *dt* is low and *RH* is low and *sens* is high and *y* is med or ...

Для тестування розробленого нечіткого контролера на його входи подавались вектори значень параметрів біокомфорту у житловому середовищі. На виході контролера було одержано передбачені числові значення показника рівня біокомфорту в малоповерхових будинках відповідно до введених вхідних даних (табл. 1).

## ПОБУДОВА КОМПАКТНОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

На основі векторів числових співвідношень, отриманих за допомогою *T*-контролера, потрібно розробити математичну модель в компактному аналітичному вигляді, що описує залежність показника рівня біокомфорту від параметрів житлового середовища та індивідуальних характеристик мешканців. Для задачі оцінювання рівня біокомфорту доцільно розробити раціонально-дробову функцію у вигляді формули Паде, що дозволяє отримати високу точність моделювання завдяки методу апроксимації. В класичному трактуванні, апроксимація Паде є функцією у вигляді відношень двох поліномів, коефіцієнти яких визначаються коефіцієнтами розкладу функції в ряд Тейлора [4]. Обмеження, що виникають під час використання методу, успішно вирішуються за допомогою нейроподібних моделей геометричних перетворень. З цієї причини для розроблення математичних моделей для оцінювання рівня біокомфорту доцільно використати нейромережевий генератор формул Sapienware.Equo 2.1.

В основі процесу розроблення математичних залежностей є навчання нейроподібних моделей [5]. Вид генерованої формулі залежить від выбраної для навчання нейромоделі функції активації. У нашому випадку, вихідна залежність буде у вигляді лінійного поліному Паде. Для оптимізації згенерованих залежностей використано метод «імітації відпалу металу», що дозволив покращити результат відповідно до похиби MAPE (mean absolute

percentage error) на 7 %. Результати генерації поліному можна розглянути у спеціальному вікні робочого інтерфейсу програми (рис. 2).

На етапі генерації формул виявилось необхідним розбиття вхідних даних на два набори вхідних векторів, відповідно до температури повітря в приміщенні. Таким чином, модель обчислення показника рівня біокомфорту має такий вигляд:

$$PLC = \begin{cases} f_1(X), & \text{якщо } T_{in} < 21^{\circ}\text{C} \\ f_2(X), & \text{якщо } T_{in} \geq 21^{\circ}\text{C}, \end{cases} \quad (1)$$

де *PLC* – показник рівня біокомфорту; *T<sub>in</sub>* – температура повітря в житловому середовищі, °C; *f<sub>1</sub>(X)* і *f<sub>2</sub>(X)* – лінійні поліноми Паде, що описують залежності показника рівня біокомфорту від вхідного вектора параметрів житла *X* = {*T<sub>in</sub>*, Δ*t*, φ, *sens*, *res*, γ, *insol*}, відповідно до температури повітря всередині.

В результаті генерації поліномів були одержані коефіцієнти для залежностей *f<sub>1</sub>(X)* і *f<sub>2</sub>(X)*, які в загальному випадку можна записати так:

$$f(X) = \frac{a_0 + a_1 T_{in} + a_2 \Delta t + a_3 \varphi + a_4 sens + a_5 res + a_6 \gamma + a_7 insol}{1 + b_1 T_{in} + b_2 \Delta t + b_3 \varphi + b_4 sens + b_5 res + b_6 \gamma + b_7 insol}, \quad (2)$$

де *T<sub>in</sub>* – температура повітря у житловому середовищі, °C; Δ*t* – максимальний перепад між температурою повітря та температурою внутрішніх поверхонь стін, °C; φ – відносна вологість повітря, %; *sens* – рівень чутливості мешканця (або групи мешканців); *res* – режим про-

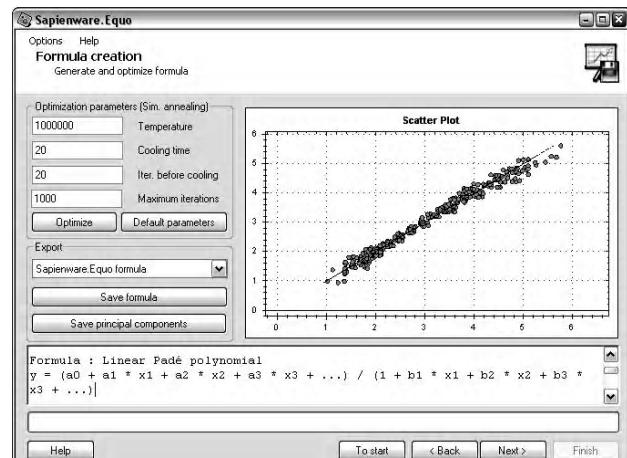


Рис. 2. Вікно статистичних результатів генерування залежності нейромережевим генератором формул EQUO

Таблиця 1. Результати оцінювання рівня біокомфорту нечітким *T*-контролером

<i>T<sub>in</sub></i> , °C	Δ <i>t</i> , °C	φ, %	<i>sens</i>	<i>res</i>	<i>y</i> , Вт/кг	<i>insol</i>	<i>PLC</i>
16	5,43	69	1	2	1799	0,22	1,68
15,5	4,55	38	0,5	3	935	0,11	1,94
17	1,87	70	0	3	530	0,17	3,27
20	1,48	47	1	2	641	0,32	4,65
19,5	2,24	50	0,5	3	688	0,34	4,39
18,5	1,4	60	1	3	450	0,27	3,99

живання людей;  $\gamma$  – показник теплового впливу будинку на людину, Вт/кг;  $insol$  – степінь природного освітлення житлового середовища;  $(a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4 \ a_5 \ a_6 \ a_7)$  і  $(b_1 \ b_2 \ b_3 \ b_4 \ b_5 \ b_6 \ b_7)$  – коефіцієнти поліному Паде.

Так, для експлуатаційних умов з температурою повітря  $T_{in} < 21^{\circ}\text{C}$  (для  $f_1(X)$ ) коефіцієнти поліному:  $a_0 = 416,73$ ;  $a_1 = -56,03$ ;  $a_2 = 7,51$ ;  $a_3 = -1,88$ ;  $a_4 = 69,62$ ;  $a_5 = 38,52$ ;  $a_6 = 0,04$ ;  $a_7 = -360,02$ ;  $b_1 = -5,40$ ;  $b_2 = -6,90$ ;  $b_3 = -0,46$ ;  $b_4 = -4,25$ ;  $b_5 = -0,19$ ;  $b_6 = -0,05$ ;  $b_7 = -1,08$ .

Коефіцієнти математичної залежності  $f_2(X)$ , для експлуатаційних умов з температурою повітря  $T_{in} \geq 21^{\circ}\text{C}$ , є:  $a_0 = 126,3$ ;  $a_1 = -2,01$ ;  $a_2 = -0,26$ ;  $a_3 = -0,15$ ;  $a_4 = -19,38$ ;  $a_5 = 0,008$ ;  $a_6 = -0,01$ ;  $a_7 = 30,75$ ;  $b_1 = 0,65$ ;  $b_2 = 0,83$ ;  $b_3 = -0,004$ ;  $b_4 = -2,86$ ;  $b_5 = 0,53$ ;  $b_6 = 0,002$ ;  $b_7 = -2,31$ .

За допомогою розробленої моделі (1) можна оцінити рівень біокомфорту, відповідно до вхідних показників, що характеризують певне житлове середовище. Так, якщо температура повітря є  $20^{\circ}\text{C}$ , максимальний перепад між температурою повітря та температурою внутрішніх поверхонь стін є  $1,5^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість повітря  $55\%$ , показник «шкідливого впливу будинку» рівний  $578$  Вт/кг, показник природного освітлення  $0,24$ , для людини з високим ступенем чутливості до впливів біокомфортних чинників середовища за умови 1-го режиму проживання показник біокомфорту  $PLC = 4,24$ , що відповідає 4 рівню.

## ВИСНОВКИ

Використання методів нейронечіткого моделювання для вирішення задачі оцінювання рівня біокомфорту в малоповерхових будинках дозволило на етапі підготовки даних врахувати експериментальні дані разом з висновками експертів, що забезпечило можливість розширення кількості вхідної інформації для моделі. Побудована компактна математична модель, у вигляді формул Паде, для оцінювання показника рівня біокомфорту на основі попереднього нейронечіткого моделювання, дозволила в більш широкому спектрі врахувати вплив чинників житлового середовища на організм людини.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ткаченко, Р. О. Інтелектуалізована система оцінювання параметрів біокомфорту приміщення / Р. О. Ткаченко, М. В. Машевська // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» : Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – 2010. – № 710 – С. 133–138.
2. Rule-based fuzzy system of improved accuracy / O. Tkachenko, R. Tkachenko, Yu. Hirniak, O. Ivakhiv, P. Moshenyk // Materials of 56<sup>th</sup> International scientific colloquium (Ilmenau University of Technology, 12–16 September 2011). – Ilmenau : TU Ilmenau, 2011. – 25 p.
3. Ткаченко, Р. О. Нова парадигма штучних нейронних мереж прямого поширення / Р. О. Ткаченко // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» : Комп’ютерні науки та інформаційні технології. – 1999. – № 386 – С. 43–54.
4. Бейкер, Дж. / Дж. Бейкер, мл., П. Грейвс-Моррис ; пер. с англ. Е. А. Рахманова, С. П. Суетина ; ред. А. А. Gonchar. – М. : Мир, 1986. – 502 с.
5. Ткаченко, Р. О. Елементи архітектури для інтелектуальної системи побудови математичної моделі прогнозування рівня теплового комфорту / Р. О. Ткаченко, М. В. Машевська // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України : збірник науково-технічних праць. – Львів : РВВ НЛТУ України, 2011. – Вип. 21.10. – С. 284–290.

Стаття надійшла до редакції 19.02.2012.

Ткаченко Р. А., Машевская М. В.

НЕЙРОНЕЧЕТКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЯ УРОВНЯ БИОКОМФОРТА

Описано процесс разработки математических моделей при помощи нейронечеткого моделирования. Рассмотрены этапы разработки нечеткой модели для оценивания уровня биокомфорта жилья.

**Ключевые слова:** нейронечеткая система, компактная модель, параметры биокомфорта.

Tkachenko R., Mashevska M.

NEURO-FUZZY SYSTEM FOR AUTOMATION SYNTHESIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR EVALUATING AN INDEX OF LEVEL OF BIOCOMFORT

The process of creating the mathematical model by the neuro-fuzzy modeling is described. The stages of construction of the fuzzy model to evaluating the level of biocomfort of habitation are considered.

**Key words:** neuro-fuzzy system, compact model, parameters of biocomfort.

# ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### PROGRESSIV INFORMATICS TECHNOLOGIES

УДК 004.9

Вершина О. І.<sup>1</sup>, Киричек Г. Г.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

#### МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ НАВЧАННЯ

Досліджено різноманітні варіанти впливу взаємозалежних дисциплін на процес отримання знань з метою подальшого використання отриманих показників в системі інформаційної підтримки навчання.

**Ключові слова:** інформаційна система, дисципліна, навчальний процес, ймовірність, інформаційний ресурс.

#### ВСТУП

З аналізу літературних джерел [1–5] відомо, що більшість перших електронних навчальних видань були копіями друкованих видань і не враховували комп’ютерних можливостей подачі матеріалу. Однак тепер, з метою створення підручників нового типу, значна увага приділяється розробці комп’ютерних навчальних посібників. Тому для того, щоб електронний посібник якнайкраще відповідав пропонованим вимогам, необхідно, щоб він об’єднував в собі функції підручника і довідково-інформаційного посібника, консультанта і програми, яка контролює знання. Для рішення цієї задачі треба використовувати системний підхід до розробки навчального матеріалу у вигляді електронних посібників, враховуючи ієрархію класів навчального процесу.

На даний час інформаційні ресурси вищих навчальних закладів (ВНЗ) характеризуються неповним представленням навчального матеріалу та недостатнім розподілом його за видами навчальної діяльності. В процесі розробки та впровадження систем інформаційної підтримки недостатньо враховується взаємозалежність дисциплін та її вплив на процес навчання.

Згідно Указу Президента України № 926 «Про заходи щодо забезпечення пріоритетного розвитку освіти в Україні» 2011 рік в Україні оголошено Роком освіти та інформаційного суспільства. На Всеукраїнській науково-практичній конференції «Модернізація освіти в умовах роз-

витку інформаційного суспільства», яка пройшла в м. Києві 28 квітня 2011 року обговорювалися питання застосування інформаційних технологій в освіті, створення системи електронних бібліотечних ресурсів за рівнями освіти, використання у навчальному процесі засобів інформатизації з метою оптимізації навчального процесу, формування єдиного освітнього інформаційного простору на всіх рівнях здобуття освіти. Тому дослідження процесів формування та підтримки навчальних інформаційних ресурсів, різного ступеня структурованості, для науково-освітніх процесів, в інтегрованих інформаційних системах ВНЗ, є одним із складних і перспективних науково-технічних завдань.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Широкий спектр робіт, які виконують студенти в процесі вивчення окремих дисциплін, складається з лекцій, семінарів, контрольних, самостійних, тестових, лабораторних, практичних і курсових робіт. Також кожна дисципліна представлена сукупністю тверджень у вигляді масиву інформаційних блоків (одиниць). Кожна одиниця є відповідю на контрольне питання з окремої дисципліни.

Раніше складна система навчання була представлена, як багаторівнева конструкція взаємодіючих між собою та із зовнішнім середовищем елементів [6], а кафедри одного з інститутів – сукупністю дисциплін  $D_1 - D_n$ , які викладаються студентам наведених спеціальностей. Виходячи з цього, розіб’ємо вивченняожної дисципліні

на відповідні модулі, а вивчення кожного елемента такої структури пов'яжемо з пошуковим запитом до інформаційного ресурсу, який у загальному випадку можна представити у вигляді деревоподібної структури, де листами, власне, є інформаційні ресурси з їх атрибутиами, а гілки відображають переходи між вузлами. Корінь такого дерева – навігація по єдиному простору всієї інформаційної системи. Ця модель спрощує роботу пошукового модулю інформаційної системи, але не враховує деякі недоліки, які пов'язані з отриманням великого масиву інформації в процесі пошуку.

Виходячи з архітектури системи інформаційного за-безпечення з її основними класами, об'єктами та їх атри-бутами, клас об'єктів можна представити у вигляді су-купності масивів інформаційних одиниць. Кожен з ма-сивів при цьому є інформаційним об'єктом, який відноситься до однієї з дисциплін, які вивчаються в про-цесі навчання.

Розглянемо процес вивчення кожної дисципліни та представимо його взаємозв'язком етапів навчання та перевірки знань. При різних варіантах взаємозв'язку дисциплін у процесі навчання одержимо різні значення якості та витрат.

Одержання інформації та переробку її в процесі вив-чення дисципліни і процес навчання розглянемо як різні процеси. При цьому процес навчання представимо як сукупність дій з отриманням та перевіркою знань.

Процес вивчення модуля дисципліни складається з наступних подій:

- запит (подія **A**);
- одержання інформації, яка відповідає запиту, та її засвоєння (подія **B**);
- одержання інформації, яка відповідає запиту, та її незасвоєння (подія **C**);
- одержання інформації, яка не відповідає запиту, та помилкове вивчення матеріалу (подія **D**).

Далі проводимо аналіз одержаної інформації та пе-ревірку засвоєнного матеріалу. Після цього маємо мож-ливі наступні стани:

- інформація, яка відповідає запиту, засвоєна і пере-вірка знань це підтвердила (подія **E**);
- інформація, яка відповідає запиту, засвоєна, а пере-вірка знань це не підтвердила (подія **F**);
- інформація, яка відповідає запиту, не засвоєна і пе-ревірка знань це підтвердила (подія **G**);
- інформація, яка відповідає запиту, не засвоєна, а пере-вірка знань це не підтвердила (подія **H**);
- інформація, яка не відповідає запиту, засвоєна і це підтверджується перевіркою знань (подія **I**);
- перевірена інформація не відповідає запиту і віднов-люється процес її пошуку (подія **J**).

Перелік подій приводить до наступних станів навчання:

- стан 1 – сума подій **A, F, G, I, J**;
- стан 2 – подія **B**;
- стан 3 – сума подій **C i D**;
- стан 4 – подія **E**;
- стан 5 – сума подій **H**.

Між виділеними станами маємо наступні переходи, які будемо визначати постійними ймовірностями:

- перехід зі стану 1 у стан 2 визначається ймовірністю  $K_0$ ;
- перехід зі стану 1 у стан 3 визначається ймовірністю  $1 - K_0$ ;
- перехід зі стану 2 у стан 4 визначається ймовірністю  $A$ ;
- перехід зі стану 2 у стан 1 визначається ймовірністю  $1 - A$ ;
- перехід зі стану 3 у стан 5 визначається ймовірністю  $\bar{A}$ ;
- перехід зі стану 3 у стан 1 визначається ймовірністю  $1 - \bar{A}$ .

На виході процесу – два завершальні стани 4 і 5.

Вище наведена гіпотеза дозволяє розглянути навчання як поглинаючий ланцюг Маркова та визначити таку характеристику процесу навчання як ймовірність завер-шення процесу одержання знань  $K$ . Вона означає ймовірність того, що одержана інформація відповідає запиту, засвоєна і перевірка це підтвердила:

$$K = \frac{K_0 A}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)}. \quad (1)$$

Крім того, маємо оцінку кількості ітерацій  $n$ , яка відоб-ражает затрати на навчання:

$$n = \frac{1}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)}. \quad (2)$$

У більшості випадків вивчення різних дисциплін роз-глядається окремо як незалежні процеси. В той же час врахування взаємного впливу для деяких дисциплін може суттєво вплинути на ефективність навчання.

### РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ

Візьмемо за основу перший варіант (рис. 1), якому відповідає відсутність безпосереднього зв'язку між розділами (модулями, темами) дисциплін.  $D_1$  і  $D_2$  – дисцип-

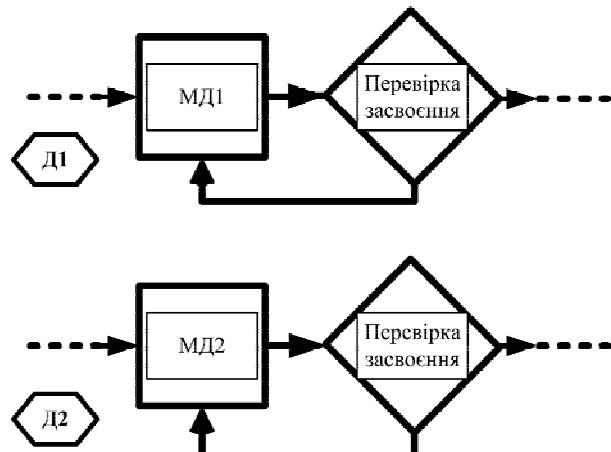


Рис. 1. Структура відсутності зв'язку між розділами дисциплін

ліни, що вивчаються та є об'єктами дослідження, а  $M\Delta_1$  і  $M\Delta_2$  – модуль дисципліни або сукупність модулів (тем, розділів), які вивчаються в цих дисциплінах, відповідно.

Згідно з виразами (1) і (2) для першої дисципліни маємо:

$$K_{\Delta 1} = \frac{K_{0\Delta 1} A_{\Delta 1}}{1 - (1 - K_{0\Delta 1}) \bar{A}_{\Delta 1} - K_{0\Delta 1} (1 - A_{\Delta 1})};$$

$$n_{\Delta 1} = \frac{1}{1 - (1 - K_{0\Delta 1}) \bar{A}_{\Delta 1} - K_{0\Delta 1} (1 - A_{\Delta 1})}, \quad (3)$$

а для другої дисципліни:

$$K_{\Delta 2} = \frac{K_{0\Delta 2} A_{\Delta 2}}{1 - (1 - K_{0\Delta 2}) \bar{A}_{\Delta 2} - K_{0\Delta 2} (1 - A_{\Delta 2})};$$

$$n_{\Delta 2} = \frac{1}{1 - (1 - K_{0\Delta 2}) \bar{A}_{\Delta 2} - K_{0\Delta 2} (1 - A_{\Delta 2})}, \quad (4)$$

де позначення з індексами « $\Delta 1$ » відповідають першій дисципліні, а з індексом « $\Delta 2$ » – другій дисципліні.

Якщо вважати, що обсяги досліджуваного матеріалу модулів дисциплін  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  приблизно однакові і час, який надається на вивчення дисципліни або окремого модуля (теми, розділу) та перевірку знань, теж однаковий, то ймовірності засвоєння матеріалу для модулів дисциплін  $\Delta_1$  і  $\Delta_2$  і ймовірності перевірки одержаних знань будуть приблизно однакові, тобто

$$K_{0\Delta 1} = K_{0\Delta 2} = K_0; A_{\Delta 1} = A_{\Delta 2} = A; \bar{A}_{\Delta 1} = \bar{A}_{\Delta 2} = \bar{A}. \quad (5)$$

В результаті отримаємо:

$$K = K_{\Delta 1} = K_{\Delta 2} = \frac{K_0 A}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)};$$

$$n = n_{\Delta 1} = n_{\Delta 2} = \frac{1}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)}; \quad (6)$$

$$K_1 = K^2 = \left[ \frac{K_0 A}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)} \right]^2; \quad (7)$$

$$n_1 = 2n = 2 \frac{1}{1 - (1 - K_0) \bar{A} - K_0 (1 - A)}. \quad (8)$$

Розглянемо варіанти (а–е) впливу модуля (теми, розділу) дисципліни  $\Delta_2$  на етапи вивчення модуля (теми, розділу) дисципліни  $\Delta_1$  (рис. 2):

– результат вивчення модуля (теми, розділу) дисципліни  $\Delta_2$  враховується при перевірці знань модуля  $\Delta_1$  (а);

– результат вивчення модуля (теми, розділу) дисципліни  $\Delta_2$  враховується при вивчені модуля  $\Delta_1$  (б);

– вивчення модуля дисципліни  $\Delta_1$  погоджено з вивченням модуля дисципліни  $\Delta_2$  (в);

– перевірка знань модуля дисципліни  $\Delta_1$  погоджена з вивченням модуля дисципліни  $\Delta_2$  (г);

– вивчення модуля дисципліни  $\Delta_1$  погоджено з перевіркою знань модуля дисципліни  $\Delta_2$  (д);

– перевірка знань модуля дисципліни  $\Delta_1$  погоджена з перевіркою знань модуля дисципліни  $\Delta_2$  (е).

Кожний з перерахованих варіантів призводить до зміни ймовірностей якісного вивчення і якісної перевірки знань дисципліни  $\Delta_1$ .

Варіанти множинного зв'язку між розділами дисциплін дають можливість оцінити наступні параметри для кожного з варіантів:

– у випадку а), наведеному на рис. 2, маємо:

$$A_{\Delta 1} = A + (1 - A)K; \bar{A}_{\Delta 1} = \bar{A} + (1 - \bar{A})K; \quad (9)$$

– для б) отримаємо:

$$K_{\Delta 1} = K_0 + (1 - K_0)K_0; \quad (10)$$

– для в) отримаємо:

$$K_{\Delta 1} = K_0 + (1 - K_0)K_0; \quad (11)$$

– для г) отримаємо:

$$A_{\Delta 1} = A + (1 - A)K_0; \bar{A}_{\Delta 1} = \bar{A} + (1 - \bar{A})K_0; \quad (12)$$

– для д) отримаємо:

$$K_{\Delta 1} = K_0 A + (1 - K_0) \bar{A}; \quad (13)$$

– для е) отримаємо:

$$A_{\Delta 1} = A + (1 - A)A; \bar{A}_{\Delta 1} = \bar{A} + (1 - \bar{A}) \bar{A}. \quad (14)$$

Проведемо кількісну оцінку для різних варіантів взаємного впливу структурних об'єктів двох дисциплін. При цьому будемо вважати, що ймовірність перевірки засвоєння знань дорівнює одиниці, тобто  $A = 1$ , а обсяги загальних витрат за рахунок неякісного навчання в остаточному підсумку будуть дорівнювати

$$Z_i = n_i \frac{1}{K_i}, \quad (15)$$

де індекс  $i$  пов'язаний з розглянутими варіантами взаємодії, а величина  $\frac{1}{K_i}$  оцінює та визначає той факт, що, в остаточному підсумку, неякісне навчання буде виявлятися на більш пізніх етапах, тому це приведе до додаткових витрат.

Якщо вважати, що в нескінченно малому проміжку часу ймовірності засвоєння (одержання) та перевірки

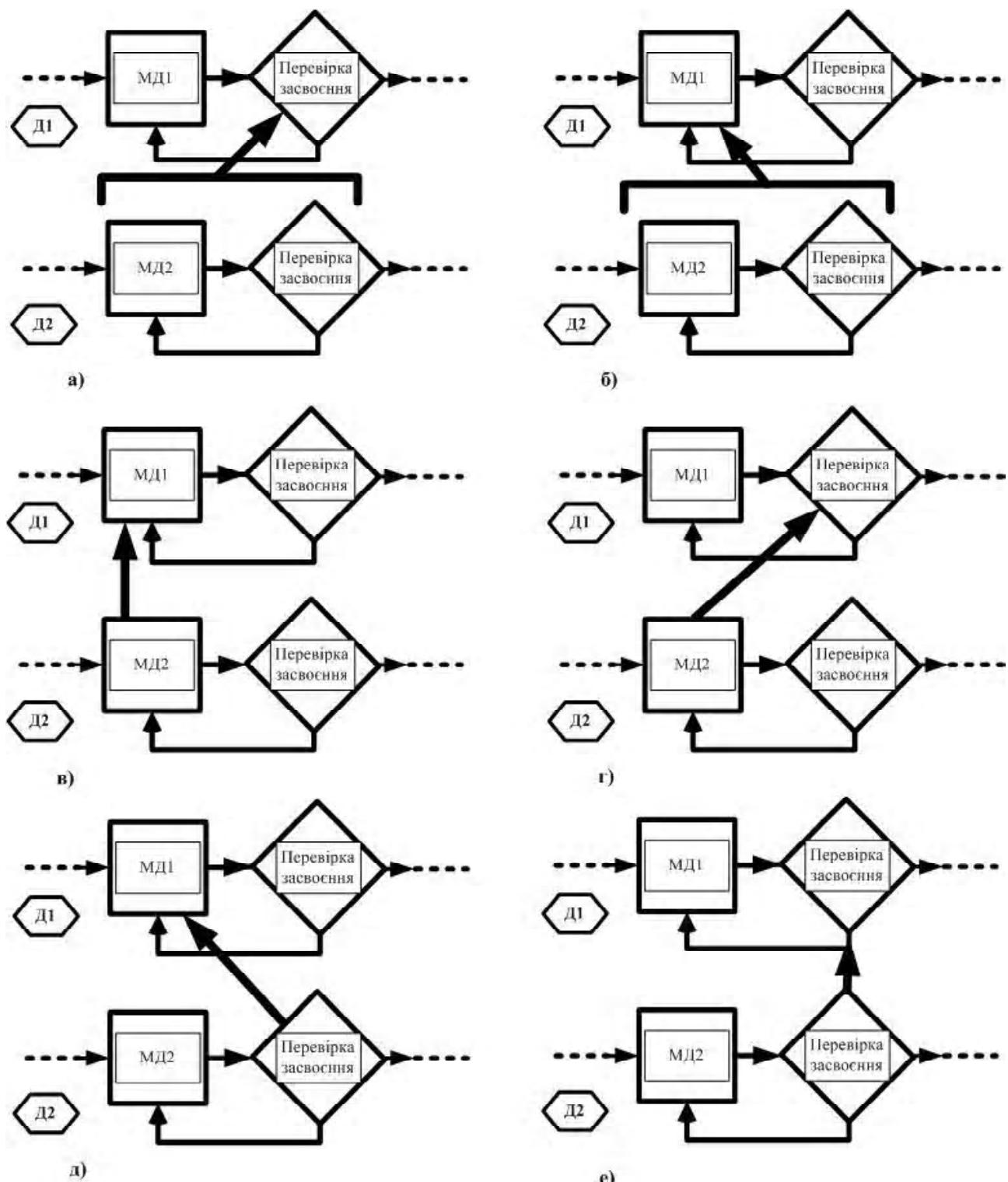


Рис. 2. Варіанти множинного зв'язку між розділами дисциплін

знань пропорційні величині цього проміжку, то щільність розподілу часу як для процесу засвоєння знань (одержання, переробка та запам'ятовування інформаційного блоку), так і для процесу перевірки знань (відповіді на контрольні або тестові запитання) буде представляти експонентний закон розподілу.

При виділенні для процесів засвоєння та перевірки знань часу, який дорівнює очікуваному, будемо мати:

$$K_0 = e^{-1} = 0,37 ; \bar{A} = e^{-1} = 0,37 . \quad (16)$$

Результати оцінки зведені в табл. 1.

**Таблиця 1.** Результати оцінки процесів засвоєння та перевірки знань

Варіант	Параметри етапів $\mathcal{D}_1$	Параметри модуля $\mathcal{D}_1$	Параметри етапів $\mathcal{D}_2$	Параметри модуля $\mathcal{D}_2$	$K_i$	$n_i$	$Z_i$	$\frac{Z - Z_i}{Z} \cdot 100\%$
	$K_{0,\mathcal{D}1} = 0,37$ $\bar{A} = 0,37$	$K_{\mathcal{D}1} = 0,48$ $n_{\mathcal{D}1} = 1,31$	$K_{0,\mathcal{D}2} = 0,37$ $\bar{A}_{\mathcal{D}2} = 0,37$	$K_{\mathcal{D}2} = 0,48$ $n_{\mathcal{D}2} = 1,31$	0,23	2,62	11,40	–
a	$K_{0,\mathcal{D}1} = 0,37$ $\bar{A} = 0,67$	$K_{\mathcal{D}1} = 0,64$ $n_{\mathcal{D}1} = 1,73$			0,31	3,04	9,81	13,95
б	$K_{0,\mathcal{D}1} = 0,67$ $\bar{A} = 0,37$	$K_{\mathcal{D}1} = 0,8$ $n_{\mathcal{D}1} = 1,19$			0,38	2,50	6,57	42,37
в	$K_{0,\mathcal{D}1} = 0,6$ $\bar{A} = 0,37$	$K_{\mathcal{D}1} = 0,7$ $n_{\mathcal{D}1} = 1,17$			0,34	2,48	7,29	36,05
г	$K_{0,\mathcal{D}1} = 0,37$ $\bar{A} = 0,6$	$K_{\mathcal{D}1} = 0,59$ $n_{\mathcal{D}1} = 1,61$			0,28	2,92	10,43	8,51
д	$K_{0,\mathcal{D}1} = 0,6$ $\bar{A} = 0,37$	$K_{\mathcal{D}1} = 0,7$ $n_{\mathcal{D}1} = 1,17$			0,34	2,48	7,29	36,05
е	$K_{0,\mathcal{D}1} = 0,37$ $\bar{A} = 0,6$	$K_{\mathcal{D}1} = 0,59$ $n_{\mathcal{D}1} = 1,61$			0,28	2,92	10,43	8,51

## ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто безліч різних варіантів взаємного впливу суміжних дисциплін у процесі їхнього вивчення. З них виявлені основні, які досить просто реалізуються в системах інформаційної підтримки навчального процесу. Урахування взаємного впливу призводить до одержання позитивних характеристик якості отримання знань, що підтверджується результатами досліджень. Надалі потрібен розгляд даних характеристик з урахуванням множини дисциплін при одержанні однієї зі спеціальностей.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

- Максимович, Г. И. Электронные библиотеки / Максимович Г. И. // Делопроизводство. – 2001. – № 1. – С. 85–89.
- Згуровський, М. З. Основи системного аналізу : підручник для студ. вищ. навч. закл. / М. З. Згуровський, Н. Д. Панкратова. – К. : Видавнича група ВНУ, 2007. – 543 с.
- Биков, В. Ю. Моделі організаційних систем відкритої освіти = Models of the Education Organizational Systems : монографія / В. Ю. Биков. – К. : Атіка, 2009. – 682 с.
- Баркова, О. В. Досвід створення наукової електронної бібліотеки в Національній бібліотеці України імені В.І. Вернадського / О. В. Баркова // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2001. – Т. 3, № 4. – С. 51–62.
- Антопольский, А. Б. Формирование Национальной электронной библиотеки и проблемы выбора базовых принципов организации фонда электронных документов / А. Б. Антопольский

кий, Т. В. Майстрович, А. В. Чугунов // Национальная электронная библиотека : Проекты методических материалов по формированию фонда / Российская государственная библиотека. – С. Пб., 2004. – С. 3–13.

- Киричек, Г. Г. Керування інформаційними потоками на всіх рівнях ієархії отримання знань / Г. Г. Киричек // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1. – С. 70–78.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2011.

Вершина А. И., Киричек Г. Г.  
МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ ОБУЧЕНИЯ

Исследованы разнообразные варианты влияния взаимозависимых дисциплин на процесс получения знаний с целью дальнейшего использования полученных показателей в системе информационной поддержки обучения.

**Ключевые слова:** информационная система, дисциплина, учебный процесс, вероятность, информационный ресурс.

Vershina A. I., Kirichek G. G.  
MODEL SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT FOR LEARNING

Investigated the influence of different variants of interdependent disciplines to the process of acquiring knowledge for future use, the resulting figures in the system of information support of learning.

**Key words:** information system, discipline, learning process, probability, information resource.

УДК 681.5.015:629.7.05

Кулик А. С.<sup>1</sup>, Лученко О. А.<sup>2</sup>, Фирсов С. Н.<sup>3</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор Національного аерокосмічного університета ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»<sup>2</sup>Генеральний директор-Головний конструктор Хартрон-Плант<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент Національного аерокосмічного університета ім. Н. Е. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

# АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ

Представлено унифицированное описание процессов в типовых блоках и в спутниковой системе как процесса развития нештатных ситуаций, так и процесса их парирования. Кроме того, предложена четырехуровневая схема параметризации прямых признаков отказов. Изложены модели и средства восстановления работоспособности спутниковых систем.

**Ключевые слова:** спутниковая система ориентации и стабилизации, избыточность, датчики.

## ВВЕДЕНИЕ

Непрерывное и качественное выполнение полетных заданий малыми космическими аппаратами во многом определяется способностью бортовых управляющих систем, к числу которых относится спутниковые системы ориентации и стабилизации, выполнять целевые функции, как в штатных условиях, так и при возникновении нештатных ситуаций [1].

Нештатная ситуация – это такое состояние функционирования спутниковой системы ориентации и стабилизации (ССОС), когда появляется нерасчетное отклонение характеристик от номинального режима, обусловленного техническим заданием. Причину, приводящую к появлению нештатных ситуаций, называют уже устоявшимся в специальной литературе последних лет обобщенным термином – отказ.

Современные и перспективные требования к локализации нештатных ситуаций ССОС обуславливают поиск новых более эффективных и конструктивных подходов, базирующихся на рациональном парировании посредством минимальных избыточных аппаратных средств и с помощью значительных программных средств восстановления работоспособности отказавших компонент, приборов и гибкого их использования [2]. Многообещающим представляется подход, базирующийся на принципе парирования нештатных ситуаций посредством гибкого управления значительными унифицированными и универсальными избыточными ресурсами восстановления отказавших компонент и всей системы в целом [3]. Это определяет необходимость применения принципиально нового класса ССОС, обладающих способностью в реальном масштабе времени при возникновении нештатных ситуаций «снять» неопределенность по моменту возникновения отказа, его месту появления, классу отказа и конкретного его вида, а затем принять решение, исходя из

имеющихся ресурсных возможностей, по парированию последствий с целью восстановления работоспособности до приемлемых запасов устойчивости и показателей качества, т. е. свойством самоорганизации посредством обеспечения отказоустойчивости [4].

Основой отказоустойчивых ССОС является развитое алгоритмическое обеспечение разрабатываемое на основе совокупности моделей, отражающих информационные аспекты преобразовательных свойств компонент и связей этих систем. Ключевыми математическими моделями, позволяющими формировать процесс разработки, являются диагностические модели, отражающие связь между причиной отказа и ее последствиями. Использование соответствующих диагностических моделей и методов решения последовательности диагностических задач позволяет разработать алгоритмическое обеспечение. Результаты диагностирования позволяют формировать и решать задачи по восстановлению работоспособности аварийного динамического объекта, с помощью соответствующих диагностических моделей и методов.

## 1. ССОС, КАК ОБЪЕКТ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ

С целью формирования основных положений разработки алгоритмического обеспечения отказоустойчивой ССОС, рассмотрим ее обобщенную блок-схему (рис. 1).

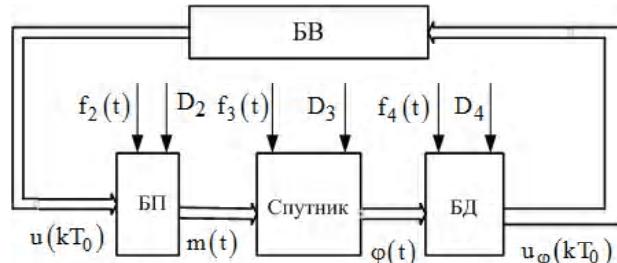


Рис. 1. Блок-схема ССОС

В этой схеме отражены четыре основных функциональных подсистемы, с помощью которых реализуется принцип управления по отклонению для осуществления ориентации и стабилизации спутника.

На функциональную подсистему-спутник действуют управляющие моменты  $m(t)$ , возмущающие воздействия  $f_3(t)$  и виды отказов  $D_3$ . Положение спутника в пространстве характеризуется вектором состояния  $\varphi(t)$ . Подсистема – блок датчиков (БД) преобразует вектор состояния  $\varphi(t)$  в соответствующие дискретные значения вектора измерений  $u_\varphi(kT_0)$ . На БД действуют внешние возмущения  $f_4(t)$  и внутренние  $D_4$ . Измерения  $u_\varphi(kT_0)$  поступают в следующую подсистему – блок вычислителей (БВ), формирующий вектор сигналов управления  $u(kT_0)$ . БВ подвержен действию, как внешних возмущений  $f_1(t)$ , так и внутренних  $D_1$ . Управляющие воздействия в подсистеме блок приводов (БП) преобразуются в вектор управляющих моментов, компенсирующих влияние возмущающих воздействий и управляющих положением спутника в пространстве. Возмущающие воздействия и изменяют функциональные свойства БП.

Как известно, движение спутника относительно центра масс описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений Эйлера в проекциях на оси связанный системы координат [1]. При инженерных исследованиях производят упрощение исходных нелинейных дифференциальных уравнений до линейных.

Для измерения углового положения спутника и угловых скоростей в БД используются астродатчики, гирокопические измерители вектора угловой скорости, инфракрасные измерительные устройства, магнетометры [1, 5]. Преобразовательные особенности типовых БД, используемых на спутниках, могут быть описаны уравнениями первого приближения в форме линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, а также в форме передаточных функций.

Управляющие моменты на спутник формируются с помощью различных активных способов: использования реактивных сил, вращения инерционных масс, размещенных внутри спутника, при помощи гироскопов, использование магнитного поля Земли. Эти способы реализуются в БП с помощью соответствующих приводов: газореактивных и плазменных двигателей, двигателей маховиков, силовых гироскопов и др. [1]. Для инженерных расчетов систем ориентации и стабилизации на практике используются математические модели в форме передаточных функций.

В подсистеме БВ реализуются алгоритмы ориентации и стабилизации спутника. Как правило, это линейные законы управления.

Следовательно, в общем виде можно рассматривать математическую модель любого блока и всей системы в целом как модель динамического объекта в линейном приближении.

С целью обеспечения требуемого периода активного существования ССОС оснащаются избыточным приборным оборудованием и устройствами подстройки, коррекции сигналов и параметров. Для описания таких избыточных структур подсистем использование аппаратов дифференциальных уравнений и передаточных функций приводит к громоздким, трудно обозримым и сложно преобразуемым математическим выражениям. Более того, такие математические средства описывают только управляемые и наблюдаемые состояния объектов исследования. Отказы в подсистемах и системе приводят к появлению в объектах исследования как неуправляемых, так и ненаблюдаемых состояний. Для отражения этих состояний в объектах исследования требуются другие математические средства. Наиболее совершенными математическими конструкциями для описания объектов исследования, как в номинальном, так и возмущенном отказами движении представляются векторно-матричные уравнения в пространстве состояний.

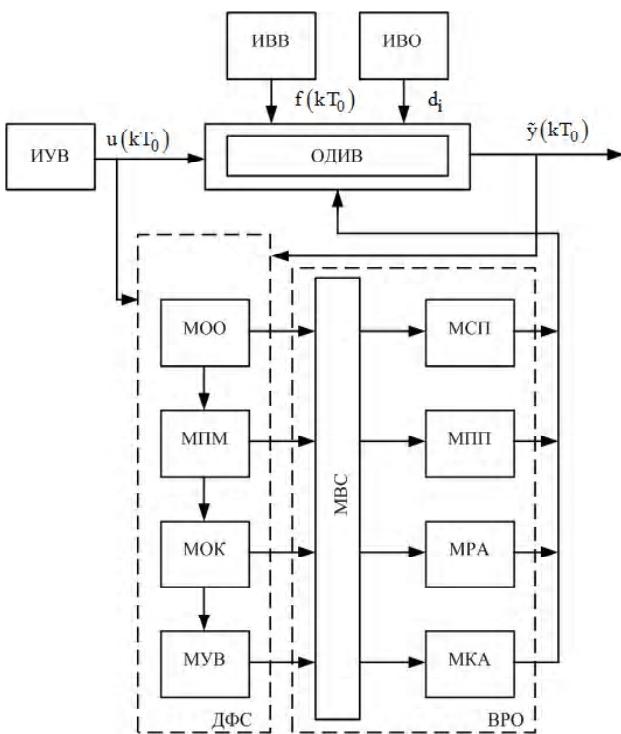
Используя известные методы перехода от непрерывных математических моделей к дискретным, можно представить преобразовательные особенности в номинальном режиме функционирования ССОС в виде обобщенного динамического объекта в форме конечно-разностных уравнений:

$$\begin{aligned}x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k); \\y(k) &= Cx(k) + Du(k); \quad x(k_0) = x_0,\end{aligned}$$

где  $x(k)$  –  $n$ -мерный вектор состояния объекта;  $x(k) \subset X^n$ ;  $u(k)$  –  $n$ -мерный вектор управления;  $u(k) \in U^r$ ;  $y(k)$  –  $m$ -мерный вектор измерений объекта;  $y(k) \in Y^m$ ;  $A, B, C$  и  $D$  – матрицы соответствующих размерностей.

Обобщенная функциональная схема, предлагаемая для разработки отказоустойчивого динамического объекта, к числу которых относится ССОС, с развитыми функциями глубокого диагностирования функционального состояния и гибкого восстановления работоспособности представлена на рис. 2. Принцип действия представленной схемы заключается в следующем. На объект диагностирования и восстановления (ОДИВ) подаются управляющие воздействия  $u(kT_0)$  с помощью имитатора управляющих воздействий (ИУВ), возмущающие воздействия  $f(kT_0)$  с помощью имитатора возмущающих воздействий (ИВВ), виды отказа  $d_i$  посредством имитатора видов отказов (ИВО). Реакция ОДИВ отражается в доступном измерению выходе  $\tilde{y}(kT_0)$ .

Основными функциональными элементами, обеспечивающими диагностирование функционального состояния (ДФС), служат модуль обнаружения отказов (МОО), модуль поиска места (МПМ) отказа, модуль определения класса (МОК) отказа и модуль установления вида (МУВ) отказа. В результате согласованного функционирования этих модулей формируется полный диагноз



**Рис. 2.** Обобщенная функциональная схема отказоустойчивой ССОС

функционального состояния управляемого динамического объекта. Полный диагноз о наличии отказа, его месте в блоке, классе и конкретном виде проявления поступает на модуль выбора средств (МВС) восстановления работоспособности, с помощью которого производится выбор ресурсов восстановления. Наиболее типовые ресурсы в схеме представлены такими модулями: модуль сигнальной подстройки (МСП), модуль параметрической подстройки (МПП), модуль реконфигурации алгоритмов (МРА) и модуль коммутации аппаратуры (МКА). В совокупности эти модули обеспечивают восстановление работоспособности объекта (ВРО). Разработка представленных модулей производится на основе специфических математических моделей, отражающих влияние вида отказа на функциональные свойства объекта. Этот класс моделей назван диагностическими моделями (ДМ).

## **2. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ПРЯМЫХ ПРИЗНАКОВ ОТКАЗОВ ССОС**

Отказ в ССОС рассматривается как событие неопределенное, обусловленное неопределенностью момента его появления, места возникновения, принадлежности к классу и конкретному виду отказа. Для формирования машинных диагностических моделей динамических объектов необходимо каждому прямому признаку отказа поставить в соответствие параметр. Прямые признаки это: 1) признак вида отказа; 2) признак класса отказа; 3) признак места отказа; 4) признак наличия отказа. Для конструктивной параметризации прямых признаков отказов нужно определиться с глубиной диагностирования динамических объектов. Установление глубины диагностирования представляет в теории диагностирования

ния известную задачу, решаемую только на уровне формирования исходных данных для задачи диагностирования. При решении практических задач глубокого диагностирования функционального состояния динамических объектов и гибкого восстановления их работоспособности, другими словами, практических задач активной отказоустойчивости динамических объектов необходимость формирования множества  $D$  (множества физических видов отказов) превращается в актуальную задачу. Суть этой задачи заключается в следующем. С одной стороны, на каждом этапе жизненного цикла спутниковых систем ориентации и стабилизации устанавливается свое конечное множество причин отказов, которые структурируются в иерархическую схему. На основном этапе жизненного цикла – эксплуатации, иерархическая схема причин отказов самая большая по числу элементов и связей и поэтому самая представительная, отражающая предельно-возможную глубину причинно-следственных связей возможных нештатных ситуаций спутниковых систем ориентации и стабилизации.

Рассмотрим примеры анализа причин возможных отказов в гироскопическом датчике угла СГ-3-2Р. На рис. 3 представлено дерево возможных причинно-следственных связей отказа, связанного с дрейфом нуля датчика.

Для конкретного этапа жизненного цикла ССОС и реальных условий количество уровней древовидной схемы будет изменяться. Поэтому представленные схемы событий и связей, раскрывающих причинно-следственную обусловленность нештатных ситуаций – это всего лишь эскиз, показывающий возможность структуризации задачи диагностирования на качественном эвристическом уровне, а также сложность, невозможность полной формализации задачи формирования множества  $D$  на каждом этапе жизненного цикла ССОС.

С другой стороны, парирование нештатных ситуаций на каждом этапе жизненного цикла осуществляется с помощью соответствующих избыточных ресурсов, причем, чем больше избыточных ресурсов, тем выше качество парирования нештатных ситуаций. На практике множество избыточных ресурсов  $R$  ограничено и, более того, один из ведущих принципов главного конструктора миссии – это минимизация расходов и, в частности, избыточных ресурсов. Очевидное противоречие между глубиной диагностирования, косвенной характеристикой которой служит мощность множества  $D$ , и гибкостью восстановления, количественная оценка этого свойства, косвенная, содержится в мощности множества  $R$ , может быть разрешено посредством нахождения компромисса. Формализовать задачу нахождения наилучшего соответствия между множествами  $D$  и  $R$  пока не удается по целому ряду причин. Первая – уникальность космических миссий порождает оригинальность технических решений, для которых построение иерархий причинно-следственных связей, раскрывающих причины возможных нештатных ситуаций превращается в многоразмерную и неразрешимую задачу. Вторая – процедуры диагностирования и восстановления по сути своей

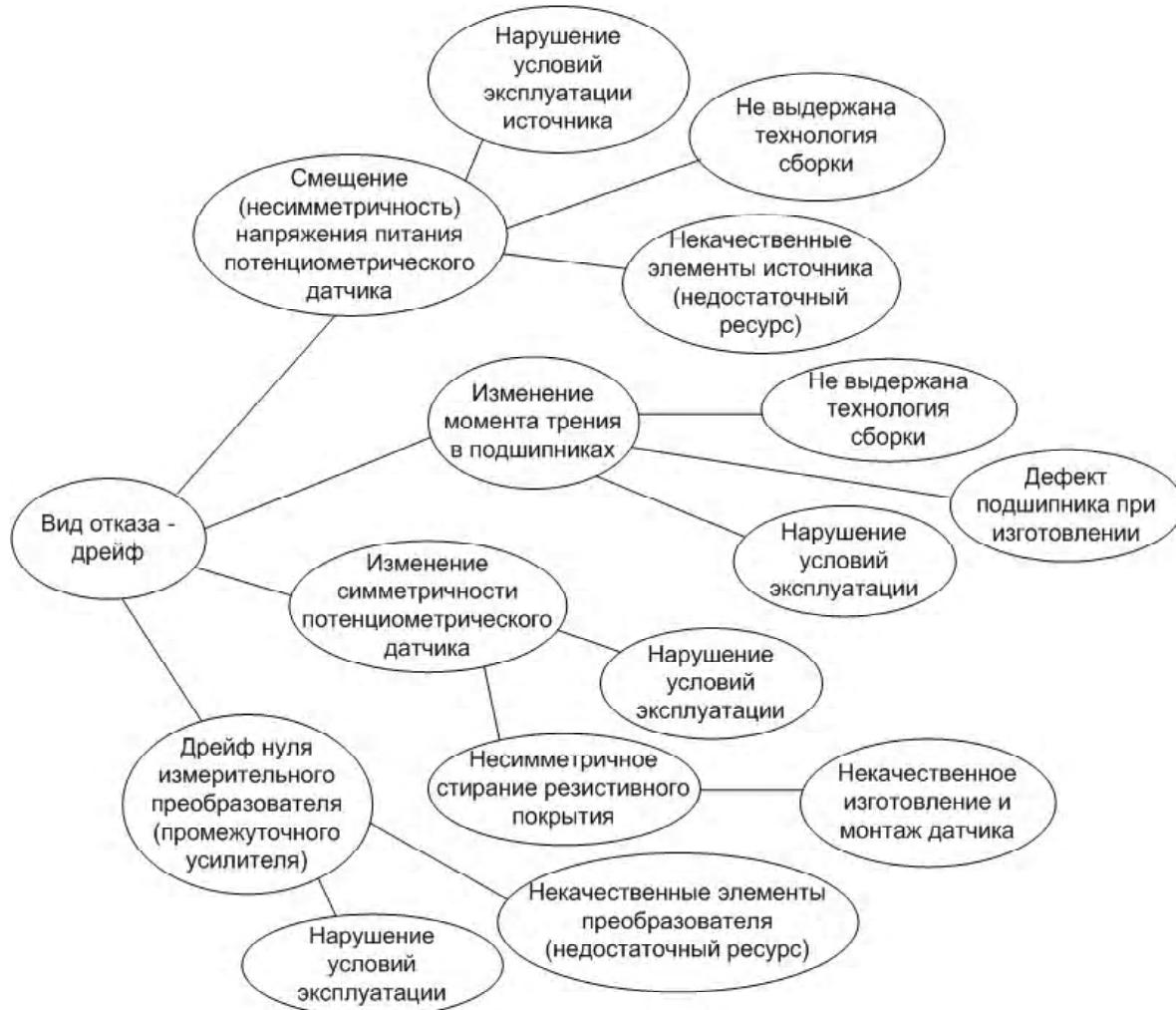


Рис. 3. Дерево возможных причин отказов для класса дрейфов нуля в СГ-3-2Р

изменяющиеся и зависящие от текущей нештатной ситуации, т. е. динамические. Поэтому пока не удается среди известных методов выбора найти метод, базирующийся на принципе динамичности выбора ресурсов. Третья причина обусловлена особенностями реализации процедур диагностирования и восстановления на бортовых вычислительных средствах в условиях жестких ограничений по быстродействию.

Рассмотрим задачу формирования множества  $D$  на основании проведенных исследований. ССОС как объект диагностирования и восстановления характеризуется статическими характеристиками, отражающими преобразовательные свойства в установленных режимах функционирования, а также переходными, отражающими преобразовательные свойства в динамических режимах функционирования. Любые отклонения от допустимых техническим заданием изменений характеристик представляют собой отказы, порождающие нештатные ситуации. Проведенная серия экспериментальных исследований, а также результаты расследования типовых нештатных ситуаций в функционировании ССОС позволили систематизировать различные отклонения в статических характеристиках в соответствующие классы

отказов:  $L = \bigcup_{i=1}^4 L_i$ , где  $L_1$  – класс дрейфов;  $L_2$  – класс изменений коэффициента передачи;  $L_3$  – класс обрывов и  $L_4$  – неизвестный класс. Различные отклонения в переходных характеристиках тоже систематизированы в ряд

классов  $P = \bigcup_{i=1}^4 P_i$ , где  $P_1$  – увеличение инерционности;

$P_2$  – уменьшение запаса устойчивости по амплитуде;  $P_3$  – уменьшение устойчивости по фазе и  $P_4$  – неизвестный класс. Итак, для динамического объекта можно провести по результатам анализа его статических и динамических свойств классификацию возможных отказов по восьми классам: четыре класса для отклонений статических характеристик и четыре класса для отклонений динамических характеристик. Итак, все множество возможных отказов в функционировании динамического объекта может быть

представлено  $K = L \cup P = \bigcup_{i=1}^8 K_i$ . Каждому классу после проведенной классификации ставится в соответствие параметр, характеризующий данный класс и позволяющий отличать этот класс от других, а также доступный вычислению. Самая простая процедура параметризации, когда одному классу соответствует один параметр, т. е.

$K_i \div \alpha_i, i = 1, 8$ . Например, класс дрейфов включает такие виды отказов:  $d_1$  – дрейф положительный компенсируемый;  $d_2$  – дрейф положительный некомпенсируемый;  $d_3$  – дрейф отрицательный компенсируемый;  $d_4$  – дрейф отрицательный некомпенсируемый. Все четыре вида отказов характеризуются параметром смещения статической характеристики по оси ординат  $E_0 \div \alpha_1$ .

Параметризация видов отказов и классов – взаимосвязанные задачи, так как класс формируется из подмножества видов, покрываемых одним параметром, а виды отказов параметризуются в номинальной шкале с помощью интервализации параметра класса, исходя из возможности последующего парирования видов отказа с помощью имеющихся избыточных средств, т. е. исходя из устранимых последствий причин отказов. Конструктивные и функциональные особенности динамического объекта, а также возможности по парированию отказов позволяют перейти к следующему уровню параметризации прямых признаков отказов, а именно к параметризации мест отказа – конструктивно-законченной части объекта, где произошел отказ, и, более того, этот отказ можно парировать на этом уровне: на уровне места. Итак, в результате систематизации классов отказов формируется множество мест отказов  $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ , где  $m_i$  – имя конструктивно законченной части динамического объекта. Параметризация мест отказов заключается в выборе из множества параметров, характеризующих качество функционирования  $m_i$  части объекта, такого одного параметра, который вычисляется по косвенным измерениям в условиях известных ресурсных ограничениях и однозначно характеризует часть объекта  $m_i$ , т. е.  $m_i \div \beta_i$ .

Завершающий уровень параметризации прямых признаков отказов – это формирование параметров, характеризующих факт наличия отказов в динамическом объекте. Предлагаемая параметризация прямых признаков отказов представляет, по сути, иерархическую схему параметризации, которую условно можно отобразить следующей цепочкой  $D \rightarrow P^B \rightarrow P^K \rightarrow P^M \rightarrow P^O$ , где

$P^B = \{p_i^B\}_1^q$  – множество параметров видов отказов и  $p_i^B \div d_i, d_i \in D$ ;  $P^K = \{p_i^K\}_1^l$  – множество параметров классов отказов;  $P^M = \{p_i^M\}_1^s$  – множество параметров мест отказов;  $P^O = \{p_i^O\}_1^n$  – множество параметров, характеризующих появление отказов. Графически принцип иерархической параметризации можно представить схемой, изображенной на рис. 4.

Следует отметить, что множество параметров формируются в разнотипных измерительных шкалах, так множество  $P^B$  формируется в номинальной шкале признаков, а множества  $P^K$ ,  $P^M$  и  $P^O$  – в относительной шкале или других, в зависимости от физических параметров, используемых при построении математических моделей номинального и возмущенного движений динамических объектов.

### 3. ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СОСОС

Для математического описания аварийных, нештатных режимов используют различные ДМ, позволяющие формализовать причинно-следственные связи, формировать подходы к диагностированию функционального состояния и восстановлению работоспособности динамических объектов, оценивать возможность обнаружения отказов, поиска места их возникновения, установления класса. Использование ДМ дает возможность целенаправленно выбирать косвенные диагностические признаки и аналитически формировать алгоритмы решения основных задач диагностирования, а также обоснованно выбирать функциональный критерий отказоустойчивости и произвести синтез алгоритмов восстановления работоспособности. ДМ отражают с помощью различных формальных средств причинно-следственных связей развития нештатных ситуаций. Различают вербальные, графические, математические и машинные ДМ. Построение ДМ является трудоемким итерационным процессом, связанным с многочисленными экспериментально-теоретическими исследованиями и отработками. Методики построения ДМ базируются на методиках пост-

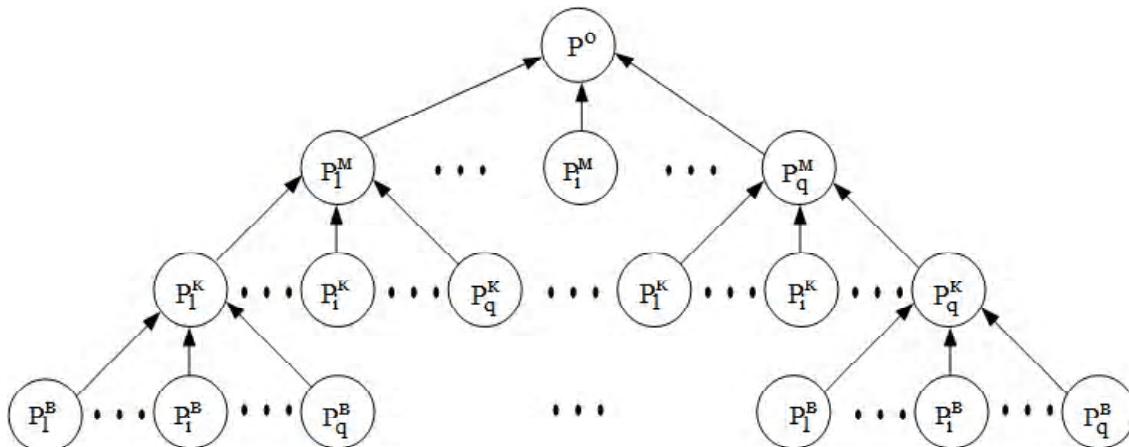


Рис. 4. Иерархическая схема параметризации прямых признаков отказов

роения традиционных управленческих вербальных, графических, математических и машинных моделей функциональных элементов и систем управления. Рассмотрим принципы построения иерархической совокупности квинтэссенции моделирования-машинных диагностических моделей (МДМ). При разработке диагностического обеспечения любого динамического объекта приходится решать следующие основные задачи: 1) обнаружение отказов; 2) поиск места отказа; 3) определение класса. Каждая из этих задач обладает специфичностью, как в постановке, так и в используемых методах решения. В связи с этим при решении каждой задачи используют свой тип МДМ. Причем, эти МДМ связаны между собой в иерархическую структуру, в которой на верхнем уровне находятся МДМ для обнаружения отказов, на среднем уровне располагаются МДМ для поиска места отказа, а на третьем уровне – МДМ для решения задачи определения класса отказа.

Построение иерархии МДМ начинается с моделей третьего уровня. Для этого в соответствии с методологией обеспечения отказоустойчивости изучают в соответствии с первым этапом, объект исследования – динамический объект, затем на втором этапе формируют множество потенциально возможных физических видов отказов. Это множество видов отказов устанавливают в результате исследовательской деятельности, связанной с анализом надежностных характеристик объекта, опыта эксплуатации подобных объектов, возможных ресурсов для восстановления работоспособности и других характеристик. Здесь же выявляют и возможные типы отказов по таким признакам, как степень влияния на работоспособность объекта, характер проявления, связь с другими отказами, частота проявления, характер возникновения. В конечном итоге формируют множество физических видов отказов, по отношению к которым система должна быть отказоустойчивой.

С целью конкретизации изложения особенностей построения иерархии МДМ введем такое обозначение этого множества:  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_q\}$ , где  $d_i$  –  $i$ -й физический вид отказа, например, для блокового уровня – «залипание» измерителя угловой скорости на нуле, дрейф нуля до  $0,1^\circ$ ; поломка внешних элементов конструкции спутника; уменьшение управляющих моментов двигателей маховиков на 10 % и ряд других.

Рассмотрим особенности формирования уравнений МДМ для задачи определения класса отказов. Классы возможных видов отказов формируются в результате параметризации элементов множества  $D$ . Параметризация означает, что элементу или группе элементов ставится в соответствие параметр, характеризующий соответствующий физический вид отказа, или несколько видов, описанных вербально. Итак, на практике для большинства динамических объектов  $\exists d_i, d_i \in D$  можно выбрать параметр, характеризующий целый класс видов отказов. Например, для акселерометров – это параметр, характеризующий дрейфы: положительные, отрицательные, компенсируемые и некомпенсируемые.

Следовательно, в результате параметризации формируются множество параметров классов:  $\mathcal{A} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\eta\}, \forall \alpha_i \in [\alpha_i]$ , где  $[\alpha_i]$  – вещественное интервальное число;  $\eta \leq q$ . На всех этапах проектирования ССОС для описания номинальных, штатных режимов функционирования агрегатов, приборов, блоков и всей системы в целом используют линеаризованные математические модели [1]. Подобное описание применимо и для нештатных режимов, вызванных видами отказов множества  $D$ . Представим возмущенное движение динамического объекта в канонической наблюдаемой форме с помощью следующей машинной системы уравнений:

$$\begin{aligned}\tilde{x}(k+1) &= \tilde{A}_1 \tilde{x}(k) + \tilde{B}_1 u(k); \\ \tilde{y}(k) &= C_1 \tilde{x}(k) + \tilde{D}_1 u(k); \quad \tilde{x}(k_0) = \tilde{x}_0,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $\tilde{x}(k)$  –  $v_1$ -мерный вектор состояния аварийного динамического объекта,  $\tilde{x}(k) \in X^{v_1}$ ;  $u(k)$  –  $v_2$ -мерный вектор управляющих воздействий,  $u(k) \in U^{v_2}$ ;  $y(k)$  –  $v_3$ -мерный вектор измерений,  $\tilde{y}(k) \in Y^{v_3}$ ;  $\tilde{A}_1, \tilde{B}_1, C_1$  и  $\tilde{D}_1$  – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей.

МДМ ML-модель для  $i$ -го класса отказов описывается в виде:

$$\begin{aligned}\Delta x(k+1) &= G_i \Delta x(k) + [A_{a_i} \hat{x}(k) + B_{a_i} u(k)] \Delta \alpha_i; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + [D_{a_i} u(k) + F_{a_i}] \Delta \alpha_i; \\ \Delta x(k_0) &= \tilde{x}_0,\end{aligned}$$

где  $\Delta x(k) = \tilde{x}(k) - \hat{x}(k)$ ,  $\hat{x}(k)$  – оценочное значение вектора состояния, полученное с помощью фильтра Люенбергера;  $A_{a_i}, B_{a_i}, D_{a_i}, F_{a_i}$  – матрицы чувствительности по параметру  $\alpha_i$ ;  $\Delta \alpha_i = \alpha_i - \alpha_{ih}$ ,  $\alpha_{ih}$  – номинальное значение параметра класса.

Для решения последующих задач диагностического обеспечения процедура для классов отказов повторяется.

Полученные значения матриц  $A$ ,  $B$ , и  $C$ , а также данные входа  $u(k)$  и выхода  $\tilde{y}(k)$  аварийного объекта используются для воспроизведения текущих значений оценки  $\hat{y}(k)$  с помощью фильтра Люенбергера. Затем, имитируют в реальном, полунаатурном или машинном объекте проявление физических видов отказов из множества  $D$  и полученные значения сигналов обрабатываются по следующему правилу:

$$\Delta y(k) = \tilde{y}(k) - \hat{y}(k), \quad \forall k, k \in T;$$

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{при } \sum_k |\Delta y_j(k)| \geq \delta_{j0} \\ 0 & \text{при } \sum_k |\Delta y_j(k)| < \delta_{j0}; \quad \forall k \in T; j = \overline{1, m}, \end{cases}$$

где  $T$  – множество дискретных значений моментов времени, соответствующих интервалу наблюдения;  $\Delta y_j(k)$  –

величина  $j$ -ї координати вектора  $\Delta y(k)$ ;  $\delta_{j0}$  – порогове значення допустимого изменения  $j$ -ї координати.

Полученные значения переменной  $s_{ij}$  позволяют отобразить результаты исследований с помощью таблицы влияния отказов (ТОВ), представляющей собой наиболее распространенную разновидность логических диагностических моделей (ЛДМ). ТОВ формируется как для тестового режима функционирования объекта, когда подаются специально организованные управляющие воздействия  $u(k)$ , так и для функционального режима при подаче рабочих воздействий  $u(k)$ .

ЛДМ используют аналогичным образом для определения оптимальной совокупности признаков при решении и других основных задач диагностирования: поиска места отказа, определение класса отказа и установления вида отказа. Это дает возможность уменьшить сложность алгоритмического обеспечения диагностирования и как следствие, повысить оперативность получаемого диагноза, что принципиально важно для активного отказоустойчивого управления в реальном масштабе времени.

Работоспособность динамического объекта характеризуется выполнением ряда требований, например, по запасам устойчивости, времени переходного процесса, точности и др. Отказ в объекте приводит к нарушению его работоспособности. Для обеспечения отказоустойчивости динамический объект должен обладать способностью восстанавливать свою работоспособность при появлении отказов из заданного множества. Восстановить работоспособность означает в буквальном смысле «вернуть» характеристики в диапазоны, соответствующие нормальному функционированию объекта, посредством сигнальной или параметрической подстроек, замены полностью отказавших элементов исправными, использования вместо сигналов отказавших датчиков, восстановленных по показаниям других датчиков, оценочных значений, перехода на другие алгоритмы управления, применение других избыточных ресурсов.

Описанные структуры МДМ могут быть применены для решения задач по восстановлению работоспособности. Рассмотрим для ССОС возможность использования МДМ для обнаружения отказов. Предположим, что в объекте произошел отказ и этот отказ диагностирован. Пусть эта аномалия характеризуется параметром  $\gamma_i$ , тогда машинная диагностическая ML-модель описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= G\Delta x(k) + A\gamma_i \hat{x}(k)\Delta\gamma_i + \\ &+ B\gamma_i u(k)\Delta\gamma_i; \\ \Delta y(k) &= C\Delta x(k); \Delta x(k_0) = \tilde{x}_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Преобразуем уравнения (1) к виду

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= CG\Delta x(k) + \\ &+ C[A\gamma_i, B\gamma_i] [\hat{x}(k) \ u(k)]^T \Delta\gamma_i. \end{aligned}$$

В силу того, что матрица  $G$  может быть выбрана диагональной с одинаковыми собственными значениями, а матрица  $C$  в канонической наблюдаемой форме имеет коэффициенты 0 или 1, первое слагаемое можно представить в такой форме:  $G'\Delta y(k)$ , где  $G'$  – диагональная матрица с теми же собственными значениями, но  $\dim G' = (m \times m)$ . Во втором слагаемом обозначим матрицу  $C[A\gamma_i \ B\gamma_i] = L\gamma_i$  и введем вектор сигналов  $\vartheta_{\gamma_i}^T(k) = [\hat{x}(k) \ u(k)]$ . Тогда с учетом новых обозначений

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= G'\Delta y(k) + L\gamma_i J_{\gamma_i} \Delta\gamma_i; \\ \Delta y(k_0) &= \tilde{y}_0. \end{aligned} \quad (2)$$

По сути, уравнение (2) описывает отклонения возмущенного движения объекта относительно эталонного поведения, воспроизводимого фильтром Люенбергера. Возмущенное движение вызвано отказом, характеризуемым  $\Delta\gamma_i$ . Возмущающее воздействие на объект в данном случае описывается произведением  $\vartheta_{\gamma_i}(k)\Delta\gamma_i$ . Матрица  $L\gamma_i$  определяет направления передачи и величину возмущающего воздействия. Матрица  $G'$  характеризует собственную динамику процесса получения отклонений возмущенного движения. В терминах этой модели задача восстановления работоспособности объекта состоит в том, чтобы устранить отклонение  $\Delta y(k)$ , т. е. обеспечить выполнение условия  $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta y(k) = 0$ . С точки зрения теории устойчивости динамических управляемых объектов выполнение такого условия означает асимптотическую устойчивость движения скорректированного объекта относительно его эталонной модели.

Для устранения отклонения  $\Delta y(k)$ , вызванного возмущением  $\vartheta_{\gamma_i}(k)\Delta\gamma_i$ , требуется соответствующие устройства автоматической стабилизации, выполняющие сигнальную, параметрическую подстройки или реконфигурацию структуры на основании отклонения  $\Delta y(k)$ . В общем случае контур такого восстановления работоспособности описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= G'\Delta y(k) + L\gamma_i F[\delta(k)]; \\ \delta(k+1) &= \delta(k) + \psi(k)T_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $F[\cdot]$  – вектор нелинейных функций устройства стабилизации;  $\delta(k)$  – вектор управляющих воздействий стабилизатора;  $\psi(k)$  – вектор формирования управляющих воздействий;  $T_0$  – период квантования.

Вектор  $F[\cdot]$  отражает ограниченные возможности восстановления и описывает функции соответствующих устройств.

При использовании сигнальной подстройки для восстановления работоспособности функция  $F[\cdot]$  описы-

ває алгоритм устройства, генерирующего дополнительный сигнал к управляющему воздействию  $u(k)$ . При параметрической подстройке функция  $F[\cdot]$  описывает закон изменения подстраиваемого параметра. Если выполняется реконфигурация алгоритмов или аппаратуры, то  $F[\cdot]$  описывает функции соответствующих коммутаторов, отключающих отказавшие элементы и подключающих резервные. При использовании уравнений (3) для формирования управляющих воздействий  $\delta(k)$  в целях обеспечения асимптотического убывания к нулю вектора отклонений  $\Delta y(k)$  наиболее приемлемы методы синтеза с помощью функций А. М. Ляпунова.

Таким образом, более физично и целесообразно для синтеза контуров восстановления работоспособности динамических объектов, а также для оценки качества функционирования отказоустойчивого объекта использовать критерий в форме функций Ляпунова

$$\begin{aligned} V[\Delta y(k)] &= \Delta y^T(k) Q \Delta y(k); \\ V[\Delta y(k)] &= \|\Delta y(k)\|, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $Q$  – симметричная, положительная матрица;  $\|\Delta y(k)\|$  – норма вектора  $\Delta y(k)$ .

Эти функции по сути своей характеризуют устойчивость динамического объекта к сигнальным и параметрическим возмущениям, вызванным действием видов отказов. В связи с этим функции Ляпунова можно использовать в качестве критериев функциональной отказоустойчивости, как блоков, так и всей ССОС в целом.

#### 4. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МОДУЛЕЙ ДФС

С помощью МДМ можно разрабатывать алгоритмы модулей (рис. 1) для определения таких характеристик ССОС как момент появления отказа, его место, класс и конкретный физический вид, т. е. полный диагноз. В обобщенном виде классы МДМ можно описать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta x(k+1) &= G \Delta x(k) + \\ &+ [A \hat{x}(k) + B u(k)] \Delta \lambda; \\ \Delta y(k) &= C \Delta x(k) + [D u(k) + F] \Delta \lambda; \\ x(k) &= \tilde{x}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\lambda_i \in \{\alpha_i, \beta_i, \gamma_i\}$ ,  $i=1, \pi$  и  $\lambda_i$  – обобщенный прямой диагностический признак отказа.

Решение обратной задачи для системы уравнений (5) в общем случае не представляется возможным в силу трудности обращения прямоугольных матриц, так как  $\dim C = m \times n$ , а  $m < n$  или  $m > n$ . В частном случае, когда  $\dim C = n \times n$ , т. е. вектор состояния полностью измеряется это возможно. Как показали исследования на конкретных диагностических объектах, в этом нет практичес-

кой необходимости. Более простой и эффективный путь определения оценочных значений прямого признака  $\Delta \lambda_i$  базируется на таком обстоятельстве. Уравнение в системе (5) векторно-матричное, а параметр  $\Delta \lambda_i$  – скалярный. В векторном уравнении состояния  $n$  скалярных уравнений, так как  $\dim x(k) = n$ , а в векторном уравнении выхода, в силу того, что  $\dim y(k) = m$ , будет  $m$  скалярных уравнений. Таким образом, в сумме получается  $n+m$  скалярных уравнений, связывающих сигналы с неизвестным прямым признаком  $\Delta \lambda_i$ . Поэтому существует принципиальная возможность из всей совокупности линейных скалярных уравнений выбрать такие самые простые по структуре, которые позволяют получить разрешение относительно неизвестного параметра  $\Delta \lambda_i$ . Выбор более простых по структуре уравнений позволяет минимизировать количество вычислительных операций в алгоритме получения  $\Delta \lambda_i$ , а следовательно, способствует повышению оперативности получения диагноза и уменьшению вычислительных ресурсов.

При решении основных задач диагностирования динамического объекта нужно учитывать следующее. При установлении факта отказа, поиске его места и определении класса (рис. 5) используется дихотомическое дерево, представляющее собой продукционную базу знаний процесса диагностирования. В узлах такого дерева используются предикатные конструкции двузначного типа

$$\begin{aligned} z &= s_2 \left\{ f[\Delta y(k)] - \delta \right\} = \\ &= \begin{cases} 1, & \text{если } f[\cdot] \geq \delta; \\ 0 & \text{если } f[\cdot] < \delta; \forall k \in T, \end{cases} \end{aligned}$$

где  $\delta$  – пороговое значение;  $f[\Delta y_i(k)]$  – нелинейная функция от компонент вектора измерений  $\Delta y(k)$ .

В качестве аргументов двузначного предиката используются дискретные значения отклонения измерений выходных сигналов динамического объекта, размещенные в векторе  $\Delta y(k)$ , функциональная связь этих измерений, а также пороговое значение, определяющее допустимое изменение функции  $f[\cdot]$ . Нелинейная функция  $f[\cdot]$  формируется с помощью МДМ, связывающей конкретный для каждой основной задачи диагностирования прямой признак  $\Delta \lambda_i$  с косвенным – результатами вычисления  $\Delta y(k)$ .

Координация функционирования модулей производится с помощью соответствующих процедур, зависящих от организации вычислительного процесса в блоках и во всей спутниковой системе ориентации и стабилизации в целом.

#### 5. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МВР

Для успешного восстановления работоспособности динамического объекта в конструкции должны быть избыточные средства, такие как: а) дополнительные сигнальные входы; б) средства параметрической подстройки; в) избыточные приборы, агрегаты, устройства;



Рис. 5. Схема разработки алгоритмического обеспечения модуля ДФС

г) дополнительные алгоритмы и программы; д) другие средства. Формирование структуры алгоритмического обеспечения модулей целесообразно проводить с использованием МДМ для обнаружения отказов. Система уравнений (3) описывает возмущенное отказом движение динамического объекта с управляемым воздействием интегрального типа. Для описания особенностей синтеза алгоритмов управления перечисленными избыточными средствами используем более общий тип уравнения – пропорциональный и тогда уравнение возмущенного отказом движения примет такой вид

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= G'\Delta y(k) + L_{\gamma_i}\psi(k); \\ \Delta y(k_0) &= \tilde{y}_0. \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом таких, более простых для последующего изложения обозначений  $G' = R$ ,  $L_{\gamma_i} = T$  представим уравнение так

$$\begin{aligned} \Delta y(k+1) &= R\Delta u(k) + T\psi(k); \\ \Delta y(k_0) &= \tilde{y}_0, \quad \Delta y(k) \in \Omega, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Omega$  – множество точек связанной конечной области пространства состояния, содержащее в себе начало координат и некоторую ее конечную окрестность.

Управляющее воздействие  $\psi(k)$  определим с помощью дискретного аналога второго метода А. М. Ляпунова, позволяющего получить условия асимптотической устойчивости в некоторой области или в целом при появлении соответствующих используемым резервным средствам, физических видов отказов. Второй метод Ляпунова, как известно, заключается в формировании специальной вспомогательной скалярной функции, называемой функцией Ляпунова  $V[\Delta y(k)]$ , и исследовании ее свойств, а также свойств ее первой разности  $\Delta V[k, k+1]$ , определенной вдоль траектории уравнения (6).

Функция  $V[\Delta y(k)]$  называется определенной положительной в области  $\Omega$ , если всюду в этой области, кроме точки начала координат, выполняется неравенство  $V[\Delta y(k)] > 0$ . При выполнении неравенства  $V[\cdot] < 0$  функцию называют определенно отрицательной. В общем, такие функции называются знакоопределенными. Приведем основные результаты теории устойчивости, используемые в дальнейшем изложении.

Линейная система, описываемая дискретным уравнением (6) асимптотически устойчива, когда все корни  $\sigma_i$  (характеристические числа) матрицы  $R$  лежат внутри круга единичного радиуса, т. е.  $|\sigma_i| < 1$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Если для системы (6) в области  $\Omega$  существует определенно положительная функция  $V[\Delta y(k)]$ , первая разность которой  $\Delta V[k, k+1]$ , вычисленная в силу системы (6), будет определено отрицательной, то положение равновесия будет асимптотически устойчивым, т. е.  $\lim_{k \rightarrow \infty} \Delta y(k) = \infty$ .

Рассмотрим метод получения достаточных условий компенсации отклонений  $\Delta y(k)$ , вызванных физическими видами отказов, а также алгоритмов восстановления работоспособности с помощью аппарата функций Ляпунова. Качество компенсации видов отказов или восстановления работоспособности будет оцениваться с помощью функции вида

$$V[\Delta y(k)] = \Delta y^T(k) Q \Delta y(k), \quad (7)$$

где  $Q = Q^T > 0$ . Такая функция определенно положительная в области  $\Omega$ , следовательно, удовлетворяет требованиям функций Ляпунова.

Первую разность функции Ляпунова  $\Delta V[k, k+1] = V[\Delta y(k+1)] - V[\Delta y(k)]$  определим с использованием уравнения (6), в результате получим:

$$\Delta V[k, k+1] = \Delta y^T(k) [R^T QR - Q] \Delta y(k) + \\ + 2\Delta y^T(k) R^T QM\psi(k) + \psi^T(k) M^T QM\psi(k). \quad (8)$$

Компенсирующее воздействие  $\psi(k)$  выберем из условия обеспечения в области  $\Omega$  для конечной разности  $\Delta V[k, k+1]$  выполнения следующего неравенства  $\Delta V[k, k+1] < 0$ , т. е. условия определенной отрицательности функции. Функция (8) будет определено отрицательной при выполнении таких условий:

$$1. R^T QR - Q = -P, \text{ где } P = P^T > 0. \quad (9)$$

$$2. 2\Delta y^T(k) R^T QM\psi(k) + \\ + \psi^T(k) M^T QM\psi(k) = 0. \quad (10)$$

Первое условие можно выполнить, если задать матрицу  $P$  как квадратную диагональную и положительную. Тогда из матричного равенства (9) вычисляют матрицу  $Q$ , удовлетворяющую требованию  $Q = Q^T > 0$ . Выполнение второго условия (10) связано с выбором вектора компенсирующего воздействия  $\psi(k)$ , обеспечивающего нулевое значение суммы двух слагаемых в области  $\Omega$ . Преобразуем равенство (10)

$$[2\Delta y^T(k) R^T QM + \psi^T(k) M^T QM]\psi(k) = 0. \quad (11)$$

Из (11) следуют два условия:

$$1. \psi(k) = 0; \\ 2. \psi^T(k) = -2\Delta y^T(k) R^T QM \left[ M^T QM \right]^{-1}. \quad (12)$$

Первое решение – тривиальное и не применимо для компенсации последствий отказа. Второе решение представляет собой алгоритм формирования векторного компенсирующего воздействия, обеспечивающего асимптотическую устойчивость относительно значения  $\Delta y(k) = 0$  в области  $\Omega$ . Другими словами, алгоритм (12) обеспечивает компенсацию последствий физического вида отказа, т. е. восстановление работоспособности динамического объекта.

Убедиться в свойствах компенсирующего воздействия можно путем подстановки выражения для вектора  $\psi(k)$  в систему (6). Для большей наглядности рассмотрим частный случай, когда компенсирующее воздействие скалярное, тогда  $M=m$  и после соответствующих преобразований получаем, что

$$\Delta y(k+1) = \left[ R - 2 \frac{mm^T QR}{m^T Qm} \right] \Delta y(k). \quad (13)$$

Далее, если вектор  $t$  имеет  $m$  ненулевые компоненты, а матрица  $R = \delta I$ , причем  $|\delta| < 1$ , т. е. корни матрицы лежат внутри единичного круга, тогда все корни новой матрицы кроме  $m$ -го будут равны  $-\delta$ , а  $m$ -й корень равен  $\delta$ . Так как  $\delta$  ограничен по модулю, то все корни лежат внутри единичного круга, а следовательно, такая система асимптотически устойчива.

Произвольность в выборе структуры функций Ляпунова позволяет получать различные алгоритмы восстановления работоспособности динамического объекта, отличающиеся структурой и качественными показателями динамики компенсации последствий действий физических видов отказов. С целью унификации разработки алгоритмического обеспечения модулей восстановления работоспособности динамических объектов разработан подход, систематизирующий необходимые этапы и их взаимосвязь. На рис. 6 этот подход представлен графической схемой.

Приведенная схема представляет собой эскиз структуризации способа решения задачи разработки алгоритмического обеспечения. При решении конкретных задач эта схема дополнится специфическими для каждого

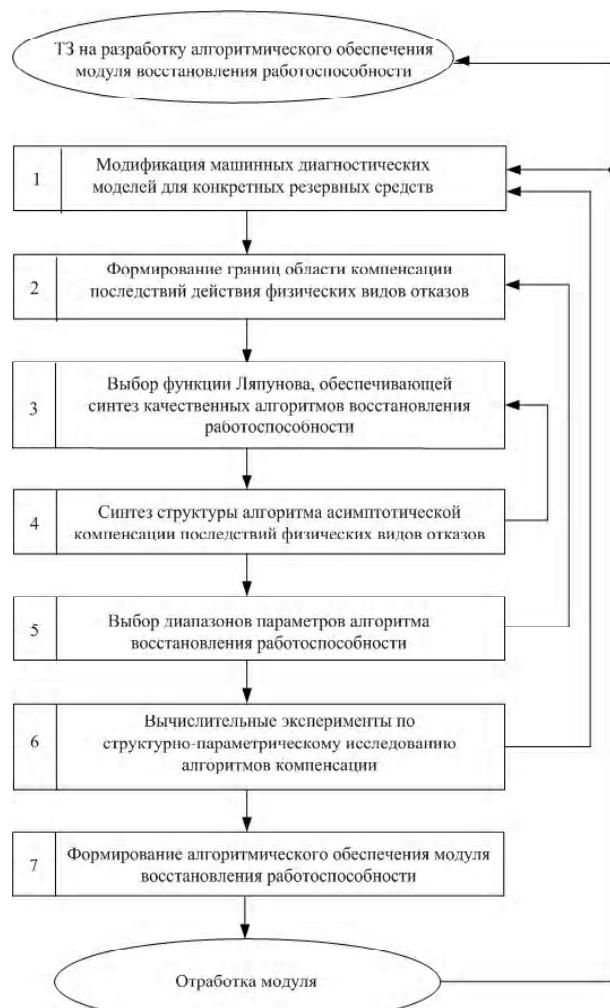


Рис. 6. Схема разработки алгоритмического обеспечения МВР

используемого резервного средства этапами и соответствующими связями, но предложенная схема будет ядром этой новой структуризации.

Этапы в приведенной схеме представлены как самостоятельные задачи, при решении которых используются соответствующие модели и методы их использования. Ряд этих задач в более общей постановке и методы их решения описаны в известных работах, задачи этапов 1, 2, 5, 6 и 7 – это новые специфические задачи, методы решения которых базируются на использовании модифицированных МДМ.

Предложенная схема разработки позволяет упорядочить технологию разработки достаточно нового алгоритмического обеспечения для модулей, производящих восстановление работоспособности динамических объектов в нештатных ситуациях, посредством более гибкого и эффективного использования бортовых избыточных ресурсов. Благодаря результатам автономного глубокого диагностирования в реальном масштабе времени.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования введено понятие и предложено математическое описание динамического объекта диагностирования и восстановления работоспособности, позволяющие унифицировано и адекватно описывать в типовых блоках и в спутниковой системе как процесс развития нештатных ситуаций, так и процесс их парирования. Кроме того, предложена четырехуровневая схема параметризации прямых признаков отказов, позволившая структурировать процедуры формирования прямых признаков видов отказа, их классов, мест и факта появления отказов в динамических объектах, а также представлен класс ДФМ и класс ЛФМ, связывающих прямые диагностические признаки с косвенными.

Сведена разработка диагностического обеспечения к разработке алгоритмического обеспечения типового модуля ДФС. Изложены модели и средства восстановления работоспособности ССОС с помощью модифицированных диагностических моделей и с использованием второго метода А.М. Ляпунова. Сформирована схема разработки алгоритмического обеспечения типового МВР ССОС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальная отработка систем управления объектов ракетно-космической техники [Текст] : учеб. пособие

- / А. И. Батырев, Б. И. Батырев, Г. К. Бандарец и др. ; под общ. ред. Ю. М. Златкина, В. С. Кривцова, А. С. Кулика, В. И. Чумаченко. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. Ин-т», НПП «Хартон-Аркос», 2008. – 501 с.
2. Бровкин, А. Г. Бортовые системы управления космическими аппаратами [Текст]: Учебные пособия / А. Г. Бровкин, Б. Г. Бурдычов, С. В. Гордийко и др. ; под ред. А. С. Сырова – М. МАИ С. В-ПРИНТ, 2010. – 340 с.
3. Кулик, А. С. Концепция обеспечения живучести спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией [Текст] / А. С. Кулик, О. А. Лученко, С. Н. Фирсов // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2011. – №2 (25). – С. 41–47.
4. Кулик, А. С. Содержание задач по обеспечению отказустойчивости, решаемых в процессе разработки системы управления угловым движением космического летательного аппарата [Текст] / А. С. Кулик, О. А. Лученко, О. И. Гавриленко // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2005. – № 1 (13). – С.154–161.
5. Кулик, А. С. Сигнально-параметрическое диагностирование систем управления [Текст] / А. С. Кулик. – Х. : Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ»; Бизнес Информ, 2000. – 260 с.

Стаття надійшла до редакції 22.02.2012.

Кулік А. С., Лученко О. О., Фірсов С. М.

АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОДУЛІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ СУПТНИКОВОЇ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ ТА СТАБІЛІЗАЦІЇ

Наведено уніфікований опис процесів в типових блоках та в спутникової системі, як процесів розвитку позаштатних ситуацій, так і процесів їхнього відбивання. Крім того запропонована чотирирівнева схема відбивання прямих ознак відмов. Представлені моделі та засоби відновлення працездатності спутниківих систем.

**Ключові слова:** спутникова система орієнтації та стабілізації, надмірність, датчик.

Kulik A. S., Luchenko O. O., Firsov S. N.

ALGORITHMIC SOFTWARE OF DIAGNOSE AND SERVICEABILITY OF ATTITUDE AND STABILIZATION SATELLITE SYSTEM RESTORATION MODULES

Unified description of the processes in the model blocks and the satellite system as a process of development of abnormal situations and process of its parry is presented. In addition, four-level scheme of parameterization of the direct criterion of failure is offered. Models and tools of satellite systems serviceability restoration are presented.

**Key words:** attitude and stabilization satellite system, redundancy, sensors.

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор Харківського національного університету радіоелектроніки

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, ведучий науковий співробітник Харківського національного університету радіоелектроніки

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ СИСТЕМНИХ ВИМОГ ДО РІШЕННЯ МАРКЕТИНГОВИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У даний роботі розроблено метод оцінки системних вимог до рішення маркетингових задач для проектування маркетингових інформаційних систем.

**Ключові слова:** маркетингова інформаційна система, інформаційний простір, системні вимоги, багатомірний інформаційний метапростір.

### ВСТУП

У роботі [1] пропонується геометрична інтерпретація процесу розробки програмних систем (*ПС*) у якості деякої траекторії, послідовно побудованої у трьох тримірних підпросторах. При цьому сама *ПС* розглядається у вигляді сукупності таких складових як структури даних, методи і інформаційні технології для їх реалізації. Але у цій моделі також абсолютно не враховується часовий чинник у розвитку архітектури *ПС*, що не дозволяє прослідкувати характер змін до системних вимог до моделі *ПС* у міру їх розвитку. У роботі [2] зроблена спроба, в якій обговорюються проблеми трасування вимог до *ПС* для рішення задач планування і проведення реєнжінірингу. Для цього графік «траси вимог» до *ПС* будеться у 3-х мірному просторі: «Архітектура *ПС* – Середовище функціонування – Час». Проте, при цьому у [2] не приводиться ніяких міркувань щодо того, як детальніше визначити вимірювання відповідних проекцій цього інформаційного простору (*ІП*), не задані які-небудь його метрики і тому подібне, і це, на наш погляд, не дозволяє реально використовувати це уявлення для дослідження істотних характеристик маркетингових *ПС* у процесі їх проектування і еволюційного розвитку.

У [3] сформульовані концептуальні положення щодо загальної структури і функціональних вимог, які висуваються до інтегрованого модельно-технологічного інструментарію (*ІМТ*) для проектування інформаційних систем, і, в першу чергу, на основі загальної схеми управління системними вимогами (*СВ*), а також метафори багатомірного інформаційного метапростору (*БІМП*), розробляються моделі, інформаційні проекції і процедури у вигляді доменних моделей онтологій інформаційних систем. Багатомірний інформаційний метапростір і ті окремі інформаційні проекції (*ІПр*) [4], що входять до його складу, необхідно розглядати як структури, які базуються на знаннях предметної області та для опису яких можуть бути використані такі абстракції інформаційного моделювання як: продукційні системи, семантичні мережі, фрейми [5], розширені концептуальні моделі даних *EER*, *EER+* і модель *HERM* [6]. Компоненти *БІМП*

визначаються наступною концепцією: 1) простір *П1* – це простір станів системних вимог до рішення маркетингових задач (*СВРМЗ*), призначений для управління процесами збору, оцінки і обробки інформації про системні вимоги, які повинні бути виконані у процесі автоматизації маркетингових задач при проектуванні і супроводженні маркетингової інформаційної системи; 2) простір *П2* – це простір пошуку проектних рішень (*ПР*); 3) простір *П3* – це простір формування і застосування моделей оцінки (*МО*) характеристик проектних рішень, що отримуються; 4) простір *П4* – це простір розробки доменної моделі (*ДМ*) предметної області (*ПрО*) об'єкту маркетингу, і одночасно – простір для моделювання різних варіантів еталонної архітектури (*ЕА*).

Розробка маркетингових інформаційних систем передбачає перехід від макропроектування (інфологічного проектування), на якому визначаються цілі, функції, структура, необхідні матеріальні, фінансові і трудові ресурси, до етапу фізичного мікропроектування, що має на увазі розробку усіх забезпечуючих елементів системи. Таким чином виникає загальна проблема узгодження всіх елементів *МІС*, що розробляється у процесі проектування: формування цілі системи, визначення системних вимог до рішення маркетингових задач на підприємстві. На основі цього розробляється функціональна структура та інформаційна модель системи, а також математичне забезпечення, алгоритмічне забезпечення, програмне забезпечення, технічне забезпечення та інше. Специфіка створення *МІС* полягає в тому, що на різних етапах маркетингового планування проектування елементів забезпечень при впровадженні всієї системи може корегуватися до 70 % функцій тобто системних вимог, які автоматизуються.

У зв'язку з цим формування комплексу системних вимог до рішення маркетингових задач на будь-якому підприємстві є визначальною операцією, оскільки зміна навіть декількох системних вимог приводить до необхідності повернення процесу проектування на початковий етап, що вимагає додаткових матеріальних і трудових витрат, а отже збільшення термінів проектування.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Концептуальна складність і багатомірність системних вимог і обумовлює деякі кризисні явища, котрі з'явились у теорії і практиці розробки інформаційних технологій і програмного забезпечення.

Для визначення компонентів БІМП логічним завданням подальшої розробки інформаційних проекцій є: а) розробка методу оцінки системних вимог до рішення маркетингових задач у просторі  $P1$ ; б) розробка комплексу методів проектування фазових траекторій у цьому просторі.

У наслідок ітераційного характеру розробки окремих елементів МІС більшість методик застосовуються впродовж визначення системних вимог, котрі передбачають використання понять: «повнота специфікації маркетингових задач», «ступінь формалізації маркетингових задач», «міра узгодженості маркетингових задач», які забезпечують формалізацію процедур визначення вимог та опису постановки задач і їх фіксацію у проектних документах у зручній формі для фахівця-маркетолога. У цьому випадку є можливість контролю правильності сформульованих маркетингових рішень і представлення системних вимог у проекті майбутньої системи у багатомірному просторі з осями: «повнота специфікації – міра узгодженості»; «міра узгодженості – ступінь формалізації» та «ступінь формалізації – повнота специфікації», що забезпечує розробнику та аналітику-маркетологу можливість виявлення і усунення помилок у проекті, які неможливо виявити при традиційному підході.

**Мета роботи:** розробка методу оцінки системних вимог до рішення маркетингових задач для проектування маркетингових інформаційних систем.

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ЕКСПЕРТНОЇ ОЦІНКИ СИСТЕМНИХ ВИМОГ ДО РІШЕННЯ МАРКЕТИНГОВИХ ЗАДАЧ У ПРОСТОРІ $P1$

Структура простору  $P1$  представляє собою середовище, в якому розглядаються фазові траекторії змін стану окремих СВРМЗ (або деякої сукупності СВРМЗ), які повинні бути виконані у процесі розробки і / або супроводі відповідної МІС.

Загальна модель процесу проектування у просторі  $P1$  припускає, що кожна СВРМЗ є, по суті, альтернативою, яку можна описати за допомогою критеріїв системних вимог:  $K_1$  – повнота специфікації,  $K_2$  – ступінь формалізації,  $K_3$  – міра узгодженості. Оскільки значення цих критеріїв визначаються неточно, тоді простір  $P1$  є

нечітка множина і задається за допомогою теорії нечітких множин, як підмножина декартового множення відповідних лінгвістичних змінних ( $LZ$ ). Відповідно до загального визначення  $LZ$  [7] у просторі  $P1$ , кожен з критеріїв  $K_1$ ,  $K_2$  і  $K_3$  задається як кортеж виду:

$$K_i = \langle \beta, T, X, G, \mu \rangle, \quad (1)$$

де  $K_i$  – критерій,  $i = \overline{1,3}$ ;  $\beta$  – ім'я  $LZ$ ;  $T$  – терм-множина нечітких значень  $LZ$ ;  $X$  – універсальна множина їх базових змінних, які визначають  $LZ$ ;  $G$  – множина синтаксичних правил за якими визначаються елементи множини  $T$ : вони можуть бути і пустими, тобто  $G=0$ ;  $\mu$  – функція принадлежності ( $\Phi P$ ), яка ставить у відповідність кожному значенню базової змінної число в інтервалі  $[0, 1]$ , що визначає ступінь сумісності цього значення з елементами множини  $T$  (нечіткими обмеженнями).

На підставі цього визначення початкові критерії  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  задаються у просторі  $P1$  наступними  $LZ$ : 1) критерій  $K_1$ :  $\beta_1$  = «Повнота специфікації»;  $T1$  = ««початкова», «часткова», «повна»»;  $X = [0,1]$ ;  $\Phi P$  для даного критерію  $\mu_{K_1}(X)$  показана на рис. 1. 2) критерій  $K_2$ :  $\beta_2$  = «Ступінь формалізації»;  $T2$  = ««неформально», «напівформально», «формально»»;  $X = [0,1]$ ;  $\Phi P \mu_{K_2}(X)$  має вигляд, аналогічний показаному на рис. 1. 3) критерій  $K_3$ :  $\beta_3$  = «Міра узгодженості»;  $T3$  = ««неузгоджено», «скориговано», «узгоджено»»;  $X = [0,1]$ ;  $\Phi P \mu_{K_3}(X)$  також може бути представлена у вигляді, аналогічному  $\Phi P$  на рис. 1.

При такому представлений критеріїв  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  у початковому просторі  $P1$  утворюється підпростір альтернатив  $A \subseteq K_1 \times K_2 \times K_3$  і при цьому  $A \subset P1$ . Кожна точка  $a_i \in A$  є альтернативою оцінкою стану деякої СВРМЗ, які виражені трьома нечіткими значеннями з відповідних критеріїв  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ . При виконанні деякого проекту кожне його СВРМЗ еволюціонує в часі і проходить ряд проміжних полігань в підпросторі  $A$ , тим самим утворюючи деяку фазову траекторію даного СВРМЗ у  $A$ . Потрібно відзначити, що через вибір виду  $\Phi P$  для нечітких змінних весь підпростір  $A$ , а також і будь-яка його область, є опукла нормальна нечітка множина альтернативних значень СВРМЗ.

Виходячи з емпіричних міркувань про характер альтернативних значень оцінки стану СВРМЗ у процесі проектування, можна стверджувати, що у підпросторі  $A$  існують 4 області, котрі відповідають певним типам значень (станів) деяких СВРМЗ  $a_i \in A$ , а саме:

$$\left. \begin{array}{l} - A^{(0)} \subset A \text{ – область невизначених значень оцінок СВРМЗ;} \\ - A^{(1)} \text{ – область ефективних значень оцінок СВРМЗ, і при цьому } A^{(1)} \cap A^{(0)} = 0; \\ - A^{(2)} \text{ – область допустимих значень оцінок СВРМЗ, при цьому } (A^{(2)} \subset A^{(1)}) \text{ і } A^{(2)} \neq 0; \\ - A^{(3)} = A \setminus (A^{(0)} \cup A^{(1)}) \text{ область слабо-певних значень СВРМЗ.} \end{array} \right\} \quad (2)$$

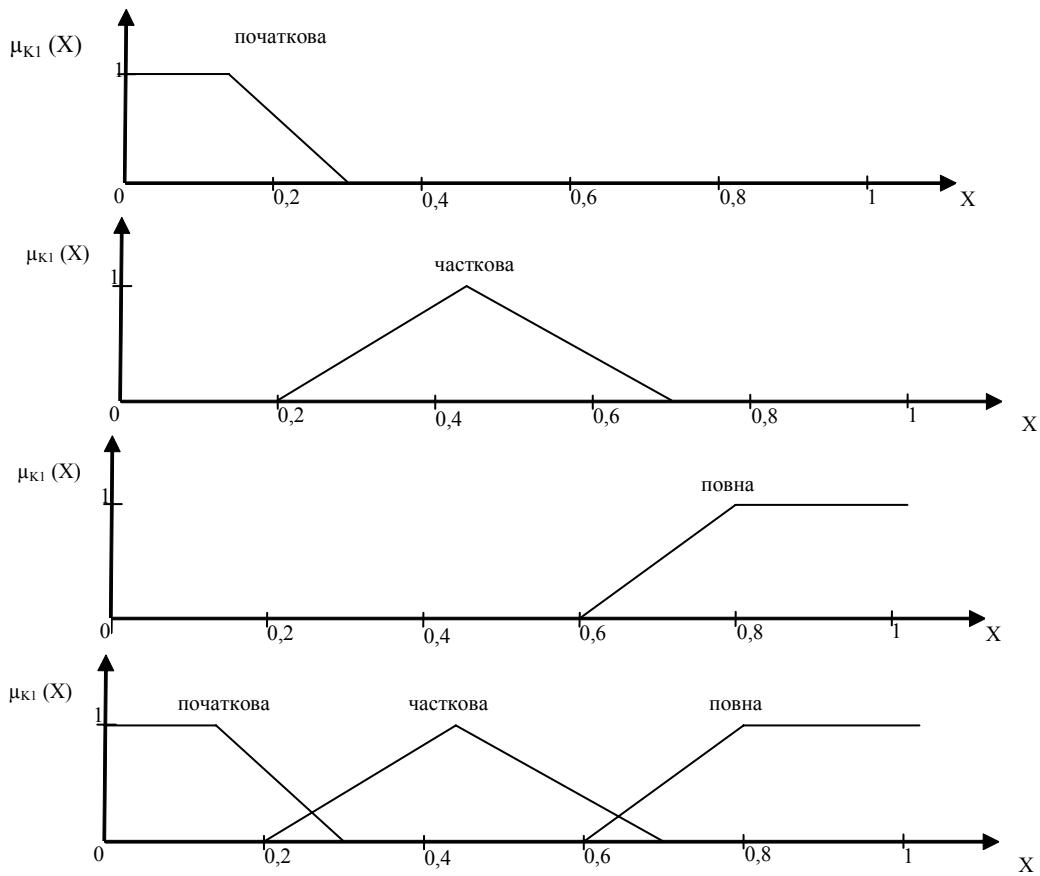


Рис. 1. Функції приналежності для лінгвістичної змінної «Повнота специфікації»

З (2) видно, що будь-яке допустиме рішення є також і ефективним, оскільки  $(A^{(2)} \subset A^{(1)})$ . Тоді геометрична інтерпретація підпростору альтернативних оцінок *CBPM3* може бути представлена у вигляді, показаному на рис. 2. Будь-яке альтернативне значення оцінки *CBPM3* у про-

цесі виконання проекту представляється точкою в одній з областей (2) підпростору  $A \subset \Pi_1$ .

Оскільки кожна така область випукла, то з геометричних міркувань ясно, що існують 4 граничних, якісно різних значень стану деякої *CBPM3*, які відповідають у просторі  $A$  наступним точками:

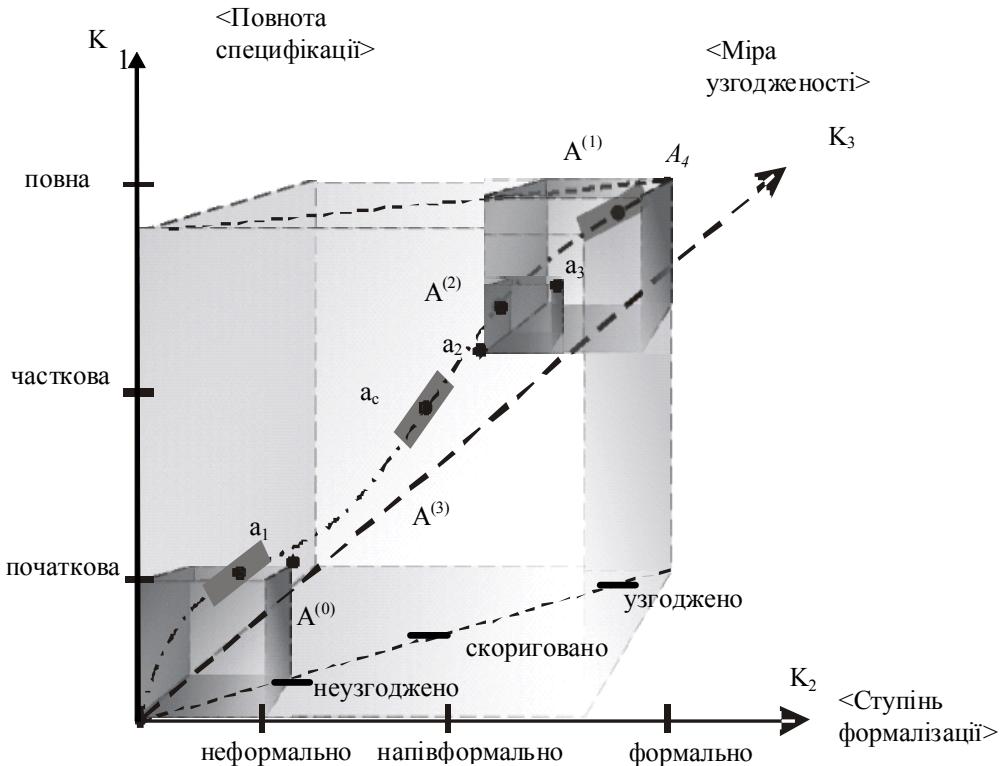
$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \sup(A^{(0)}) - \text{верхня гранична точка області } A^{(0)}; \\ a_2 &= \inf(A^{(1)}) = \inf(A^{(2)}) - \text{нижня гранична точка області } A^{(1)} \text{ і } A^{(2)}; \\ a_3 &= \sup(A^{(2)}) - \text{верхня гранична точка області } A^{(2)}; \\ a_4 &= \sup(A^{(1)}) - \text{верхня гранична точка області } A^{(1)}, \text{ яка належить межі усього простору } A. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Важатимемо, що на множині альтернатив у підпросторі  $A$  можна ввести відношення переваги, тобто  $a_1 \prec a_2 \prec a_3 \prec a_4$  [8]. Нехай  $a_C$  – деяке довільне значення альтернативної оцінки певної *CBPM3* у підпросторі  $A$ . Тоді для управління рухом цієї *CBPM3* по її фазовій траекторії необхідно розробити механізм визначення належності даної *CBPM3* до однієї з областей  $A^{(0)} - A^{(1)}$ . Розглянемо нову ЛЗ, що задається як:  $\beta = \langle \text{«Оцінка поточного стану } CBPM3 \rangle; T = \langle \text{«невизначено», «слабовизначено», «визначено», «виконано»} \rangle; X = [0,1] \text{ – універсальна множина базових змінних, яка є підмножиною значень (деяких точок) у просторі } A, \text{ тобто } R(X) \subseteq A$ .

При таких допущеннях про механізми оцінки різних альтернатив, не втрачаючи спільноті, можливо ввести до розгляду наступну таблицю критеріальних оцінок для *CBPM3*  $a_1, a_2, a_3, a_4, a_c^{(k)}$ , де  $a_1, a_2, a_3, a_4$  – граничні точки у просторі  $A$ , а  $a_c^{(k)}$   $k = \overline{1,3}$  – деякі довільні альтернативи *CBPM3*, що підлягають оцінці (див. табл. 1), де представлені як якісні оцінки критеріїв так і їхні кількісні значення.

Для вирішення сформульованої вище проблеми удосконалюємо евристичний метод порівняння нечітких оцінок *CBPM3* у підпросторі  $A$ :

– **на 1 етапі** – для кожного критерію  $K_i$  визначимо відповідну ЛЗ і задану  $\Phi\Pi$ , експертним шляхом – див. рис. 1;

Рис. 2. Геометрична інтерпретація підпростору альтернатив у  $P1$ 

Таблиця 1. Критеріальні оцінки

	Критерій		$K_1$	$K_2$		$K_3$		
	1	$a_1$	0–0,3	початкова	0–0,3	неформально	0–0,3	неузгоджено
Альтернатива	2	$a_2$	0,2–0,7	часткова	0,2–0,7	напівформально	0,2–0,7	скориговано
	3	$a_3$	0,2–0,7	часткова	0,6–1,0	формально	0,2–0,7	скориговано
	4	$a_4$	0,6–1,0	повна	0,6–1,0	формально	0,6–1,0	узгоджено
	5	$a_c^{(1)}$	0–0,3	початкова	0,2–0,7	напівформально	0,6–1,0	узгоджено
	6	$a_c^{(2)}$	0–0,3	початкова	0,2–0,7	напівформально	0,2–0,7	скориговано
	7	$a_c^{(3)}$	0,2–0,7	часткова	0,6–1,0	формально	0–0,3	неузгоджено

– на 2 етапі – визначасмо за кожним з критеріїв  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$  альтернативні оцінки стану СВРМЗ:  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_c^{(k)}$  і які задаємо за допомогою значень ЛЗ  $R_i^{(j)}$ , де  $i$  – номер СВРМЗ,  $j$  – номер критерію за котрим оцінюється СВРМЗ. Ступінь важливості критеріїв  $K_i$ , задаються також значенням відповідної ЛЗ, котра позначається як  $W_j$ . Відповідно до цього підходу, перший критерій  $K_1$  визнаємо як  $W_1$  = «важливий», другий  $K_2$  – як  $W_2$  = «достаньо важливий», третій – як  $W_3$  = «дуже важливий»;

– на 3 етапі – обчислюємо інтегральну оцінку кожної альтернативи. Оскільки альтернатива  $a_i$  оцінюється за трьома критеріями за допомогою значень ЛЗ, яка має ФП трапецієподібного вигляду, то зважена оцінка  $a_i^{\Sigma}$  альтернативи  $a_i$  за усіма критеріями може бути знайдена шляхом

знаходження лівої  $a_i'$  і правої  $a_i''$  межі підстави трапеції;  $a_i^*$  – лівої і  $a_i^{**}$  правої межі верхньої підстави трапеції.

Ці значення знаходимо за математичними моделями альтернативної оцінки системних вимог вигляду [1]:

$$a_i' = \sum_{j=1}^3 W_j R_i^{(j)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (4)$$

$$a_i^* = \sum_{j=1}^3 W_j^* R_i^{*(j)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

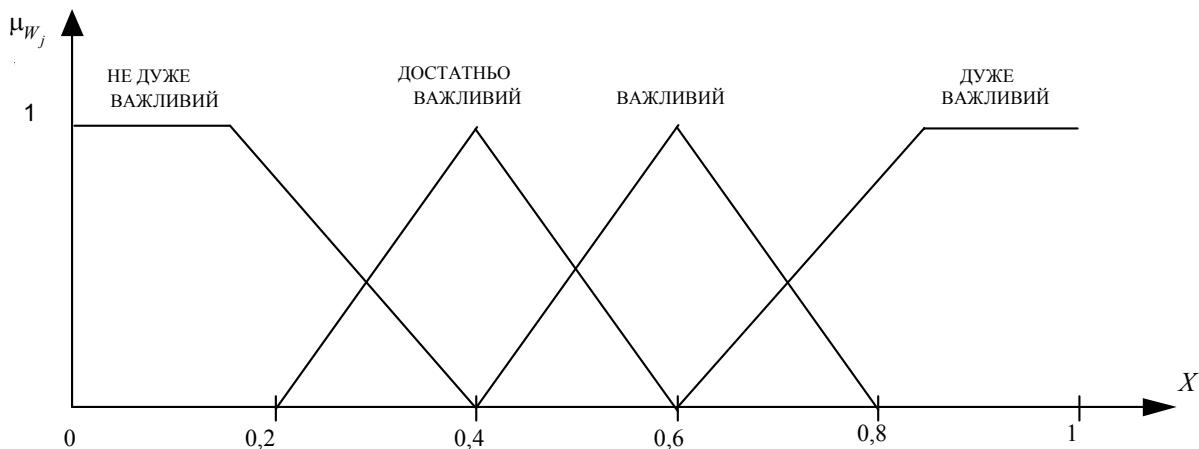


Рис. 3. Функція приналежності для значення лінгвістичної змінної «Важливість критерію оцінки СВРМЗ» інтегральної оцінки кожної альтернативи

$$a_i^{**} = \sum_{j=1}^3 W_j^{**} R_i^{*(j)}, \quad i = \overline{1, n}; \quad (6)$$

$$a_i'' = \sum_{j=1}^3 W_j'' R_i^{''(j)}, \quad i = \overline{1, n}, \quad (7)$$

де  $n$  – загальна кількість альтернатив, для яких знаходить-ся інтегральна оцінка;  $R_i^{(j)}$  – значення лівої межі нижньої підстави трапеції, тобто значення ЛЗ, що задається для альтернативи  $a_i$  за критерієм  $K_i$ ;  $R_i^{*(j)}$  – значення лівої межі верхньої підстави трапеції, тобто значення ЛЗ, що задається для альтернативи  $a_i$  за критерієм  $K_i$ ;  $R_i^{''(j)}$  – значення правої межі верхньої підстави трапеції, тобто значення ЛЗ, що задається для альтернативи  $a_i$  за критерієм  $K_i$ ;  $W_j'$  – значення лівої межі нижньої підстави трапеції, тобто значення ЛЗ, що задається для оцінки критерію  $W_j$ ;  $W_j^*$  – значення лівої межі верхньої підстави трапеції, тобто значення ЛЗ, що задається для оцінки критерію  $W_j$ ;  $W_j^{**}$  – значення правої межі верхньої підстави трапеції, тобто значення ЛЗ, що задається для оцінки критерію  $W_j$ ;  $W_j''$  – значення правої межі нижньої підстави трапеції, тобто значення ЛЗ, що задається для оцінки критерію  $W_j$ .

Відповідно до математичних моделей (4)–(7) і враховуючи вид  $\Phi\pi$ , представлених на рис. 1 і 3, знаходимо наступні значення поточних альтернативних оцінок:

$$a_1^\Sigma a_1' = 0 \cdot 0,4 + 0 \cdot 0,6 + 0 \cdot 0,8 = 0,$$

$$a_1^* = 0 \cdot 0,6 + 0 \cdot 0,4 + 0 \cdot 0,8 = 0,$$

$$a_1^{**} = 0,1 \cdot 0,6 + 0,1 \cdot 0,4 + 0,15 \cdot 1 = 0,25,$$

$$a_1'' = 0,3 \cdot 0,8 + 0,3 \cdot 0,6 + 0,3 \cdot 1 = 0,72,$$

$$a_2^\Sigma a_2' = 0,21, a_2^* = 0,75, a_2^{**} = 0,83, a_2'' = 1,61,$$

$$a_3^\Sigma a_3' = 0,32, a_3^* = 0,91, a_3^{**} = 1,07, a_3'' = 1,76,$$

$$a_4^\Sigma a_4' = 0,6 \cdot 0,4 + 0,6 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot 0,6 = 0,66,$$

$$a_4^* = 0,8 \cdot 0,6 + 0,8 \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 0,8 = 1,44,$$

$$a_4^{**} = 1 \cdot 0,6 + 1 \cdot 0,4 + 1 \cdot 1 = 2,$$

$$a_4'' = 1 \cdot 0,8 + 1 \cdot 0,6 + 1 \cdot 1 = 2,4,$$

$$a_5^\Sigma a_5' = 0,31, a_5^* = 0,8, a_5^{**} = 1,22, a_5'' = 1,69,$$

$$a_6^\Sigma a_6' = 0,13, a_6^* = 0,48, a_6^{**} = 0,62, a_6'' = 1,29,$$

$$a_7^\Sigma a_7' = 0,2, a_7^* = 0,59, a_7^{**} = 0,82, a_7'' = 1,46.$$

Після того, як інтегральні оцінки  $a_i^\Sigma$  знайдено за виразами (8), необхідно порівняти відповідні альтернативи оцінок СВРМЗ. Для цього вводиться нечітка множина  $I$ , яка задана на множині альтернатив  $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$ , і значення відповідної  $\Phi\pi$  інтерпретується як характеристика ступеня того, наскільки оцінка альтернативи СВРМЗ  $a_i$  є країшою, ніж оцінки альтернативи СВРМЗ  $a_4$ , і це значення дорівнює ординаті точки перетину зваженої оцінки альтернативи і оцінки якнайкраїшої альтернативи  $a_4$ . Геометрично це добре видно з графіків функцій на рис. 4.

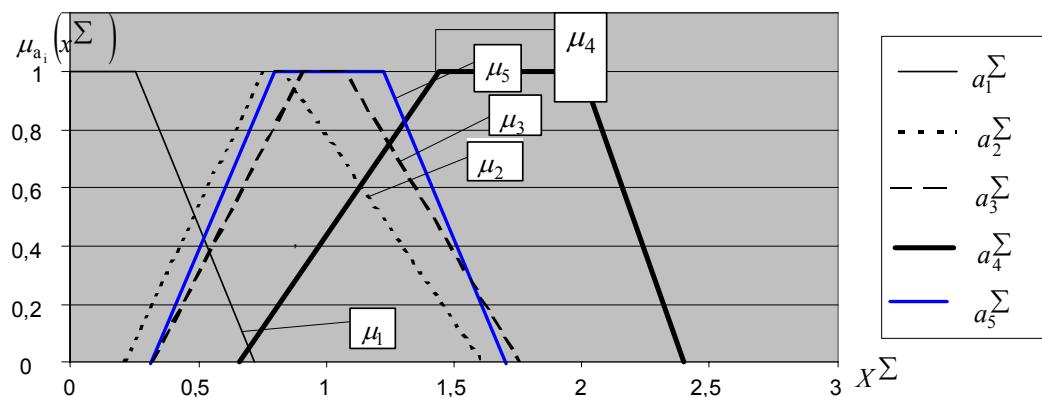


Рис. 4. Порівняння різних альтернатив оцінки системних вимог у просторі  $P1$

Аналітично відповідні значення  $m_i$  обчислюємо за математичною моделлю [11]:

$$\mu_i = \sup_{x \geq y} \min (\mu_i(x), \mu_{a_4}(y)) \quad i = \overline{1, n} \quad x, y \in X^\Sigma \quad (9)$$

Результати розрахунку математичної моделі (9) приймають наступні значення:

$$\mu_1=0,06; \mu_2=0,6; \mu_3=0,74; \mu_4=1; \mu_5=0,82; \mu_6=0,44; \mu_7=0,56.$$

– на 4 етапі – характеризуємо розрахунки за моделлю (9) значення  $m_i$ , відстань кожного стану  $CBPMZ$   $a_i$  від стану, коли  $CBPMZ$  не визначені (це область  $A^{(0)}$  рис. 2). Таким чином, ці значення  $m_i$  визначають розташування граничних точок  $a_1, a_2, a_3, a_4$  на новому універсумі значень базової множини для ЛЗ «Оцінка поточного стану  $CBPMZ$ ».

– на 5 етапі – на основі результатів, отриманих на етапах 1–4 даного методу, для цієї ЛЗ «Оцінка поточного стану  $CBPMZ$ » будуємо відповідну  $\Phi P$ . Для цього доцільно вибрати  $P$  – подібну функцію, оскільки існуючі евристики рекомендують саме такий тип  $\Phi P$  для вирішення подібного класу задач [9–10].

Таким чином, за допомогою даного методу коректно вирішено поставлену задачу: для будь-якого поточного значення альтернативної нечіткої оцінки деяких  $CBPMZ$  можливе визначення їх положення щодо інтервалів (областей), заданих у просторі  $P1$ .

## ВИСНОВКИ

Уперше запропоновано метод альтернативної оцінки системних вимог до рішення маркетингових задач для проектування маркетингових інформаційних систем, який на відміну від існуючих оптимізаційних моделей, які визначають мінімізацію фінансових і матеріальних витрат поряд з максимізацією функцій системи, дозволяють коректно і ефективно розраховувати системні вимоги у просторово-траекторному підході для МІС у відповідності до потреб підприємства.

Удосконалено метод порівняння нечітких оцінок системних вимог до рішення маркетингових задач у інформаційному середовищі 3-х мірного простору, який на

відміну від моделей лінійного програмування, дозволяє визначити фазову траєкторію стану окремих  $CBPMZ$  (або деякої сукупності  $CBPMZ$ ) за допомогою апарату нечітких множин і лінгвістичних змін.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ward, J. Strategic planning for information systems / Ward J. – Wiley, 1997. – 586 pp.
2. Neumoin, V. Software Requirements Traceability in Reengineering Perspective / V. Neumoin // Проблемы программирования. – 2002. – № 1–2. – С. 91–97.
3. Бахманн, П. Программные системы : пер. с нем. / П. Бахманн. – М. : Финансы и Статистика, 1981. – 287 с.
4. Левікін, В. М. Розробка просторово-траекторного підходу для проектування маркетингових інформаційних систем / Левікін В. М., Костенко О. П. // Сьома дистанційна науково-практична конференція за міжнародною участю «системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика». СППР-2011». Червень, 2011 р., Україна, м. Київ. – С. 50–53.
5. Брябрин, В. М. Ф-язык: формализм для представления знаний в интеллектуальной диалоговой системе / В. М. Брябрин // Прикладная информатика. Сб. статей. – М. : Финансы и статистика, 1981. – С. 73–103.
6. Крег, Л. Применение UML и шаблонов проектирования : пер. с англ. / Л. Крег. – М. : Вильямс. – 2001. – 396 с.
7. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений /Л. А. Заде. – М. : Мир, 1976. – 363 с.
8. Модели принятия решений на основе лингвистической переменной / [Борисов А. Н., Алексеев А. В., Крумберг О. А. и др.]. – Рига, 1982. – 256 с.
9. Леоненков, А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – С. Пб. : БХВ-Петербург, 2003. – 719 с.
10. Андерсон Джордж В., SAP за 24 години : пер. з англ / Д. В. Андерсон, Д. Ларокка ; за наук. ред. Б. М. Коцоського. – Дніпропетровськ: Баланс Бізнес Букс, 2007. – 432 с.

Стаття надійшла до редакції 30.08.2011.

Після доробки 17.02.2012.

Левицін В. М., Костенко А. П., Петриченко А. В.

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ СИСТЕМНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К РЕШЕНИЮ МАРКЕТИНГОВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В данной работе разработан метод оценки системных требований к решению маркетинговых задач для проектирования маркетинговых информационных систем.

**Ключевые слова:** маркетинговая информационная система, информационное пространство, системные требования, многомерный информационный метапространство.

Levykin V. M., Kostenko O. P., Petrichenko O. V.

METHOD DEVELOPMENT FOR SYSTEM DEMANDS ASSESSMENT TO THE DECISION OF MARKETING TASKS FOR INFORMATION SYSTEMS PROJECTING

In this work the method of estimation of system requirements to the decision of marketing tasks are developed for planning of the marketings informative systems.

**Key words:** marketing informative system, informative space, system requirements, metaphoric multidimensional information meta-space.

УДК 681.3:378.146

Різун Н. О.<sup>1</sup>, Тараненко Ю. К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Дніпропетровського університету економіки та права ім. А. Нобеля

<sup>2</sup>Д-р. техн. наук, старший науковий співробітник Дніпропетровського університету економіки та права ім. А. Нобеля

## МОБІЛЬНА СИСТЕМА КОМП'ЮТЕРНОГО ТЕСТУВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ ВНЗ

Запропоновано мобільну систему комп'ютерного тестування, яка дозволяє інтенсифікувати навчальний процес завдяки забезпеченням мобільності, економічності та конфіденційності тестового контролю шляхом використання технології короткочасного сеансу бездротового зв'язку з сервером, що розміщений у Internet-мережі та зберігає базу тестових завдань та засоби ідентифікації результатів тестування.

**Ключові слова:** мобільна система, навчальний процес, тестовий сеанс, бездротовий зв'язок.

### ВСТУП. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вищий навчальний заклад – це одна з найважливіших складних соціально-економічних систем суспільства, що створює специфічний інтелектуальний ресурс, який інвестується в усі галузі народного господарства. У сучасній освіті сьогодні відбуваються кардинальні зміни, а саме – інтеграція Болонського процесу в систему освіти України, та, у зв'язку з цим – зміна освітянських парадигм, впровадження особистісно-орієнтованого підходу до навчання, моделей розвиваючих педагогічних. З іншого боку, ці зміни супроводжуються стрімкою інформатизацією суспільства та зростанням потреб й вимог народного господарства у дипломованих спеціалістах якісно нового рівня кваліфікації та безперечно високої конкурентоспроможності. Все це виводить на перший план проблеми вдосконалення методів, організації, форм і засобів навчання, і, найголовніше, методології контролю та оцінки якості навчальних досягнень та технології оперативної та ефективної корекції навчального процесу.

Тестова форма комп'ютерного контролю знань є однією з найактуальніших сучасних методологічних прийомів інтенсифікації процесу навчання та технологічних засобів ефективної організації зворотного зв'язку системи із об'єктом керування. Комплексне використання тестування у якості інструменту безперервного моніторингу та контрольного оцінювання знань, допоміжного інноваційного підходу до навчання та самонавчання, стимулюючого та організуючого фактору будування продуктивної траєкторії навчального процесу є однією з головних парадигм реорганізації сучасної освіти України

[1]. Тому пошук ефективних шляхів розробки та втілення у навчальний процес прогресивних інформаційних систем комп'ютерного тестування, що призначенні для інтенсивного інтерактивного управління навчальним процесом, представляє собою важливу наукову проблему.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ПУБЛІКАЦІЙ

На сучасному етапі розвитку інформаційних та телекомуникаційних технологій ринок програмних продуктів у галузі освітянських послуг заповнений різноманітними пропозиціями систем комп'ютерного тестування, але більшість з них мають характерні недоліки [2, 3, 4], а саме:

- орієнтація на конкретну вузьку групу дисциплін, для яких може використовуватися тестова оболонка;
- надмірна універсальність та «передвантаженість» програмами методиками та моделями, які практично не застосовуються більшістю викладачів;
- недотримання технологічних стандартів програмування, що значно перешкоджає подальшому розвитку програм;
- жорсткі обмеження до необхідного програмного забезпечення та технічних характеристик (зокрема, потужності) комп'ютерів, на яких повинні розгорнатися інформаційні системи тестування;
- високі вимоги до швидкості та часу використання ресурсів Internet [5, 6].

Виходячи з цих недоліків, а також згідно з поставленими президентом України задачами щодо інноваційного розвитку освіти, підвищення її якості та доступності, а також інтеграції в Європейський освітній простір шля-

хом впровадження у учбово-виховний процес інформаційно-комунікаційних технологій та розробки національної системи моніторингу рівня якості освіти, з одного боку, та реаліями аналізу сучасного стану парку комп’ютерів більшості ВНЗ України, з іншого, у якості основних технологічних принципів організації систем комп’ютерного тестування на сучасному етапі пропонуються наступні (табл. 1).

З урахуванням наведених принципів, **метою статті є інтенсифікація навчального процесу шляхом підвищення ступеню мобільності, економічності (ефективності) та конфіденційності уніфікованої системи комп’ютерного тестування, що пропонується авторами.**

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мобільна система комп’ютерного тестування передбачає реалізацію наступних технологічних та методологічних рішень:

1. Використання у якості технічних засобів проведення тестового контролю знань портативні персональні комп’ютери викладача (ППКВ) та студента (ППКС), причому комп’ютер викладача обов’язково додатково повинен бути забезпечений засобом для зв’язку з Internet-мережею – радіо-модемом.

2. Розміщення бази даних тестових завдань на територіально відокремленому сервері, налаштування доступу до якого здійснюється по мережі Internet.

**Таблиця 1.** Технологічні принципи організації систем комп’ютерного тестування

Принцип	Концепція реалізації
Максимально ефективна інтеграція в навчальне інформаційне середовище	За результатами досліджень, у якості базового ліцензійного програмного забезпечення більшість ВНЗ України використовує MS Office різних версій. У якості інструментальної бази для створення уніфікованих сучасних тестових оболонок доцільно використовувати засоби саме цього програмного продукту (із використанням можливостей програмування у VBA)
Модульність	Реалізація як мінімум двох форм модулів систем тестування: «Модуль-Викладач» та «Модуль-Студент» для розмежування функцій користувачів та цільового призначення програмної оболонки
Відокремленість оболонки тестування від бази даних тестів	З метою усуння обмежень щодо технічних вимог до комп’ютерів, якими оснащена більшість ВНЗ, базу даних тестових завдань доцільно розміщувати на потужному (можливо віддаленому) сервері
Мінімізація ресурсів пам’яті	Доцільним рішенням задачі використання максимально сумісних форматів файлів системи тестування та бази даних із оптимальними параметрами об’єму пам’яті, що потребується, є використання для їх створення єдиної програмної платформи (наприклад, MS Access)
Мережева організація та використання Інтернет-технологій	З метою забезпечення максимальної економічності та ефективності використання мережевих ресурсів раціонально використовувати режими: <ul style="list-style-type: none"> <li>– короткочасного передання бази тестових завдань з серверу, що розміщений у Internet-мережі, засобами бездротового зв’язку;</li> <li>– роздавання модулю «Модуль-Студент» та бази даних засобами внутрішнього мережевого забезпечення або бездротового зв’язку;</li> <li>– надання можливості мобільного (дистанційного) режиму роботи системи тестування</li> </ul>
Документування та ведення статистики	Результати тестування повинні представлятися у числовій та текстовій формах, повинні легко експортуватися в формат електронних таблиць MS Excel для інтеграції із іншими програмами
Багатоваріантність	Програмний продукт повинен передбачати широкий спектр сфер використання, таких як: <ul style="list-style-type: none"> <li>– за формами тестових завдань: одиночний та множинний вибір, на послідовність та відповідність, відкрита форма, використання графіки;</li> <li>– за формами проведення тестування: групове настроювання, індивідуальне настроювання;</li> <li>– за метою тестування: поточний контроль, підсумковий контроль, державний екзамен, навчання, самонавчання;</li> <li>– за формами організації навчання: денна, вечірня, заочно-дистанційна</li> </ul>
Захищеність	З метою досягнення максимального рівня захищеності та конфіденційності потрібно: <ul style="list-style-type: none"> <li>– використовувати методи шифрування та дешифрування бази тестових завдань та результатів тестування;</li> <li>– реалізовувати технології автоматичного вилучення тестової оболонки та бази тестових завдань з комп’ютерів користувачів;</li> <li>– гарантувати процедуру незалежної ідентифікації результатів тестування на віддаленому сервері</li> </ul>

3. Використання у якості необхідної та достатньої умови забезпечення можливості функціонування зазначеної системи навчання наявність на кожному з ППК стандартного набору програмного забезпечення MS Office, що включає системи управління базами даних MS Access.

4. Розробка уніфікованої системи комп’ютерного тестування розроблена засобами програмування VBA MS Access, при чому файли бази даних тестових завдань та програмної оболонки тестування мають одинаковий тип файлу \*.accdb.

Функціональна схема запропонованої мобільної системи комп’ютерного тестування реалізується наступним чином (рис. 1).

Методика використання наведеної мобільної системи включає наступні кроки:

Крок 1. На початку тестового сеансу викладач на портативному персональному комп’ютері у модулі «Викладач» виконує настроювання вимог запиту до бази даних тестових завдань, що міститься на сервері, у вигляді сигналу списку ZAP необхідних для поточного тестового сеансу дисциплін та/або навчальних тем та налаштовує короткочасний зв’язок через радіо modem із Internet-мережею.

Крок 2. Сервер, що забезпечений системою прийняття та передачі сигналів запитів до бази даних тестових завдань, виконує запит ZAP до бази даних тестових завдань та передає результати запиту на портативний персональний комп’ютер викладача у вигляді сигналу BAZA\_TEST у форматі бази даних СУБД MS Access.

Крок 3. Після отримання та збереження результатів запиту на портативний персональний комп’ютер викладача

ча короткочасний зв’язок через радіо modem із Internet-мережею закінчується. У подальшому мобільна система навчання буде продовжувати роботу у режимі тонкого клієнту.

Крок 4. Викладач на портативному персональному комп’ютері у модулі «Викладач» виконує:

- налаштування параметрів поточного тестового сеансу, причому, ці параметри можуть бути як загальними для усієї групи користувачів, так і індивідуальними для кожного користувача (рис. 2);

- передавання на портативні персональні комп’ютери користувачів налаштованого модулю «Студент» PROG\_TEST\_SEANS із встановленими параметрами поточного тестового сеансу та сформованою за результатами запиту до серверу бази даних тестових завдань BAZA\_TEST.

Крок 5. Після отримання та збереження програмного модулю PROG\_TEST\_SEANS та бази даних BAZA\_TEST користувач на портативному персональному комп’ютері:

- здійснює персональну ідентифікацію, використовуючи програмний модуль активації тестового сеансу;

- здійснює операцію тестування рівня знань, використовуючи програмний модуль безпосередньо для проведення тестового сеансу. Причому, користувачеві одразу надається сигнал повного списку тестових завдань, порядок відповідей на які він може регулювати самостійно, а також, у випадку необхідності, змінювати (коригувати) надану відповідь;

- отримує результати REZ тестування із додатковою інформацією про невиконані тестові завдання у вигляді списку цих завдань та наданих на них відповідей (рис. 3).

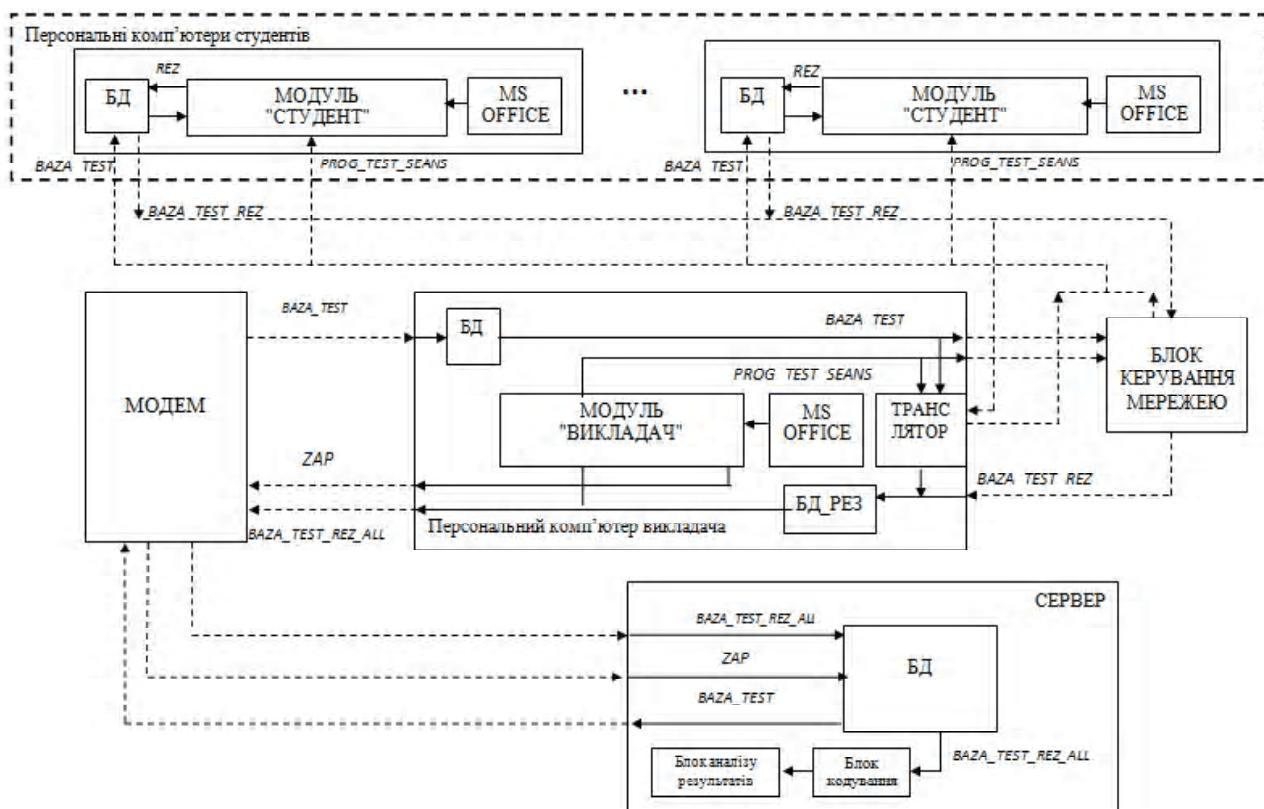


Рис. 1. Функціональна схема мобільної системи комп’ютерного тестування

**Форма для встановлення параметрів ТС**

Додати дисципліну	<input type="button" value="Назад"/>	Піновити установки	<input checked="" type="checkbox"/> Дешифрувати дисципліну	<input type="checkbox"/> Встановити підхазку
Системи підтримки прийняття рішень				
Варіант ТС №:	0	Загальна кількість установок ТС з дисциплін: 2	<input type="checkbox"/> Схема оцінки 0	
<input type="button" value="Назад"/> <input type="button" value="Попередній жмін"/> <input type="button" value="Следуючий жмін"/> <input type="button" value="Новий жмін"/>				
Додати варіант ТС	Поточна установка з дисципліні № 2			<input type="checkbox"/> KV1 <input type="checkbox"/> KV2
Видалити варіант ТС	Кількість тестових завдань у дисципліні	60	Кількість тестових завдань у ТС	60
Встановлення кількості ТЗ за рівнями складності				
Назва теми та рівень складності	Кількість тестових завдань у темі	14	Кількість тестових завдань з теми у ТС	<input checked="" type="checkbox"/> 14
ОСНОВНІ ПОНЯТНЯ ТЕОРИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ	<input type="checkbox"/> Поточний розділ за рівнем складності № 1 <input type="checkbox"/> Загальна кількість розділів за рівнями складності: 4 <input type="checkbox"/> Встановити автоматичне заповнення параметрів ТС			
Критерій оцінювання дисципліни:	на "трийку":	<input checked="" type="checkbox"/> 40	на "четвірку":	<input checked="" type="checkbox"/> 50
на "п'ятирку": <input checked="" type="checkbox"/> 58				
<input type="checkbox"/> Встановити загальний час проведення ТС (у хвилинах, після введення у сек.): 3600				
<input type="checkbox"/> Відрізок часу, протягом якого триває попередження (у хвилинах, після введення у сек.): 360				

Рис. 2. Інтерфейс вікна налаштування тестового сеансу

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України**

**Дніпропетровський університет ім. А Нобеля**

<input type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
Дисципліна - Системи підтримки прийняття рішень. Кількість запитань-60		
5-бальноя шкала оцінювання: на 3 (задовільно): 40 - 49; 4 (добре): 50 - 57; 5 (відмінно): 58 - 60 тестових завдань.		
Тестування закінчено! Ваша оцінка 2 (двійка) за 1 правильн. відпов. з 12 заданих відповідей, на 48 запит. - відповідь не надано		
Конюк Вільям Михайлович - Ваші результати внесені у базу даних на сервері		
Запитання, на яке Ви надали таку неправильну відповідь		
До якого класу задач відноситься визначення одного найкращого (найголовнішого, переважного) класту		
Записи: 14   4   3   <   >   <<   >>   из 11		
Введіть прізвище, ім'я та по батькові (зразок: Іванов Дмитро Іванович) Увага!!! Для змін мови при введені прізвища використовуйте кнопки EN,RU,UK		
Конюк Вільям Михайлович		
Введіть код групи (зразок: 1245)		
1245		
Для нового тестування натисніть тут, а потім введіть свої дані		

Рис. 3. Інтерфейс вікна результатів тестового сеансу

Крок 6. Результати тестування кожного студента *REZ* приєднуються до бази даних тестових завдань та зберігаються (*BAZA\_TEST\_REZ*) на портативному персональному комп’ютері користувача.

Крок 7. По закінченню часу, встановленого у параметрах поточного тестового сеансу на проведення групового або індивідуального тестування, викладач із портативного персонального комп’ютера з використанням програмного модуля «Викладач» та засобів внутрішнього мережевого забезпечення або технічних засобів передавання інформації (наприклад Bluetooth ) налаштовує сеанс:

– повернення з портативних персональних комп’ютерів користувачів сигналів бази даних тестових завдань із результатами тестування *BAZA\_TEST\_REZ*;

– одночасного вилучення з портативних персональних комп’ютерів користувачів програмного засобу проведення комп’ютерного тестування *PROG\_TEST\_SEANS*.

Крок 8. Після одержання та збереження результатів тестування усіх студентів викладач з портативного персонального комп’ютера вдруге налаштовує короткочасний зв’язок через радіо-модем із Internet-мережею для передання сигналу бази даних тестових завдань

*BAZA\_TEST\_REZ\_ALL* із результатами тестування на сервер, забезпечений засобами кодування/декодування та аналізу результатів тестування.

Враховуючи додаткові вимоги щодо багаторівантності інформаційної системи, слід зазначити, що зазначена мобільна система навчання також може бути індивідуально сконфігурата для організації тестування знань студентів вечірньої та заочно-дистанційної форм навчання або у випадку відсутності (за поважною причиною) особи, що навчається, на підсумковому контролі. У даному випадку передавання програмного модулю «Студент» із встановленими параметрами поточного тестового сеансу та сформованою за результатами запиту до серверу базою даних тестових завдань *BAZA\_TEST* на портативні персональні комп’ютери користувачів буде виконуватися шляхом налаштування короткочасного зв’язку через радіо modem з Internet-мережею. У зазначеній конфігурації системи, з метою запобігання підказування користувачеві правильних відповідей, сеанс комп’ютерного тестування може супроводжуватися відеозаписом (наприклад, за допомогою засобів стандартного програмного компонента пакета Microsoft Office – програми MS OneNote) із подальшим поверненням з портативних персональних комп’ютерів студентів як бази даних тестових завдань із результатами тестування *BAZA\_TEST\_REZ*, так й відеозапису сеансу тестування *VIDEO\_TEST* та автоматичним вилученням означених файлів з комп’ютера студента по закінченню сеансу.

Запропонована мобільна система навчання може також бути рекомендована для застосування у роботі акредитаційних (атестаційних) комісій як технологічна та методична гарантія ефективного, незалежного та об’єктивного інструменту оцінювання знань студентів, який забезпечує можливість використання ізольованої бази даних тестових завдань, що зберігається із максимальним ступенем конфіденційності на віддаленому сервері у мережі Internet, із подальшою ідентифікацією закодованих персональних результатів тестування безпосередньо на віддаленому сервері, запобігаючи втручанню у цей процес як членів комісії, так і представників вищого навчального закладу, що акредитується.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, запропонована авторами універсальна мобільна система комп’ютерного тестування дозволяє комплексно інтенсифікувати процес навчання завдяки:

– забезпеченням мобільності, економічності (ефективності) та конфіденційності процесу тестування шляхом розробки та реалізації технології зберігання та використання короткочасного сеансу передання бази тестових завдань з серверу, що розміщений у Internet-мережі, засобами бездротового зв’язку;

– вирішенню проблеми наявності обмежень із точки зору технічних характеристик, а також дистанційного розмежування комп’ютерів викладача та студентів у процесі організації тестового сеансу.

Запропонована мобільна система навчання реалізована у програмній оболонці «Мережне тестування», яка застосовується на кафедрі економічної кібернетики і математичних методів в економіці Дніпропетровського університету ім. А. Нобеля.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Згуровский, М. З. Общество знаний и информации – тенденции, вызовы, перспективы [Текст] / М. З. Згуровский // Зеркало недели. – 2003. – №19 (444). – 24 мая.
2. Автоматизированная система тестирования, навчания и мониторинга [Текст] : патент на корисну модель №43616U. Україна : МПК G09B 7/00 / Ціделко В. Д., Яремчук Н. А., Шведова В. В.; Заявник та патентовласник: Національний технічний Університет України «Київський політехнічний інститут». – № u200902620, заявл. 23.03.2009, опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16, 2009.
3. Комплекс засобів для забезпечення інтерактивного навчального процесу [Текст]: патент на корисну модель № 33619U. Україна: МПК G09B 5/00 / Андрущенко В. П., Кудін А. П., Жабеев Г. В., Падалка М. П.; Заявник та патентовласник: Національний педагогічний університет імені М. П. Драгоманова. – заявл. 12.12.2007; опубл. 25.06.2008, бюл. №23, 2008.
4. Мобільна комп’ютерна система навчання [Текст]: патент на корисну модель № 77 991 U1. Россия: G09B 5/00, G09B 21/06 / Назаренко А. П., Паршин Г. Н., Сафонова Л. И., Станевский А. Г.; Патентообладатель : Назаренко А. П., Паршин Г. Н., Сафонова Л. И., Станевский А. Г. – № 2007102241/22, заявл. 23.01.2007, опубл. 0.11.2008, бюл. № 31, 2008.
5. Калугян, К. Х. Компьютерная система тестирования знаний как компонент информационной научно-образовательной среды ВУЗа [Текст] / К. Х. Калугян, С. М. Щербаков // Вестник Академии. – 2005. – № 1 (20). – С. 61–66.
6. Маркус, Л. И. Универсальные программы тестового контроля знаний в ВУЗе [Текст] / Л. И. Маркус, А. К. Талыгин // Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров : Материалы Международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров (ААИ), посвященной 145-летию. – МГТУ «МАМИ» Книга 12, Москва, МГТУ «МАМИ». – 2010. – С. 136–143.

Стаття надійшла до редакції 04.07.2011.  
Після доробки 02.11.2011.

Ризун Н. О., Тараненко Ю. К.

МОБІЛЬНА СИСТЕМА КОМПЬЮТЕРНОГО ТЕСТИРОВАННЯ КАК ІНСТРУМЕНТ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА ВУЗ

Предложена мобильная система компьютерного тестирования, которая позволяет интенсифицировать учебный процесс благодаря обеспечению мобильности, экономичности и конфиденциальности тестового контроля путем использования технологии кратковременного сеанса беспроводной связи с сервером, размещенным в Internet-сети и хранящим базу тестовых заданий и средства идентификации результатов тестирования.

**Ключевые слова:** мобильная система, учебный процесс, тестовый сеанс, беспроводная связь.

Rizun N. O., Taranenko Y. K.

## MOBILE SYSTEM OF COMPUTER TESTING AS THE INSTRUMENT OF INTENSIFICATION OF STUDY PROCESS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Mobile system of computer testing, which allows intensifying study process because of ensuring of mobility, economy and

confidentiality of testing control by means of using the technology of a short-term session of wireless connection with the server, which is located in the Internet and contains the base of test tasks and means of testing results identification, is suggested.

**Key words:** mobile system, study process, testing session, wireless connection.

УДК 658.512.011:681.326:519.713

Хаханов В. И.<sup>1</sup>, Чумаченко С. В.<sup>2</sup>, Литвинова Е. И.<sup>3</sup>, Гузь О. А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, декан Харьковского национального университета радиоэлектроники

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

<sup>4</sup>Канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой Донецкой академии автомобильного транспорта

## ІНФРАСТРУКТУРА ДІАГНОСТИРОВАННЯ ПРОГРАММО-АППАРАТНИХ СИСТЕМ

Представлены инфраструктура и технологии диагностирования, в рамках которого созданы транзакционная граф-модель модель и метод диагностирования цифровых систем на кристаллах, ориентированные на существенное уменьшение времени поиска дефектов и затрат памяти для хранения матрицы диагностирования путем формирования тернарных отношений в форме тест, монитор, функциональный компонент. Решены задачи: создания модели цифровой системы в виде транзакционного графа и мультидерева таблиц поиска неисправностей, а также тернарные матрицы активизации функциональных компонентов на тестах относительно выбранного множества мониторов; разработки метода анализа матрицы активизации для поиска дефектов с заданной глубиной и синтеза логических функций для последующей реализации встроенного аппаратного диагностирования дефектов.

**Ключевые слова:** инфраструктура, анализ информации, диагностирование, граф-модель, цифровая система на кристалле.

### 1. ТАБ-МОДЕЛЬ ДІАГНОСТИРОВАННЯ ДЕФЕКТНИХ КОМПОНЕНТОВ В SOC

Мотивация определяется: 1) созданием простых и доступных в применении моделей, методов и движков для диагностирования многоуровневых программно-аппаратных систем; 2) рыночной привлекательностью матричного или табличного метода поиска дефектов в компонентах (программных и аппаратных) цифровых систем на кристаллах, как самого технологичного, который ориентирован на параллельную обработку данных, что дает возможность существенно уменьшить время диагностического обслуживания при возникновении неисправностей или нефункциональных режимов.

Цель исследования – создание модели, метода и их аппаратной реализации, ориентированных на существенное уменьшение времени тестирования и затрат памяти для хранения матрицы диагностирования путем формирования тернарных отношений (тест – монитор – функциональный компонент) внутри одной таблицы или ТАВ: Tests – Assertions – Blocks.

Задачи: 1) Разработка модели цифровой системы в виде транзакционного графа, а также многоуровневой модели и движка диагностирования программно-аппаратных модулей на основе использования матрицы активизации функциональных компонентов на тестах относительно выбранного множества мониторов [1–6].

2) Разработка метода анализа матрицы активизации для поиска дефектов с заданной глубиной [4–7]. 3) Синтез логических функций для встроенного диагностирования дефектов [8–11].

Модель тестирования цифровой системы представлена в виде следующего преобразования начального уравнения диагноза, определенного хог-отношением параметров <тест – функциональность – неисправные блоки>:

$$T \oplus F \oplus B = 0 \rightarrow B = T \oplus F \rightarrow B =$$

$$'= \{T \times A\} \oplus F \rightarrow B = \{T \times A\} \oplus \{F \times m\},$$

которое оформлено в тернарное матричное отношение компонентов:

$$M = \{ \{T \times A\} \times \{B\} \} \leftarrow M_{ij} = (T \times A)_i \oplus B_j.$$

Здесь координата матрицы (таблицы) равна 1, если пара тест-монитор  $(T \times A)_i$  проверяет (активизирует) дефекты функционального блока  $B_j \in B$ .

Модель цифровой системы представлена в виде транзакционного графа

$$G = \langle B, A \rangle, B = \{B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_n\}, A = \{A_1, A_2, \dots, A_j, \dots, A_m\},$$

где определены множество дуг – функциональных блоков и вершин – мониторов для наблюдения совокупности переменных цифровой системы. Для целей диагнос-

тирования на графовую модель накладывается совокупность тестовых сегментов  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_r, \dots, T_k\}$ , которая активизирует транзакционные пути в графе. В общем случае модель тестирования представлена декартовым произведением  $M = \langle B \times A \times T \rangle$ , которая имеет размерность  $Q = n \times m \times k$ . Чтобы уменьшить объем диагностической информации предлагается каждому тесту поставить в соответствие монитор, который отвечает за визуализацию пути активизации функциональных блоков, что дает возможность уменьшить размерность модели (матрицы) до  $Q = n \times k$  при сохранении всех возможностей отношения триады  $M = \langle B \times A \times T \rangle$ . Для пары тест-монитор возможны не только взаимно-однозначные соответствия  $\langle T_i \rightarrow A_j \rangle$ , но и функциональные  $\langle \{T_i, T_r\} \rightarrow A_j \rangle$ , а также инъективные  $\langle T_i \rightarrow \{A_j, A_s\} \rangle$ . Такое многообразие соответствий дает возможность дублировать один тестовый сегмент для разных мониторов, равно как и нагружать несколько тестов на один и тот же монитор. При этом ячейка матрицы  $M_{ij} = \{0,1\}$  всегда сохраняет свою размерность, равную одному биту.

Аналитическая обобщенная модель матричного диагностирования с использованием механизма мониторов ориентирована на достижение заданной глубины поиска дефектов и представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} M &= f(G, L, T, B, A, t), \\ B &= \{B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_m\}; \\ L &= \{L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n\}; \\ A(t) &= \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_k\}; \\ A &\subseteq L; G = L \times B; k \leq n; \\ T &= \{T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_p\}. \end{aligned}$$

Здесь  $B_i$  – группа операторов кода, нагруженная на вершину  $L_i$  (переменная, регистр, счетчик, память) и формирующая ее состояние;  $G$  – функциональность, представленная транзакционным графом  $G = (L, A) \times B$  в виде декартона произведения множества вершин и дуг;  $A$  – совокупность мониторов, как подмножество вершин транзакционного графа  $A \subseteq L$ . Метод поиска неисправностей функциональных блоков (ФБ) использует предварительно построенную таблицу (матрицу) активизации ТАФБ  $M = [M_{ij}]$ , где строка есть отношение между тестовым сегментом и подмножеством активированных блоков

$$T_i \rightarrow A_j \approx (M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{ij}, \dots, M_{in}), M_{ij} = \{0,1\},$$

наблюдаемых на мониторе  $A_j$ . Столбец таблицы формирует отношение между функциональным блоком, тестовыми сегментами и мониторами  $M_j = B_j \approx f(T, A)$ . В механизме мониторов может быть введен параметр модельного времени, который частично усложняет матри-

цу активизации, указывая временной или модельный такт, на котором выполняется мониторинг состояния вершины или функционального блока на тест-сегменте  $A_j = f(T_i, B_j, t_j)$ .

Для диагностирования неисправностей на стадии моделирования определяется обобщенная реакция (вектор-столбец)  $m = \{m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_p\}$  механизма мониторов  $A$  на тест-сегменты  $T$ , путем формирования  $m_i = f(T_i, A_i)$ . Поиск неисправного ФБ основан на определении хор-операции между вектором состояния ассерций и столбцов таблицы ФН  $m \oplus (M_1 \vee M_2 \vee \dots \vee M_j \vee \dots \vee M_n)$ . Выбор решения определяется методом хор-анализа столбцов, путем выбора совокупности векторов  $B_j$  с минимальным числом единичных координат

$$B = \min_{j=1,n} [B_j = \sum_{i=1}^p (B_{ij} \oplus m_i)],$$

формирующих функциональные блоки с неисправностями, проверяемыми на тестовых сегментах. В дополнение к модели матричного диагностирования необходимо описать следующие важные свойства матрицы:

- 1)  $M_i = (T_i - A_j)$ ;
- 2)  $\bigvee_{i=1}^m M_{ij} \rightarrow \forall M_j = 1$ ;
- 3)  $M_{ij} \bigoplus_{j=1}^n M_{rj} \neq M_{ij}$ ;
- 4)  $M_{ij} \bigoplus_{i=1}^k M_{ir} \neq M_{ij}$ ;
- 5)  $\log_2 n \leq k \leftrightarrow \log_2 |B| \leq |T|$ ;
- 6)  $B_j = f(T, A) \rightarrow B \oplus T \oplus A = 0$ .

Свойства означают: 1) Каждая строка матрицы есть соответствие или подмножество декартона произведения (тест-монитор). 2) Дизьюнкция всех строк матрицы дает вектор, равный единицам по всем координатам. 3) Все строки матрицы различны, что исключает тестовую избыточность. 4) Все столбцы матрицы различны, что исключает существование эквивалентных неисправностей. 5) Число строк матрицы должно быть больше двоичного логарифма от числа столбцов, что определяет потенциальную диагностируемость всех блоков. 6) Функция диагностирования блока зависит от совокупного теста и мониторов, которые должны быть минимизированы без нарушения диагнозопригодности.

## 2. ДИАГНОЗОПРИГОДНОСТЬ ПРОЕКТА

Что касается качества модели диагностирования функциональных нарушений, то она показывает эффективность использования пары (тест, ассерции) для заданной глубины диагностирования. Оценка качества модели

функционально зависит от длины теста  $|T|$ , числа ассерций наблюдения  $|A|$ , количества распознаваемых блоков с функциональными нарушениями  $N_d$  на общем числе программных блоков  $N$ :

$$Q = E \times D = \frac{|\log_2 N|}{|T| \times |A|} \times \frac{N_d}{N}.$$

Эффективность диагностирования есть отношение минимального числа двоичных разрядов, необходимых для идентификации (распознавания) всех блоков к реальному количеству разрядов кода, представленному произведением длины теста на число ассерций в каждом из них. Если первая дробь оценки равна 1 и все блоки с ФН распознаются ( $N_d = N$ ), то тест и ассерции оптимальны, что доставляет критерию качества модели диагностирования значения, равного 1. Далее рассмотрен пример матрицы ABC-графа, который представлен на рис. 1 и имеет 14 функциональных блоков – дуг, а также 9 мониторов – вершин.

Для такого графа существует 2 решения при создании модели диагностирования дефектов, с одной и тремя ассерциями или мониторами:

$$Q_1 = \frac{|\log_2 14|}{|6| \times |1|} \times \frac{10}{14} = 0,5;$$

$$Q_2 = \frac{|\log_2 14|}{|6| \times |3|} \times \frac{14}{14} = 0,2.$$

Несмотря на то, что качество модели лучше в первом варианте, за счет меньшего объема таблицы активизации, вторая модель – более предпочтительна, поскольку она имеет максимальную глубину диагностирования, когда все 14 блоков распознаются за счет добавления двух ассерций. Оценка позволяет определить минимальные затраты по длине теста и числу ассерций для создания модели с максимальной глубиной диагностирования.

Интерес представляет оценивание качества структуры кода проекта с позиции диагностируемости (diagnosability) блоков программного продукта. Цель анализа – определить количественную оценку структуры графа и места (вершины) для установки ассерционных мониторов, создающих максимальную глубину диагностирования функциональных нарушений про-

граммных блоков. Здесь важна не управляемость и наблюдаемость, как в тестопригодности (testability), а различимость программных блоков с функциональными нарушениями, в пределе представляющая ноль блоков с эквивалентными (неразличимыми) нарушениями. Такая оценка может быть полезной для сравнения графов, реализующих одинаковую функциональность. Здесь необходимо оценивать структуру графа с позиции потенциально заложенной в нем глубины поиска функциональных нарушений программного продукта. Возможным вариантом может быть диагнозопригодность ABC-графа как функция, зависящая от таких смежных дуг при каждой вершине (формирующих число  $N_n$ ), одна из которых – входящая, другая – исходящая. Такие дуги составляют пути без схождений и разветвлений ( $N$  – общее количество дуг в графе):

$$D = \frac{N - N_n}{N}.$$

Каждая вершина, объединяющая 2 дуги, входящие в число  $N_n$ , называется транзитной. Оценка  $N_n$  есть число неразличимых функциональных нарушений программных блоков. Места потенциальной установки мониторов для различия ФН – транзитные вершины. С учетом приведенной оценки диагнозопригодности  $D$  качество модели диагностирования программного продукта принимает вид:

$$Q = E \times D = \frac{|\log_2 N|}{|T| \times |A|} \times \frac{N - N_n}{N}.$$

Правила синтеза диагнозопригодных программных продуктов: 1) Тест (testbench) должен создавать минимальное число одномерных путей активизации, покрывающих все вершины и дуги ABC-графа. 2) Базовое число мониторов-ассерций равно количеству конечных вершин графа, не имеющих исходящих дуг. 3) В каждой вершине, имеющей одну входную и одну выходную дугу, может быть размещен дополнительный монитор. 4) Параллельно независимые блоки кода имеют  $n$  мониторов и один тест или один объединенный монитор и  $n$  тестов. 5) Последовательно соединенные блоки имеют 1 тест активизации последовательного пути и  $n-1$  монитор или  $n$  тестов и  $n$  мониторов. 6) Вершины графа, имеющие различное число входных и выходных дуг, создают условия для диагностируемости данного участка за счет одномерных тестов активизации без установки дополнительных мониторов. 7) Совокупность тестовых сегментов (testbench) должна составлять 100 % покрытие функциональных режимов (functional coverage), заданных вершинами ABC-графа. 8) Функция диагнозопригодности прямо пропорциональна длине теста, числу ассерций и обратно пропорциональна двоичному логарифму от числа программных блоков:

$$D = \frac{N - N_n}{N} = f(T, A, N) = \frac{|T| \times |A|}{|\log_2 N|}.$$

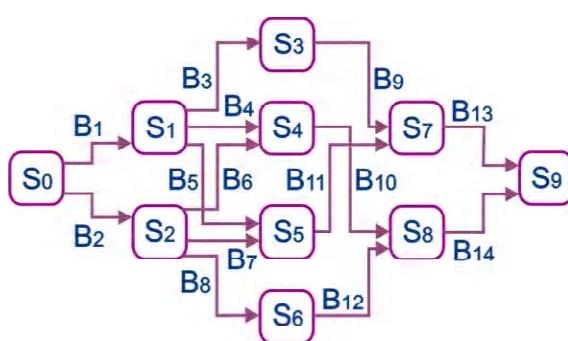


Рис. 1. Пример ABC-графа транзакций

Диагнозопригодность как функция, зависящая от структуры графа (программного продукта), теста и асерционных мониторов всегда может быть приведена к единичному значению. Для этого существует два альтернативных пути. Первый – увеличение тестовых сегментов, активизирующих новые пути, для различения эквивалентных неисправностей (ФН) без наращивания ассерций, если структура графа программных блоков имеет такой потенциал связей. Второй – размещение дополнительных асерционных мониторов в транзитных вершинах графа. Возможен и третий, гибридный вариант, основанный на совместном применении двух перечисленных выше путей. Отношение трех компонентов (число программных блоков, мощность механизма ассерций и длина теста) при единичном значении качества модели диагностирования и диагнозопригодности, формирует плоскость оптимальных

решений  $D=1 \rightarrow \frac{|T| \times |A|}{\lceil \log_2 N \rceil} = 1 \rightarrow \lceil \log_2 N \rceil = |T| \times |A|$ . Она

может быть полезной для выбора квазиоптимального варианта альтернативного пути достижения полной различности на паре  $|T| \times |A|$  функциональных нарушений программных блоков.

### **3. МУЛЬТИ-УРОВНЯЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД (ДВИЖКОК)ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ**

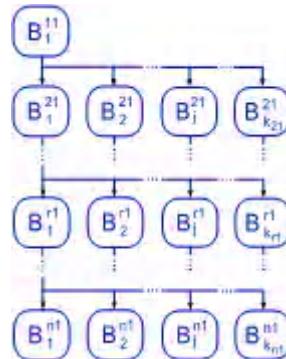
Представлена мультидеревом  $B$ , где каждая вершина есть трехмерная таблица активизации функциональных модулей, а дуги, исходящие из нее, есть переходы на нижний уровень детализации при диагностировании, когда замена рассматриваемого неисправного функционального блока слишком дорога:

$$B = [B_{ij}^{rs}], \quad \text{card} B = \sum_{r=1}^n \sum_{s=1}^{m_r} \sum_{j=1}^{k_{rs}} B_{ij}^{rs},$$

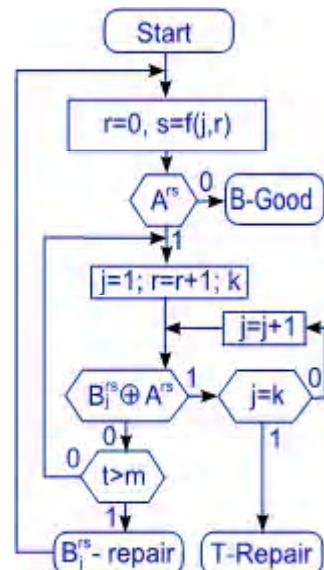
$n$  – число уровней мультидерева диагностирования;  $m_r$  – количество функциональных блоков или компонентов на уровне  $r$ ;  $k_{rs}$  – число компонентов в таблице  $B^{rs}$ ;  $B_{ij}^{rs} = \{0,1\}$  – компонент таблицы активизации, определенный сигналами проверки (непроверки) функционального модуля тест-сегментом  $T_{i-A_r}$  относительно наблюдаемого монитора  $A_i$ . Каждая вершина-таблица имеет число исходящих вниз дуг, равное количеству функциональных блоков, диагностируемых (представленных) в таблице активизации. Структура мультидерева, соответствующая модели многоуровневого диагностирования, представлена на рис. 2.

Процесс модель или метод поиска дефектов по мультидереву диагностирования сводится к созданию движка, рис. 3, для спуска по одной из ветвей дерева на такую глубину, которая удовлетворяет пользователю по степени детализации:

$$B_j^{rs} \oplus A^{rs} = \begin{cases} 0 \rightarrow \{B_j^{r+1,s}, R\}; \\ 1 \rightarrow \{B_{i+1}^{rs}, T\}. \end{cases}$$



**Рис. 2.** Фрагмент мультидерева диагностирования цифровых систем



**Рис. 3.** Движок обхода мультидерева диагностирования

Здесь выполняется векторная хор-операция между столбцами матрицы и вектором экспериментальной проверки  $A^{rs}$ , который определяется реакцией функциональности, снятой с мониторов (ассерции или разряды регистра граничного сканирования) при подаче всех тест-сегментов. Если хотя бы одна координата полученной векторной хор-суммы равна нулю  $B_j^{rs} \oplus A^{rs} = 0$ , то выполняется одно из действий: переход к матрице активизации нижнего уровня  $B_j^{r+1,s}$  или восстановление работоспособности функционального блока  $B_j^{rs}$ . При этом анализируется, что важнее: 1) время – тогда выполняется ремонт рассматриваемого блока с неисправностью; 2) деньги – тогда осуществляется переход вниз, для уточнения места дефекта, поскольку замена более мелкого блока существенно уменьшает стоимость ремонта. Если хотя бы одна координата полученного вектора хор-суммы равна единице  $B_j^{rs} \oplus A^{rs} = 1$ , то выполняется переход к анализу следующего столбца матрицы. При нулевых значениях всех координат вектора (ассерционных) мониторов  $A^{rs} = 0$ , фиксируется исправное состояние все-

го изделия. Если в рассматриваемой таблице зафиксированы все векторные хог-суммы, не равные нулю  $B_j^{rs} \oplus A^{rs} = 1$ , то коррекции подлежит тест, построенный для проверки данной функциональности.

Таким образом, представленная на рисунке граф-схема дает возможность эффективно осуществлять сервисное обслуживание сколь угодно сложной технической системы. Преимущества такого движка, инвариантного к уровням иерархии, заключаются в простоте подготовки и представления диагностической информации в виде минимизированной таблицы активизации функциональных блоков на тестовых сегментах.

#### 4. ВЕРИФІКАЦІЯ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Для пояснения работоспособности модели и метода далее рассмотрены функциональности трех модулей, входящих в состав цифрового фильтра Добеши [11]. Первым является компонент Row\_buffer, для которого создан транзакционный граф на основе RTL-модели, рис. 4. Вершины представлены состояниями переменных и мониторов, отвечающих за входящие в вершину транзакции или дуги, которым соответствуют функциональные блоки.

На основе графа, полученного в процессе моделирования, строится таблица активизации функциональных блоков, строки которой представляют пути активизации блоков к заказанной вершине-монитору. Таблица представляет собой покрытие строками-путями всех столбцов или функциональных блоков. При этом в ней не должны быть хотя бы двух одинаковых столбцов. Отличие таблицы заключается в формировании пары <тест – наблюдаемая вершина>, что дает возможность существенно сократить размерность таблицы при 100 % распознавании всех дефектных блоков. Здесь самое главное отличие предложенной модели заключается в возможности описания с помощью таблицы следующих отношений: различные тесты – одна вершина; один тест – различные вершины:

$A_{ij}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$
$t_1 \rightarrow D_3$	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
$t_2 \rightarrow D_1$	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
$t_3 \rightarrow D_1$	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
$t_4 \rightarrow D_1$	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	1
$t_5 \rightarrow D_1$	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	1
$t_6 \rightarrow D_1$	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1
$t_7 \rightarrow D_2$	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.
$t_8 \rightarrow D_2$	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	1	.	.
$t_9 \rightarrow D_2$	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	1	.
$t_{10} \rightarrow D_2$	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	1	.
$t_{11} \rightarrow D_2$	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	1	.	.

С помощью матрицы активизации функциональных блоков (транзакционного графа) и хог-метода поиска дефектов достаточно просто синтезировать логические функции для формирования комбинационной схемы, определяющей в процессе и по результатам моделиро-

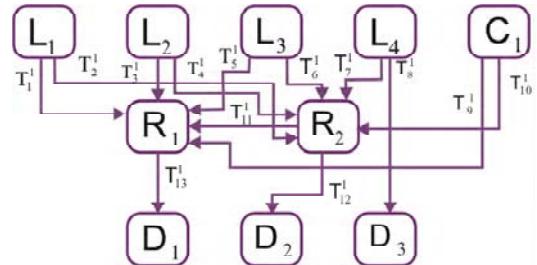


Рис. 4. Компонент Row\_buffer транзакционного графа

вания номер функционального блока, который имеет семантические ошибки:

$$\begin{aligned}
 D_3 &= T_8^1; \\
 D_1 &= T_{13}^1 T_1^1 \vee T_{13}^1 T_3^1 \vee T_{13}^1 T_5^1 \vee T_{13}^1 T_{11}^1 \vee T_{13}^1 T_9^1; \\
 D_2 &= T_{12}^1 T_2^1 \vee T_{12}^1 T_4^1 \vee T_{12}^1 T_6^1 \vee T_{12}^1 T_7^1 \vee T_{12}^1 T_{10}^1.
 \end{aligned}$$

Такое свойство становится возможным благодаря отсутствию эквивалентных неисправностей или одинаковых столбцов в матрице активизации. Поэтому фиксация фактического состояния всех мониторов в вершинах  $D_1, D_2, D_3$  на 11 тестовых наборах дает возможность однозначно идентифицировать некорректный функциональный модуль путем выполнения хог-операции между вектором ассерций и столбцами матрицы активизации. Нулевое значение всех координат результата хог-операции определяет номер столбца, соответствующего неисправному модулю. Имплементация модели и метода в логическую функцию дает возможность определять неисправный блок еще до завершения диагностического эксперимента, если это возможно. Это означает существенную экономию времени диагностирования отдельных видов дефектов. Например, тест-монитор  $t_1 \rightarrow D_3$  дает возможность идентифицировать уже на первом teste неисправность блока  $B_8$ .

В качестве второго тестового примера для практического использования разработанной модели активизации и хог-метода поиска дефектов далее предлагается синтез матрицы диагностирования для модуля дискретного косинусного преобразования из Xilinx библиотеки, фрагмент которого представлен листингом 1.

Листинг 1. Фрагмент функционального покрытия

```

c0: coverpoint xin
{
  bins minus_big={[128:235]};
  bins minus_sm={[236:255]};
  bins plus_big={[21:127]};
  bins plus_sm={[1:20]};
  bins zero={0};
}

c1: coverpoint dct_2d
{
  bins minus_big={[128:235]};
  bins minus_sm={[236:255]};
  bins plus_big={[21:127]};
  bins plus_sm={[1:20]};
}
  
```

```

bins zero={0};
bins zero2=(0=>0);
}
endgroup

```

Для всіх 12 модулей фільтра разроблені транзакційні графи, таблиці активизації та логіческі функції для тестування та пошуку дефектів дискретного косинусного преобразування. Граф з матрицею активизації та логічкої функцією (рис. 5), також принадлежає фільтру, представлені нижче.

Данному графу ставиться в соответствие следуюшая матрица диагностирования:

$A_{ij}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$	$T_5$	$T_6$	$T_7$	$T_8$	$T_9$	$T_{10}$	$T_{11}$	$T_{12}$	$T_{13}$	$T_{14}$
$P_1 \rightarrow F_7$	1	.	1	.	1	.	1	.	.	.	.	.	.	.
$P_2 \rightarrow F_8$	.	1	.	1	1	.	.	1	.	.	.	.	.	.
$P_3 \rightarrow F_9$	1	.	1	.	.	1	.	.	.	.	1	.	.	.
$P_4 \rightarrow F_{10}$	.	1	.	1	.	1	.	.	.	.	.	1	.	.
$P_5 \rightarrow F_{12}$	1	.	1	.	1	.	.	.	1	.	.	.	1	.
$P_6 \rightarrow F_{13}$	.	1	.	1	.	1	.	.	.	1	.	.	.	1
$P_1 \rightarrow F_2$	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$P_2 \rightarrow F_3$	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Система функцій диагностирования:

$$F_7 = T_1^1 T_3^1 T_5^1 T_7^1; F_8 = T_2^1 T_4^1 T_5^1 T_8^1; F_9 = T_{11}^1 T_6^1 T_1^1 T_3^1;$$

$$F_{10} = T_4^1 T_5^1 T_6^1 T_{12}^1; F_{12} = T_1^1 T_3^1 T_5^1 T_9^1 T_{13}^1;$$

$$F_{13} = T_2^1 T_4^1 T_6^1 T_{10}^1 T_{14}^1; F_2 = T_1^1; F_3 = T_2^1;$$

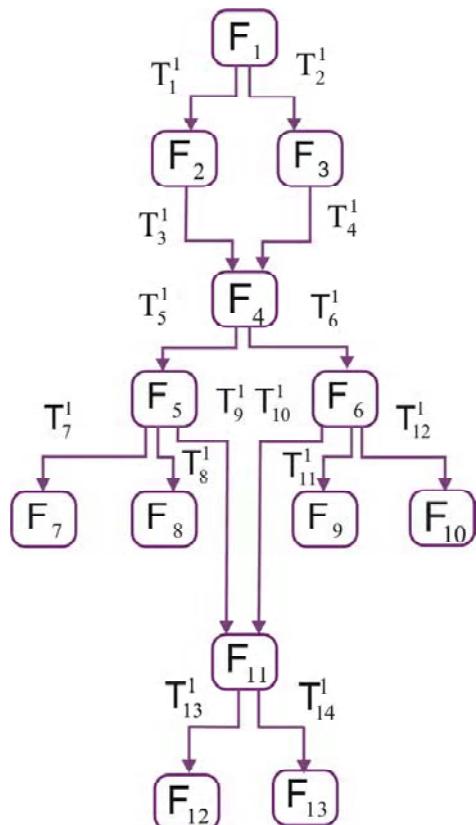


Рис. 5. Транзакційний граф main-RTL

Фрагмент механизма мониторов представлена листингом 2.

Листинг 2. Фрагмент кода механизма мониторов

```

sequence first( reg[7:0] a, reg[7:0]b );
reg[7:0] d;
(!RST,d=a)
##7 (b==d);
endsequence
property f(a,b);
@(posedge CLK)
// disable iff(RST||$isunknown(a)) first(a,b);
!RST |=> first(a,b);
endproperty
odin:assert property (f(xin,xa7_in))
// $display("Very good");
else $error("The end, xin =%b,xa7_in=%b",
$past(xin, 7),xa7_in);
//add_sub1a <= xa7_reg + xa0_reg;//

```

В результаті тестування дискретного косинусного преобразування в середі Riviera, Aldec були знайдені неточності в семи строках HDL-моделі:

```
//add_sub1a <= xa7_reg + xa0_reg;//
```

Последующая коррекция кода привела к листингу 3.

Листинг 3. Исправленный фрагмент кода

```

add_sub1a <= ({xa7_reg[8],xa7_reg} +
+{xa0_reg[8],xa0_reg});
add_sub2a <= ({xa6_reg[8],xa6_reg} +
+{xa1_reg[8],xa1_reg});
add_sub3a <= ({xa5_reg[8],xa5_reg} +
+{xa2_reg[8],xa2_reg});
add_sub4a <= ({xa4_reg[8],xa4_reg} +
+{xa3_reg[8],xa3_reg});
end
else if (toggleA == 1'b0)
begin
add_sub1a <= ({xa7_reg[8],xa7_reg} -
-{xa0_reg[8],xa0_reg});
add_sub2a <= ({xa6_reg[8],xa6_reg} -
-{xa1_reg[8],xa1_reg});
add_sub3a <= ({xa5_reg[8],xa5_reg} -
-{xa2_reg[8],xa2_reg});
add_sub4a <= ({xa4_reg[8],xa4_reg} -
-{xa3_reg[8],xa3_reg});

```

## ЗАКЛЮЧЕНІ

1. Представлены инфраструктура и технологии анализа киберпространства, в рамках которого созданы транзакционная граф-модель и метод диагностирования цифровых систем на кристаллах, ориентированные на существенное уменьшение времени поиска дефектов и затрат памяти для хранения матрицы диагностирования путем формирования тернарных отношений в форме тест, монитор, функциональный компонент.

2. Предложена усовершенствованная процесс-модель определения функциональных нарушений в программном или аппаратном изделии, которая отличается использованием хор-операции, что дает возможность повысить быстродействие диагностирования одиночных или крат-

ных дефектов (функциональных нарушений) на основе параллельного анализа таблицы неисправностей, стандарта граничного сканирования IEEE 1500 и векторных операций and, or, xor.

3. Представлена модель диагностирования функциональностей цифровой системы на кристалле в форме мультидерева и метод обхода вершин дерева, имплементированный в движок поиска дефектов с заданной глубиной, которая существенно повышает быстродействие сервисного обслуживания программных и аппаратных компонентов промышленных изделий.

4. Выполнена тестовая верификация метода диагностирования на трех реальных примерах, представленных функциональностями фильтра косинусного преобразования цифровой системы на кристалле, которая показала состоятельность полученных результатов для минимизации времени поиска дефектов и памяти для хранения диагностической информации, а также повышения глубины диагностирования цифровых изделий.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Основы технической диагностики / Под. ред. П. П. Пархоменко.– М. : Энергия, 1976. – 460 с.
2. Основы технической диагностики (Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства) / Под ред. П. П. Пархоменко. – М. : Энергия, 1981. – 320 с.
3. Инфраструктура мозгоподобных вычислительных процессов / [М. Ф. Бондаренко, О. А. Гузь, В. И. Хаханов, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко]. – Х. : Новое Слово, 2010. – 160 с.
4. Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах / В. И. Хаханов, И. В. Хаханова, Е. И. Литвинова, О. А. Гузь. – Х. : Новое слово, 2010. – 528 с.
5. Семенец, В. В. Проектирование цифровых систем с использованием языка VHDL / В. В. Семенец, И. В. Хаханова, В. И. Хаханов. – Х. : ХНУРЭ. – 2003. – 492 с.
6. Хаханов, В. И. VHDL+Verilog = синтез за минуты / В. И. Хаханов, И. В. Хаханова. – Х. : ХНУРЭ. – 2006. – 264 с.
7. IEEE Standard for Reduced-Pin and Enhanced-Functionality Test Access Port and Boundary-Scan : Architecture IEEE Std 1149.7. – 2009. – 985 p.
8. Da, Silva F. The Core Test Wrapper Handbook. Rationale and Application of IEEE Std. 1500™ / F. Da Silva, T. McLaurin, T. Waayers. – Springer. – 2006. – XXIX. – 276 p.
9. Marinissen, E. J. Guest Editors' Introduction : The Status of IEEE Std 1500 / E. J. Marinissen, Yervant Zorian // IEEE Design & Test of Computers. – 2009. – No 26(1). – P. 6–7.
10. Benso, A. IEEE Standard 1500 Compliance Verification for Embedded Cores / A. Benso, S. Di Carlo, P. Prinetto, Y. Zorian // IEEE Trans. VLSI. – 2008. – No 16(4). – P. 397–407.
11. Хаханов, В. И. Логический ассоциативный вычислитель / В. И. Хаханов, Е. И. Литвинова, С. В. Чумаченко, О. А. Гузь // Электронное моделирование. – 2011. – № 1. – С. 73–83.

Стаття надійшла до редакції 19.07.2011.

Хаханов В. И., Чумаченко С. В., Литвинова Е. И., Гузь О. А.  
ІНФРАСТРУКТУРА ДІАГНОСТУВАННЯ ПРОГРАМО-АПАРАТНИХ СИСТЕМ

Запропоновано інфраструктуру й технології аналізу кіберпростору, в рамках якого створено транзакційну граф-модель та метод діагностування цифрових систем на кристалах, орієнтовані на істотне зменшення часу пошуку дефектів і витрат пам'яті для зберігання матриці діагностування шляхом формування тернарних відносин у формі тест, монітор, функціональний компонент.

**Ключові слова:** інфраструктура, аналіз інформації, діагностування, граф-модель, цифрова система на кристалі.

Hahanov V. I., Chumachenko S. V., Litvinova E. I., Guz O. A.  
DIAGNOSIS INFRASTRUCTURE FOR SOFTWARE-HARDWARE SYSTEMS

An infrastructure and technologies for analyzing cyberspace are proposed. A transactional graph model and method for diagnosing digital systems-on-chips, focused to considerable reducing the time of fault detection and memory for storing the diagnosis matrix by forming ternary relations in the form of test, monitor, functional component, are created.

**Key words:** infrastructure, information analysis, diagnosis, graph model, digital system-on-chip.

# ТЕОРІЯ І МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

## ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### THEORY AND METHODS CONTROL OF AUTOMATIC CONTROL

УДК 62-503.4

Александрова Т. Е.

Канд. техн. наук, доцент Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ РОБАСТНЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассматривается проблема синтеза оптимального по точности стабилизатора подвижного объекта с учетом требования робастности замкнутой системы стабилизации к изменениям конструктивного параметра объекта.

**Ключевые слова:** робастные системы, функции чувствительности, интегральный квадратичный функционал, весовые коэффициенты.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В процессе эксплуатации любой технической системы значения ее конструктивных параметров отличаются от номинальных. При этом в той или иной степени изменяются динамические характеристики системы. Динамическую систему будем называть робастной, если изменения ее параметров не приводят к существенному изменению динамических характеристик системы. Для синтеза робастных динамических систем целесообразно использовать аппарат теории чувствительности [1, 2]. Основные задачи, рассматриваемые в теории чувствительности, состоят в анализе влияния малых отклонений конструктивных параметров на динамическую систему, а также в синтезе динамической системы, мало чувствительной к изменению этих параметров.

Пусть дифференциальное уравнение возмущенного движения замкнутой линейной системы стабилизации «подвижный объект – стабилизатор» в общем случае записывается

$$\overset{\circ}{X}(t) = A(\alpha, \beta)X(t), \quad (1)$$

где  $\overset{\circ}{X}(t)$  –  $n$ -мерный вектор состояния объекта;  $\alpha \in G_\alpha$  –  $m$ -мерный вектор параметров стабилизатора;  $\beta \in G_\beta$  –

варируемый параметр, значения которого изменяются в процессе эксплуатации объекта. Требуется отыскать оптимальный вектор  $\alpha^* \in G_\alpha$ , обеспечивающий максимальную точность стабилизации системы (1), в смысле минимума интегрального квадратичного функционала

$$J(\alpha, \beta_0) = \int_0^T \langle X(t), QX(t) \rangle dt, \quad (2)$$

при непрерывных вариациях конструктивного параметра  $\beta \in G_\beta$  причем через  $\beta_0$  обозначено номинальное значение параметра  $\beta$ .

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Введем в рассмотрение вектор чувствительности [3, 4]

$$S(t) = \frac{\partial X(t)}{\partial \beta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_1(t)}{\partial \beta} \\ \frac{\partial x_2(t)}{\partial \beta} \\ \vdots \\ \frac{\partial x_n(t)}{\partial \beta} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

удовлетворяючий векторно-матричному дифференциальному уравнению

$$\begin{aligned}\overset{\circ}{S}(t) &= \frac{\partial X(t)}{\partial \beta} = \frac{\partial}{\partial \beta} [A(\alpha, \beta)X(t)] = \\ &= \left[ \frac{\partial}{\partial \beta} A(\alpha, \beta) \right]_{\beta=\beta_0} X(t) + A(\alpha, \beta) \frac{\partial X(t)}{\partial \beta}\end{aligned}\quad (4)$$

с начальным условием  $S(0) = 0$ .

С учетом (3) уравнение (4) принимает вид

$$\overset{\circ}{S}(t) = \left[ \frac{\partial}{\partial \beta} A(\alpha, \beta) \right]_{\beta=\beta_0} X(t) + A(\alpha, \beta)S(t). \quad (5)$$

Запишем функцию чувствительности интегрального квадратичного функционала (2)

$$\begin{aligned}s_{n+1}(\alpha, \beta) &= \frac{\partial J(\alpha, \beta_0)}{\partial \beta} = \int_0^T \left\langle \frac{\partial \langle X(t), QX(t) \rangle}{\partial X(t)}, \frac{\partial X(t)}{\partial \beta} \right\rangle dt = \\ &= \int_0^T \langle QX(t), S(t) \rangle dt\end{aligned}\quad (6)$$

Функция чувствительности (6) является количественной оценкой робастности замкнутой системы (1) к изменению конструктивного параметра  $\beta$ . Чем меньше значение модуля функции чувствительности (6), вычисленной на решениях уравнений (1) и (5), тем выше показатель робастности замкнутой системы стабилизации.

К векторным дифференциальным уравнениям (1) и (5) добавим еще два скалярных уравнения

$$x_{n+1}(t) = \langle X(t), QX(t) \rangle; \quad (7)$$

$$s_{n+1}(t) = \langle S(t), QX(t) \rangle \quad (8)$$

с нулевыми начальными условиями. Тогда, сравнивая соотношения (2) и (6) с уравнениями (7) и (8), можно записать

$$J(\alpha, \beta_0) = x_{n+1}(T); \quad s_{n+1}(\alpha, \beta) = s_{n+1}(T).$$

Сформируем аддитивный функционал

$$J(\alpha, \beta_0, \gamma_1, \gamma_2) = \gamma_1^2 x_{n+1}(T) + \gamma_2^2 |s_{n+1}(T)|, \quad (9)$$

где  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – весовые коэффициенты, подлежащие выбору. Минимизация функционала (9), вычисляемого на решениях системы дифференциальных уравнений (1), (5), (7) и (8), по  $\alpha \in G_\alpha$  приводит к отысканию оптимального вектора  $\alpha^* \in G_\alpha$ , обеспечивающего высокую точность стабилизации замкнутой системы (1) при непрерывных вариациях конструктивного параметра  $\beta \in G_\beta$ .

Рассмотрим задачу выбора весовых коэффициентов аддитивного функционала (9).

Функционалы (2) и (6) имеют различные размерности, следовательно, различные размерности имеют также весовые коэффициенты  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ .

В этой связи введем обозначения

$$\bar{x}_{n+1}(T) = \frac{x_{n+1}(T)}{x_{n+1}^{\max}(T)};$$

$$\bar{s}_{n+1}(T) = \frac{s_{n+1}(T)}{s_{n+1}^{\max}(T)}. \quad (10)$$

$$\bar{\gamma}_1 = \gamma_1 \sqrt{x_{n+1}^{\max}(T)};$$

$$\bar{\gamma}_2 = \gamma_2 \sqrt{s_{n+1}^{\max}(T)}, \quad (11)$$

где  $x_{n+1}^{\max}(T)$ ,  $s_{n+1}^{\max}(T)$  – максимально допустимые значения функционалов (2) и (6), вычисленных на множестве  $G_\alpha$ . Тогда аддитивный функционал (9) принимает вид

$$J(\alpha, \beta_0, \bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2) = \bar{\gamma}_1^2 \bar{x}_{n+1}(T) + \bar{\gamma}_2^2 |\bar{s}_{n+1}(T)|, \quad (12)$$

причем в соотношении (12) функционалы  $\bar{x}_{n+1}(T)$  и  $|\bar{s}_{n+1}(T)|$ , а также весовые коэффициенты  $\bar{\gamma}_1$  и  $\bar{\gamma}_2$  безразмерны.

Минимизация функционала (12) при заданных значениях весовых коэффициентов  $\bar{\gamma}_1$  и  $\bar{\gamma}_2$  не вызывает затруднений. В то же время, попытка минимизации функционала (12) по  $\bar{\gamma}_1$  и  $\bar{\gamma}_2$  без ограничений на эти коэффициенты приводит к тривиальному решению  $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = 0$ , при котором функционал (12) обращается в нуль. В этой связи на величины весовых коэффициентов  $\bar{\gamma}_1$  и  $\bar{\gamma}_2$  наложим ограничение

$$\bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2 = 1. \quad (13)$$

Обозначим через  $\bar{x}_{n+1}^*(T)$  и  $|\bar{s}_{n+1}(T)|^*$  минимальные значения функционалов (10), которые имеют место при минимизации каждого из этих функционалов в отдельности. Тогда при фиксированных значениях весовых коэффициентов  $\bar{\gamma}_1$  и  $\bar{\gamma}_2$  минимально возможное значение функционала (12) составляет

$$J(\alpha, \beta_0, \bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2) = \bar{\gamma}_1^2 \bar{x}_{n+1}^*(T) + \bar{\gamma}_2^2 |\bar{s}_{n+1}(T)|^*. \quad (14)$$

Отыщем минимум функционала (14) по  $\bar{\gamma}_1$  и  $\bar{\gamma}_2$  при ограничении (13). Для решения этой задачи на условный экстремум построим функцию Лагранжа

$$F(\alpha, \beta_0, \bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2) = \bar{\gamma}_1^2 \bar{x}_{n+1}^*(T) + \bar{\gamma}_2^2 |\bar{s}_{n+1}(T)|^* +$$

$$+\lambda(1-\bar{\gamma}_1-\bar{\gamma}_2) \quad (15)$$

и запишем умови мінімуму функції (15):

$$\frac{\partial F(\alpha, \beta_0, \bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2)}{\partial \bar{\gamma}_1} = 2\bar{\gamma}_1 x_{n+1}^*(T) - \lambda = 0; \quad (16)$$

$$\frac{\partial F(\alpha, \beta_0, \bar{\gamma}_1, \bar{\gamma}_2)}{\partial \bar{\gamma}_2} = 2\bar{\gamma}_2 |\bar{s}_{n+1}(T)|^* - \lambda = 0. \quad (17)$$

Із уравнений (16) і (17) знаходимо

$$\bar{\gamma}_1 = \frac{\lambda}{2x_{n+1}^*(T)}; \quad \bar{\gamma}_2 = \frac{\lambda}{2|\bar{s}_{n+1}(T)|^*}. \quad (18)$$

Резюмуючи зазначене, можна вказати наступний алгоритм розв'язання проблеми параметрического синтезу оптимального робастного стабілізатора подвижного об'єкта:

– використовуючи векторне дифференціальне уравнення возмущеного руху замкненої системи стабілізації подвижного об'єкта (1) і вводячи в розгляд вектор чутливості (3), складаємо векторне дифференціальне уравнення чутливості (5);

– до векторних дифференціальних уравнень (1) і (5) додаємо два скалярні уравнення (7) і (8), що виконують вимоги робастності замкненої системи стабілізації;

– використовуючи один з відомих числових методів оптимізації [5], на розв'язаннях системи дифференціальних уравнень (1), (7) з початковими умовами  $X(0), x_{n+1}(0) = 0$  знаходимо мінімум функції  $x_{n+1}(T) = x_{n+1}^*(T)$  по векторному параметру  $\alpha \in G_\alpha$ ;

– на розв'язаннях системи дифференціальних уравнень (1), (5), (8) з початковими умовами  $X(0), S(0) = 0, s_{n+1}(0) = 0$  знаходимо мінімум функції  $|s_{n+1}(T)| = |s_{n+1}(T)|^*$  по векторному параметру  $\alpha \in G_\alpha$ ;

– використовуючи формули (22) і (23) знаходимо значення вагових коефіцієнтів  $\gamma_1$  і  $\gamma_2$  аддитивного функціонала (9);

– використовуючи один з числових методів оптимізації, на розв'язаннях системи дифференціальних уравнень (1), (5), (7), (8) з початковими умовами  $X(0), S(0) = 0, x_{n+1}(0) = 0, s_{n+1}(0) = 0$  знаходимо мінімум аддитивного функціонала (9) по векторному параметру  $\alpha \in G_\alpha$ .

Получене значення  $\alpha^* \in G_\alpha$  забезпечує високу точність стабілізації подвижного об'єкта і одночасно робастність замкненої системи стабілізації до змін конструктивного параметра  $\beta \in G_\beta$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розенвассер, Е. Н. Чутливість систем автоматичного управління / Е. Н. Розенвассер, Р. М. Юсупов. – Л. : Енергія, 1971. – 292.
2. Томович, Р. Общая теория чувствительности / Р. Томович, М. Вукобратович. – М. : Сов. Радио, 1972. – 240 с.
3. Александров, Е. Е. Автоматизированное проектирование динамических систем с помощью функций Ляпунова / Е. Е. Александров, М. В. Бех. – Х. : Основа, 1993. – 113 с.
4. Александров, Е. Е. Синтез робастного стабилизатора для позиционного электропривода / Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, И. В. Костянк // Технічна електродинаміка. Спеціальний випуск «Силова електроніка та енергоефективність». – 2010. – Ч. 1. – С. 178–181.
5. Химмельблau, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблau. – М. : Мир, 1975. – 534 с.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2012.

Александрова Т. Є.

## ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНИХ РОБАСТНИХ СТАБІЛІЗАТОРІВ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ

Розглядається проблема синтезу оптимального за точністю стабілізатора рухомого об'єкта з урахуванням вимоги робастності замкненої системи стабілізації до зміни конструктивних параметрів об'єкта.

**Ключові слова:** робастні системи, функції чутливості, інтегральний квадратичний функціонал, вагові коефіцієнти.

Alexandrova T. Ye.

## PARAMETRIC SYNTHESIS OF ROBUST OPTIMAL STABILIZERS OF MOVING OBJECTS

The problem of optimal synthesis for the accuracy of the stabilizer of a moving object with the requirement of robustness of the closed-loop system stability to changes in design parameter of the object.

**Key words:** robust system, the sensitivity function, the integral quadratic functional, the weights.

УДК 007:681.516.4

Лозинський А.О.<sup>1</sup>, Демків Л.І.<sup>2</sup>
<sup>1</sup>Д-р техн. наук Національного університету «Львівська політехніка»  
<sup>2</sup>Канд. фіз.-мат. наук Національного університету «Львівська політехніка»

## СИНТЕЗ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ЗІ ЗМІННИМИ ВАГОВИМИ КОЕФІЦІЄНТАМИ

Розглянуто динамічні системи з нечітким регулятором Такагі-Сугено. Запропоновано новий підхід до побудови функціонала при багатокритеріальній оптимізації, який, на відміну від традиційного, передбачає зміну вагових множників інтегральних критеріїв якості в часі.

**Ключові слова:** нечітка логіка, функція належності, функціонал якості, багатокритеріальна оптимізація.

### ВСТУП

На сьогоднішній день для технічних систем традиційно використовують підходи які є досить добре відомі в теорії лінійних систем. Зокрема, метод аналітичного конструювання регуляторів [1], методи максимуму Понтрягіна, та динамічного програмування Белмана [11], [6], а також кореневі методи пошуку. Недоліком цих підходів є те, що вони не враховують зміни умов роботи системи, зміни параметрів об'єкту тощо.

Використання методів нелінійної теорії керування, зокрема feedback лінеаризації [8], не знайшло широкого застосування через складність визначення агрегованих змінних в технічних системах. Так само, на сьогоднішній день недостатньо поширеними є методи геометричної теорії керування [2].

Спроба адаптації керуючих впливів до стану об'єкта умов протікання технологічного процесу шляхом формування систем з перемиканням та забезпеченням ковзних режимів вздовж заданих траекторій приводить до можливого виникнення автоколивань або до, так званої, надкерованості.

Нечітке прийняття рішень та нечітка логіка також є корисними інструментами для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації. Shin i Chang [12] запропонували підхід глобального критерію на основі нечіткої логіки для отримання розв'язків для багатокритеріально-го чіткого або нечіткого синтезу регулятора. Loetamonphong [9] вивчав задачі оптимізації, які мають багатоцільові функції з нечіткими обмеженнями типу рівність. Huang [7] запропонував метод нечіткої багатокритеріальної оптимізації прийняття рішень, що може застосовуватись для оптимізації прийняття рішень при двох або більше цілях надійності системи.

Одним з можливих шляхів оптимізації систем є застосування нечіткого регулятора Такагі-Сугено. Виходом цього регулятора є керуючий вплив характерний для систем керування за повним вектором стану. Таким чином для окремого правила синтез керуючих впливів є можливим на основі класичної теорії лінійних систем.

При цьому використовують модель об'єкта яка є лінеаризованою в даній області з врахуванням всіх накладених

обмежень, які діятимуть в цій області. Зокрема, таку техніку застосовано в роботах Mitsuishi T., Shidama, Y. [10].

Застосовуючи, наприклад, метод динамічного програмування Белмана, можна врахувати різноманітні обмеження, необхідні для нормального функціонування системи, такі як, наприклад, обмеження на швидкодію, що може бути корисним для систем з люфтами, підіймально-транспортної техніки тощо. При зміні робочої області буде синтезовано інший керуючий вплив, який буде оптимальним для даної точки області станів системи. При цьому для його синтезу можна використовувати модель, отриману шляхом лінеаризації нелінійної системи в даній точці.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На сьогоднішній день немає загальних підходів до синтезу нечіткого регулятора. В той же час, для системи з нечітким регулятором Такагі-Сугено керуючий вплив для окремого правила може бути синтезований на основі методів синтезу систем керування за повним вектором станів. Синтезуючи такі регулятори, ми приходимо до структури, яку можна представити у вигляді

$$u(t) = \sum_i \lambda_i(\bar{x}) u_i,$$

де  $u_i = u(\bar{x}(t), \bar{k})$  – вектор-функція,  $\bar{k}$  – вектор коефіцієнтів.

Враховуючи те, що технічні системи можуть працювати в різних точках простору станів, для яких характерні різні обмеження і висуваються різні вимоги до якості керування, традиційно використовують компромісне налаштування і формують керуючий вплив на основі критерію

$$J = \int_0^{\infty} \left( \sum_i \lambda_i F_i^*(\bar{x}(t)) + u^2(t) \right) dt,$$

де  $\lambda_i$  – постійні коефіцієнти, визначені на основі експериментальних оцінок, а  $F_i^*(\bar{x}(t))$  – довільні функціонали якості, що забезпечують бажану поведінку системи.

Для динамічної системи, заданої диференціальним рівнянням

$$\bar{x}'(t) = f(\bar{x}(t)) + g(\bar{x}(t))\bar{u}(t) + \xi(t),$$

де  $\bar{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ ,  $x_1(t) = x(t)$ ,  $x_2(t) = x'(t)$ ,  $x_2(t) = x''(t), \dots, x_n(t) = x^{(n-1)}(t)$ ,  $\bar{u}(t)$  – вектор керуючих впливів,  $\bar{\xi}(t)$  – зовнішні збурюючі впливи,  $f(\bar{x}(t))$  та  $g(\bar{x}(t))$  – нелінійні функції, описані в області робочих точок системи, застосувавши підхід, описаний в [3, 4], приходимо до моделі, що формується набором правил виду (див. [13]):

$$R^i : \text{IF } x_1 \in M_1^i \text{ i } x_2 \in M_2^i \text{ i } \dots x_n \in M_n^i \text{ THEN } \dot{\bar{x}}(t) = A_i \bar{x}(t) + B_i \bar{u}(t).$$

У випадку керування за повним вектором стану, синтезованого для окремої підсистеми сімейства лінійних систем, при використанні гравітаційного методу дефазифікації отримаємо загальну модель системи

$$3 \dot{\bar{x}}(t) = \sum_{i=1}^k v_i(\bar{x}) \left( A_i + B_i \sum_{j=1}^k \mu_j(\bar{x}) K_j \right) \bar{x}(t),$$

$$\text{де } v_i = v_i(\bar{x}) = \frac{\prod_{j=1}^n M_j^i(x_j(t))}{\sum_{i=1}^k \prod_{j=1}^n M_j^i(x_j(t))}, \quad \mu_i = \mu_i(\bar{x}) = \frac{\prod_{j=1}^n N_j^i(x_j(t))}{\sum_{i=1}^k \prod_{j=1}^n N_j^i(x_j(t))},$$

$M_j^i(x_j(t))$ ,  $N_j^i(x_j(t))$  – функції належності  $x_j(t)$  до відповідної області  $M_j^i$  чи  $N_j^i$ ,  $\sum_{i=1}^k v_i = 1$ ,  $\sum_{i=1}^k \mu_i = 1$ .

Синтезоване для кожної з підсистем оптимальне керування  $u(t) = u^*(t)$  забезпечує мінімізацію окремого функціоналу  $F_i$ , сформованого для  $i$ -тої точки простору станів. У класичній теорії керування при знаходженні оптимального керування для всієї системи узагальнений функціонал мав би вигляд

$$I = \sum_i \lambda_i F_i,$$

де  $i$  – індекс моделі окремої підсистеми,  $\lambda_i = \text{const}$  визначається на основі експертних оцінок чи теорії Парето оптимальних рішень.

При застосуванні теорії нечітких множин ми приходимо до функціоналу виду

$$\begin{aligned} I &= \sum_i v_i(t) F_i, \\ \sum_i v_i(t) &= 1, \end{aligned}$$

де  $v(t)$  – змінні в часі коефіцієнти, які визначаються видом функцій належності, їх розміщенням, прийнятим методом дефазифікації та сформованою базою правил.

Таким чином, ми не формуємо якусь траекторію, яка оптимальна для всіх підсистем сімейства, а реалізуємо перехід від однієї оптимальної траекторії до іншої, визначеній для окремої підсистеми. Такий підхід дає змогу покращити якісні характеристики системи.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для дослідження цього явища розглянемо двомасову систему, яка описується системою диференціальних рівнянь, знехтувавши, при цьому, електромагнітними явищами в двигуні

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \frac{1}{T_{M_1}}(u(t) - x_2(t)), \\ \dot{x}_2(t) = \frac{1}{T_C}(x_1(t) - x_3(t)), \\ \dot{x}_3(t) = \frac{1}{T_{M_2}}x_2(t), \\ x_i(0) = 0, i = \overline{1..3}. \end{cases}$$

Оптимальне керування, лінеаризоване в околі окремої робочої точки, системою шукають за допомогою функціоналу

$$\begin{aligned} J &= \int_0^\infty F(\bar{x}(t)) dt = \int_0^\infty (F^*(\bar{x}(t)) + u^2(t)) dt = \\ &= \int_0^\infty ((x^2(t) + \gamma_1 \dot{x}^2(t) + \gamma_2 \ddot{x}^2(t) + \gamma_3 \ddot{x}^2(t)) + u^2(t)) dt, \end{aligned}$$

де  $x(t) = x_3(t)$ , а  $\gamma_i$ ,  $i = \overline{1..3}$  – коефіцієнти, які визначають поведінку системи. У випадку, якщо функціонал якості має вигляд

$$F_1^*(\bar{x}(t)) = x^2(t) + \omega_0^{-6} \ddot{x}(t),$$

то згідно з [5] система налаштована на стандартну форму Батервортса, де  $\omega_0$  – значення середнього геометричного кореня. Якщо ж функціонал має вигляд

$$F_2^*(\bar{x}(t)) = x^2(t) + 3\omega_0^{-2} \dot{x}(t) + 3\omega_0^{-4} \ddot{x}(t) + \omega_0^{-6} \ddot{x}(t),$$

то (див. [5]) система налаштована на біном.

Для цих функціоналів якості оптимальне керування матиме вигляд

$$\begin{aligned} u_1^{opt}(t) &= (\omega_0 + 1) T_{M_1} \ddot{x}(t) + \\ &+ (T_C T_{M_1} T_{M_2} \omega_0^3 - (\omega_0 + 1) T_{M_1}) x(t) + \\ &+ \left( \left( \omega + \omega^2 - \frac{1}{T_C T_{M_2}} \right) T_C T_{M_1} - 1 \right) \dot{x}(t) \end{aligned}$$

у випадку налаштування на форму Батервортата

$$u_2^{opt}(t) = 3\omega_0 T_{M_1} \ddot{x}(t) + \left( \left( 3\omega_0^2 - \frac{1}{T_C T_{M_2}} \right) T_C T_{M_1} - 1 \right) \dot{x}(t) + \\ + \left( T_C T_{M_2} T_{M_1} \omega_0^3 - 3 T_{M_1} \omega_0 \right) x(t).$$

(у випадку налаштування на стандартну біноміальну форму).

У випадку компромісного налаштування системи, що складається з двох підсистем

$$J = \int_0^{\infty} \left( \lambda_1 F_1^*(\bar{x}(t)) + \lambda_2 F_2^*(\bar{x}(t)) + u^2(t) \right) dt,$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = 1,$$

де  $F_1^*(\bar{x}(t))$  та  $F_2^*(\bar{x}(t))$  описано вище, а  $\lambda_1$  та  $\lambda_2$  стали вагові коефіцієнти, оптимальне керування матиме вигляд

$$u^{opt}(t) = \left( 1 + \sqrt{1 + 3\lambda_1} \right) \omega_0 T_{M_1} \ddot{x}(t) + \\ + \left( \left( 1 + \sqrt{1 + 3\lambda_1} \right) \omega_0^2 - \frac{1}{T_C T_{M_2}} \right) T_C T_{M_1} - 1 \right) \dot{x}(t) + \\ + \left( T_C T_{M_1} T_{M_2} \omega_0^3 - \left( 1 + \sqrt{1 + 3\lambda_1} \right) \omega_0 T_{M_1} \right) x(t).$$

Однак, при такому підході, значення коефіцієнтів  $\lambda_i$  не залежать від стану системи в даний момент часу.

При застосуванні згаданого вище підходу такий критерій формуватиметься у вигляді

$$J = \int_0^{\infty} \left( \sum_i \lambda_i (\bar{x}(t)) F_i^*(\bar{x}(t)) + u^2(t) \right) dt, \\ \sum_i \lambda_i (\bar{x}(t)) = 1,$$

що є характерним для систем з фаззі-керуванням з використанням регулятора Такагі-Сугено.

Враховуючи те, що ваговий множник залежить від точки простору станів, в якій зараз перебуває система, приходимо до формування траекторії системи як набору оптимальних траекторій для окремих областей.

Кожна з підсистем може формувати різні типи переходів з різними швидкостями. Можливим є формування різних траекторій переходу до заданої точки простору вихідних сигналів системи, використовуючи регулювання, в якому відбувається перехід між керуючими впливами.

Зокрема, при класичному підході при  $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,5$  отримаємо оптимальне управління, яке формуватиме траекторію «1», яка лежатиме в області, обмежений «2» та «3». При запропонованому підході траекторія зміни координати «4» (рис. 1) формуватиметься з участків траекторій «2» (Батерворт) та «3» (Біном), а перехід з однієї на іншу буде визначатися формуванням функції належності  $\lambda_i(x)$ .

Як видно з рис. 1, запропонований підхід дозволяє синтезувати оптимальне керування для виходу на заданий рівень функціонування. Але, в наслідок прийнятого

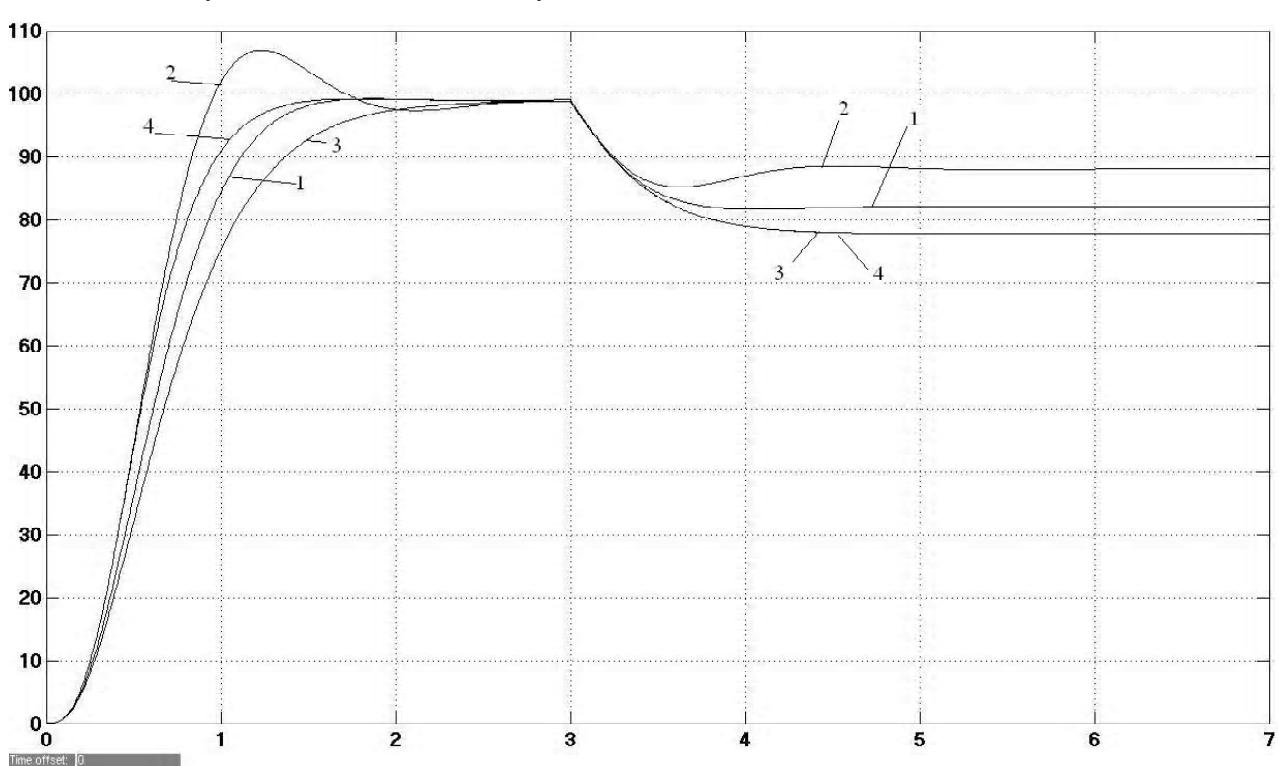


Рис. 1. Результати симуляції при дії зовнішнього навантаження в момент часу, рівний 3 с

розділу параметрів функції належності, система буде мати гірші характеристики при відпрацюванні збурень. Ми можемо виправити цю ситуацію, змінивши параметри функції належності після виходу системи на заданий рівень функціонування, наприклад, можна налаштувати систему на максимальну швидкодію за умови відсутності перерегулювань.

## ВИСНОВКИ

Робота присвячена дослідженню синтезу багатокритеріального оптимального керування зі змінними коефіцієнтами. Запропоновано підхід формування функціоналу як комбінації функціоналів зі змінними в часі ваговими коефіцієнтами. Даний підхід може бути використаний в багатьох системах, для яких характерні різного роду технічні обмеження. Проведені, на прикладі динамічної системи третього порядку, експерименти показали, що такий спосіб задання вагових коефіцієнтів забезпечує виграш у функціонуванні в порівнянні з традиційним підходом.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Колосников, А. А. Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.
2. Краснощеченко, В. И. Нелинейные системы : геометрический метод анализа и синтеза / В. И. Краснощеченко, А. П. Грищенко. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. – 520 с.
3. Лозинський, А. О. Дослідження стійкості систем з регулятором Такагі-Сугено-Кангі / А. О. Лозинський // Вісник НТУ «ХПІ» «Проблемы автоматизированного электропровода». – 2008. – Т. 30. – С. 89–90.
4. Лозинський, А. О. Аналіз стійкості систем з регулятором Такагі-Сугено / А. О. Лозинський, Л. І. Демків // ППШ МОН і НАН України «Наука і освіта». – 2008. – Т. 4. – С. 545–549.
5. Марущак, Я. Ю. Використання стандартних форм розподілу коренів при синтезі електромеханічних систем методом параметричної оптимізації / Я. Ю. Марущак // Вісник Харківського Національного політехнічного університету. Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – 2001. – № 10. – С. 88–90.
6. Фельдбаум, А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А. А. Фельдбаум. – М. : Наука, 1966. – 624 с.
7. Huang, H. Z. Fuzzy multi-objective optimization decision-making of reliability of series system / H. Z. Huang // Microelectronics Reliability. – 1997. –V. 37, No. 37. – P. 447–449.
8. Isidori, A. Nonlinear control systems / A. Isidori. – Springer-Verlag, 1995. – 550 p.
9. Loetamonphong, J. Multi-objective optimization problems with fuzzy relation equation constrains / J. Loetamonphong, S.C. Fang, R.E. Young // Fuzzy Sets and Systems. – 2002. – No. 127. – P. 141–164.
10. Mitsuishi, T. Minimization of Quadratic Performance Function in T-S Fuzzy Model / T. Mitsuishi, Y. Shidama // FUZZ-IEEE'02. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. – 2002. – P. 75–79.
11. Naidu, D. S. Optimal control systems / D. S. Naidu. – CRC Press, 2002. – 433 p.
12. Shih, C. J. Pareto optimization of alternative global criterion method for fuzzy structural design / C. J. Shih, C. J. Chang // Computers and Structures. – 1995. –V. 54, No. 3. – P. 455–460.
13. Takagi, T. Fuzzy identificationof systems and its application to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno // IEEE Trans. on Syst. – 1985. –V. SMC-15, No. 1. – P. 116–132.

Стаття надійшла до редакції 11.01.2012.  
Після доробки 23.02.2012.

Лозинський А. О., Демків Л. І.

СИНТЕЗ МНОГОКРИТЕРІАЛЬНОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРЕМЕННЫМИ ВЕСОВЫМИ КОЭФФІЦІЕНТАМИ

Рассмотрены динамические системы с нечетким регулятором Такаги-Сугено. Предложен новый подход к построению функционала при многокритериальной оптимизации, который, в отличие от традиционного, предусматривает изменение весовых множителей интегральных критерия качества во времени.

**Ключевые слова:** нечеткая логика, функция принадлежности, функционал качества, многокритериальная оптимизация.

Lozynsky A. O., Demkiv L. I.

SYNTHESIS OF MULTICRITERIAOPTIMAL CONTROLWITH VARIABLEWEIGHTS

In paper the dynamical systems with Takagi-Sugeno fuzzy controller are considered. A new approach to constructing functional for multicriteria optimization is suggested, which, unlike traditional, allows the change of weight multipliers of integral quality criteria in time.

**Key words:** fuzzy logic, membership function, functional of quality,multicriteria optimization.

# УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

---

УДК 004.8+004.312:644.1

Бушер В. В.

Канд. техн. наук, доцент Одесского национального политехнического университета

## ОПТИМАЛЬНЫЕ АСТАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ДРОБНЫМИ ИНТЕГРАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИРУЮЩИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

---

Исследованы замкнутые системы с дробным порядком астатизма от 0,5 до 2. Найдены соотношения параметров дробных пропорционально-интегрирующих и интегрально-дифференцирующих регуляторов, обеспечивающих оптимальные динамические и статические характеристики систем. Предложены методы расчета сигналов дробных регуляторов для применения в микропроцессорных системах управления.

**Ключевые слова:** астатическая система, дробное интегрирование, дробное дифференцирование.

#### ВВЕДЕНИЕ

При синтезе замкнутых систем управления для устранения статической ошибки по заданию и возмущению в контур включают интегрирующее звено требуемого порядка, а устойчивость и желаемые динамические показатели обеспечивают дополнительными форсирующими звенями. Однако возможности настройки получаемых ПИ- или ПИД-регуляторов не всегда позволяют получить оптимальное сочетание быстродействия, перерегулирования и точности. А в некоторых случаях (например, в климатических установках, в электротехнических устройствах с суперконденсаторами), объект управления описывается дифференциальными уравнениями дробного порядка [1]. Тогда параметры ПИ- или ПИД-регуляторов подбирают по упрощенным моделям с целочисленным порядком, в результате чего добиться соответствия между теоретическими и реальными показателями систем оказывается невозможно. Существенное улучшение сочетания всех показателей может быть получено за счет использования регуляторов с дробным порядком интегрирования, обеспечивающих соответственно дробный порядок астатизма замкнутого контура.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является синтез систем управления с дробным порядком астатизма в пределах 0,5...2, обеспе-

чивающий заданные динамические и статические показатели, с использованием дробных интегрально-дифференцирующих регуляторов.

Рассмотрим систему с единичной отрицательной обратной связью, передаточная функция разомкнутого контура которой

$$H_{\text{ОПТ}}(p) = \frac{bT_v p + 1}{aT_v p^{\mu} (T_v p + 1)}, \quad (1)$$

где  $a, b$  – параметры настройки;  $T_v$  – некомпенсируемая малая постоянная времени объекта управления;  $\mu$  – выбираемый порядок астатизма. Рассмотрим системы с  $\mu \geq 0,5$ , так как дробно-дифференциальные уравнения именно такого порядка описывают некоторые физические процессы, в частности, изменение температуры в объектах управления климатических систем, диффузионные процессы при заряде/разряде суперконденсаторов.

В зависимости от  $\mu, a, b$  могут быть получены различные показатели качества замкнутого контура. В частности, хорошо известны соотношения настроек на модульный ( $\mu = 1, a = 2, b = 0$ ) и симметричный ( $\mu = 2, a = 8, b = 4$ ) оптимумы с целочисленным порядком астатизма. Необходимо отметить, что при  $\mu \in [0,5; 1]$  в (1) можно принять

$b = 0$ , так как даже такая система характеризуется приемлемыми запасами устойчивости.

Исследуем реакцию системы  $Y(t)$  на единичный скачок на некотором временном интервале, соответствующем расчету  $N$  точек переходного процесса с шагом  $\Delta t$ . Чтобы обеспечить высокое быстродействие и минимальное перерегулирование при выборе параметров настройки, зададим критерий оценки качества системы следующим образом:

$$F = \sum_{i=1}^N \begin{cases} (1 - Y_i) & \text{при } Y_i < 1 \\ \left(\frac{1}{\delta}(1 - Y_i)\right)^2 & \text{при } Y_i > 1 \end{cases} \rightarrow \text{Min}, \quad (2)$$

где  $\delta$  – допустимое перерегулирование.

При такой постановке задачи  $F(\mu, a, b)$  имеет минимумы во всем исследуемом диапазоне  $\mu$ .

Зададимся  $\delta = 0,05$ , удовлетворяющим требованиям большинства технических систем. На рис. 1, *a* показаны графики зависимостей  $F(\mu, a)$  в диапазоне  $\mu \in [0, 5; 1]$ . На рис. 1, *б* в качестве примера показаны зависимости  $F(\mu, a, b)$  при  $\mu = 1,5$ , а на рис. 1, *в* – семейства экстремальных точек при некоторых  $\mu \in [1; 2]$ .

Интерполяция полученных результатов с помощью инженерного пакета программ DataFit позволила получить приближенные аналитические зависимости между параметрами  $\mu, a, b$ , при которых достигаются минимальные значения  $F$ . В области  $\mu \in [0, 5; 1]$  зависимость между заданным  $\mu$  и оптимальным значением  $a$  приближенно описывается выражением

$$a = \frac{\mu}{4,683 - 5,897\mu + 1,595\mu^2}. \quad (3)$$

В области  $\mu \in [1; 2]$  зависимости между заданным  $\mu$  и оптимальными значениями  $a$  и  $b$  приближенно описываются выражениями

$$\begin{aligned} a &= \exp(-10,27 + 7,831\mu), \\ b &= 7,336 + 0,792a + 3,83 \ln(a). \end{aligned} \quad (4)$$

Расчеты переходных процессов для найденных оптимальных соотношений параметров, выполненные при различных  $\mu \in [0, 5; 2]$ , показали, что система с дробным порядком астатизма может превосходить системы с классическими настройками на модульный (МО) и симметричный (СО) оптимумы по совокупности показателей. В частности, при перерегулировании не более 3 % время первого согласования может быть уменьшено в 3–6 раз. Однако при  $\mu \in [0, 5; 1]$  финальная часть переходного процесса затянута, после достижения максимума наступает просадка выходного сигнала до 7 %. При подаче линейно-возрастающего сигнала такая система будет характеризоваться возрастающей скоростной ошибкой.

Если такие свойства неприемлемы, то задаваясь  $1 < \mu < 2$ , можно сохранить желаемое быстродействие,

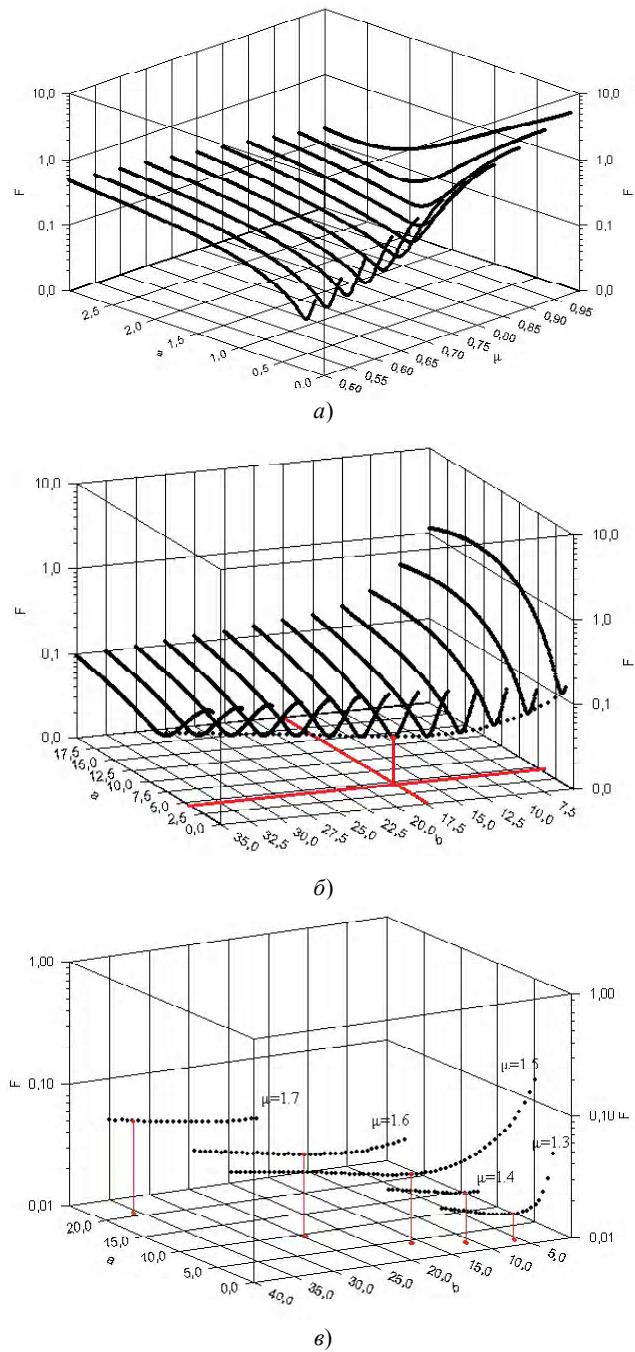


Рис. 1. Зависимости  $F(\mu, a, b)$

уменьшить просадку сигнала до 3 %, обеспечить отсутствие статической ошибки при подаче скачка и уменьшить скоростную ошибку при линейно-возрастающем за дающем сигнале. На рис. 2 показаны нормированные во времени (по оси абсцисс отложено  $t / T_v$ ) графики переходных процессов при единичном скачке задания для систем с  $0,5 \leq \mu \leq 1$  (рис. 2, *a*) и  $1 < \mu < 2$  (рис. 2, *б*).

Желаемое значение  $\mu$  может быть выбрано равным порядку дробно-инерционного звена или дробно-интегрирующего звена в объекте управления. Но может быть также выбрано по представленным на рис. 2 нормированным графикам переходных процессов, исходя из требуемого быстродействия системы.

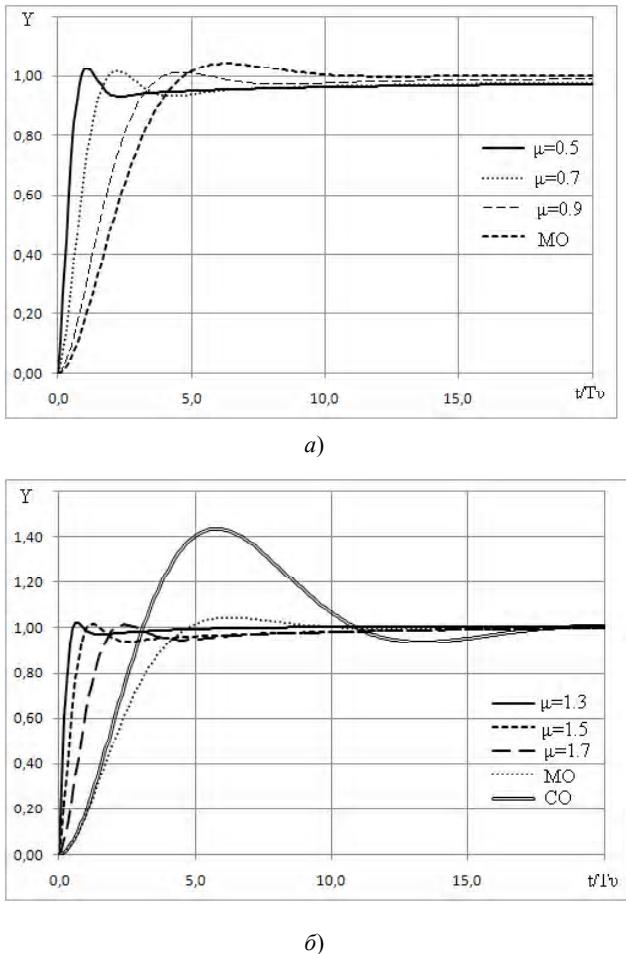


Рис. 2. Нормовані переходні функції

Для обсяження настройки (1) об'єкта управління з передатичною функцією  $H_{OY}(p)$  необхідно использовать регулятор, передаточна функція якого определяється з виразення

$$H_{PEG}(p) = \frac{H_{OY}(p)}{H_{OY}(p)}. \quad (5)$$

В случаї, якщо об'єкт управління являється реальним дробно-інерционним звеном

$$H_{OY}(p) = \frac{k_{OY}}{\left(T_{OY} p^{\mu_{OY}} + 1\right)(T_v p + 1)}, \quad (6)$$

необходимо использовать регулятор з передатичною функцією

$$H_{PEG}(p) = \begin{cases} \frac{T_{OY}}{k_{OY} a T_v p^{\mu - \mu_{OY}}} + \frac{1}{k_{OY} a T_v p^\mu} \\ \text{при } \mu \in [0, 5; 1] \\ \left( \frac{b}{a} + \frac{1}{a T_v p} \right) \left( \frac{T_{OY}}{k_{OY} p^{\mu - 1 - \mu_{OY}}} + \frac{1}{k_{OY} p^{\mu - 1}} \right) \\ \text{при } \mu \in [1; 2]. \end{cases} \quad (7)$$

Аналіз (7) показує, що при  $\mu \in [0, 5; 1]$  і  $\mu = \mu_{OY}$  необхідний дробний ПІ-регулятор, коли  $\mu < \mu_{OY}$  – дробний ІД-регулятор, а якщо  $\mu > \mu_{OY}$  – дробний інтегральний регулятор з двома складовими (ІІ-регулятор). В то ж час, при  $\mu \in [1; 2]$  і  $\mu - 1 = \mu_{OY}$  необхідно использовать послідовно зв'язані ПІ- і дробний ПІ- регулятори, коли  $\mu - 1 < \mu_{OY}$  – послідовно зв'язані ПІ- і дробний ІД-регулятори, а якщо  $\mu - 1 > \mu_{OY}$  – послідовно зв'язані ПІ- і дробний ІІ-регулятори.

Очевидно, що аналогичний аналіз може бути выполнено и для об'єктів управління з іншими передаточними функціями.

Расчет дробно-інтегральної  $U_H^\mu$  і дробно-дифференцируючої  $U_D^\mu$  складових сигналів регуляторів при подачі на вход сигналу  $X$  може бути выполнено в соответствии з модифікованим определением дробного інтеграла в формі Римана-Ліувілля для численного інтегрування з кроком  $\Delta t$

$$\begin{aligned} U_{Hi}^\mu &= \frac{\Delta t^\mu}{\Gamma(\mu)} \sum_{j=1}^i X_{i-j+1} k_j^\mu, \\ U_{Di}^{\mu_d} &= \frac{U_{Hi}^{1-\mu_d} - U_{Hi-1}^{1-\mu_d}}{\Delta t}, \end{aligned} \quad (8)$$

де коефіцієнти  $k_j^\mu$  вираховуються по рекуррентній формуле

$$k_j^\mu = \frac{j^{\mu+1} - (j-1)^{\mu+1}}{\mu(\mu+1)} - \sum_{n=1}^{j-1} k_n^\mu. \quad (9)$$

## ВЫВОДЫ

Выполнено исследование динамических и статических характеристик замкнутых систем с передаточной функцией (1) с дробным порядком астатизма от 0,5 до 2. Оценка качественных показателей таких систем с помощью критерия (2) позволила получить параметры настроек регуляторов, обеспечивающих требуемый порядок астатизма при высоком быстродействии и минимальном перерегулировании. Найдены приближенные аналитические выражения (3) и (4), позволяющие рассчитать параметры регуляторов без предварительного расчета переходных процессов. Передаточные функции (7) определяют правила выбора структуры регуляторов, а выражения (8) и (9) описывают способ вычисления выходных сигналов регуляторов с дробными интегральными и дифференцирующими складовыми, применимый в микропроцессорных системах управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушер, В. В. Идентификация элементов климатических систем дифференциальными уравнениями дробного порядка / В. В. Бушер // Електромашинобудування та електрообладнання. – 2010. – Вип. 75. – С. 68–70.

2. Мартинюк, В. В. Модель суперконденсатора с дробно-интегрирующим элементом и метод идентификации ее параметров / В. В. Мартынюк, В. В. Бушер // Приводная техника. – 2011. – № 5 (93). – С. 27–33.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2011.

Бушер В. В.

#### ОПТИМАЛЬНІ АСТАТИЧНІ СИСТЕМИ З ДРОБОВИМИ ІНТЕГРАЛЬНО-ДИФЕРЕНЦІЙНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Досліджено замкнуті системи з дробовим порядком астатизму від 0,5 до 2. Знайдено параметри дробових пропорційно-інтегральних та інтегрально-диференційних регуляторів для забезпечення оптимальних динамічних та статичних характеристик. Запропоновано методи розрахунку сигналів регуля-

торів з урахуванням використання в мікропроцесорних системах управління.

**Ключові слова:** астатична система, дробовий інтеграл, дробова похідна.

Busher V. V.

#### OPTIMAL ASTATIC CONTROL WITH FRACTIONAL ORDER INTEGRAL-DIFFERENTIAL REGULATORS

The research of close-loop systems with fractional integral-differential regulators with order from 0,5 to 2,0 is carried out. Parameters of regulators for optimal dynamic and static control are defined. Presented methods of numeric solve of fractional equation for their microprocessor's realization.

**Key words:** astatic system, fractional integral, fractional differential.

УДК 517.92

Козырев В. Г.

Канд. техн. наук, доцент Севастопольского национального технического университета

## РЕДУЦИРОВАННОЕ ТЕРМИНАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Предложен редуцированный закон терминального управления скоростью вращения вала электродвигателя, использующий усеченное асимптотическое приближение динамики двигателя и существенно упрощающий алгоритм управления. Моделирование динамики вала с предложенным законом управления показало его эффективность.

**Ключевые слова:** разномасштабная система, терминальное управление, редуцированная асимптотика закона управления.

### ВВЕДЕНИЕ

Для многих электромеханических систем часто необходимо осуществлять перевод электродвигателя (ЭД) в заданный режим работы по скорости за нужное время. Подобная задача относится к задаче терминального управления. Ее особенность состоит в наличии разномасштабных по времени процессов в объекте управления – ЭД – быстрых электрических и медленных механических. Одним из средств решения такой задачи являются асимптотические методы [1]. Они позволяют осуществить декомпозицию закона управления на «быструю» и «медленную» части, соединяя которые затем в единую комбинацию, можно найти асимптотическое приближение исходного закона. Если пренебречь быстрой частью закона управления, заменив ее условиями квазистатики, можно прийти к усеченному и, одновременно, упрощенному (редуцированному) управлению.

Указанный метод применяется в статье для формирования редуцированного терминального управления электродвигателем постоянного тока. На основании сравнения с полным законом делается вывод о достаточной точности редуцированного закона при одновременном выигрыше в простоте алгоритма управления.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данного исследования является проверка эффективности предлагаемого асимптотического метода и

применение его для построения простого и вместе с тем достаточно точного алгоритма управления типовым динамическим объектом, каким является электродвигатель.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается задача терминального управления угловой скоростью вращения вала электродвигателя постоянного тока, управляемого входным напряжением  $U$ . Процессы в ЭД описываются уравнениями

$$U - E_a - L \frac{dI}{dt} = RI,$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_m - C_{fr}\Omega - M_{load},$$

где  $U$  – управляющее напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя;  $I$  – ток в якорной цепи;  $R$  и  $L$  – ее активное сопротивление и индуктивность;  $\Omega$  – угловая скорость вращения вала ЭД;  $E_a = C_e\Omega$  – эдс реакции якоря, пропорциональная скорости  $\Omega$  (при условии постоянства потока возбуждения);  $M_m = C_m I$  – вращающий магнитный момент, пропорциональный току  $I$  (при том же условии);  $C_{fr}$  – коэффициент вязкого трения;  $M_{load}$  – момент сопротивления (нагрузки) на валу.

Для моделирования выберем микродвигатель постоянного тока с параметрами из работы [2]:  $R = 7,9$  Ом,  $L =$

$=0,0136 \text{ Гн}$ ,  $J = 1,32 \cdot 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ,  $C_e = C_m = 0,0246 \text{ В}\cdot\text{с}/\text{рад}$ ,  $C_{fr} \approx 0$ . Номинальные значения переменных также известны:  $\Omega_{nom} = 400 \text{ рад}/\text{с}$ ,  $U_{nom} = 11,8 \text{ В}$ ,  $I_{nom} = (U_{nom} - C_e \Omega_{nom})/R = 0,25 \text{ А}$ ,  $M_{load\_nom} = C_m I_{nom} = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

Следуя общему подходу [1, 2], выразим разномасштабность по времени при помощи безразмерного малого параметра. В нашей задаче он должен входить в «быстро» уравнение – уравнение для электрического тока в качестве множителя при производной тока. Для этого положим  $L = L_0 \cdot \lambda$ , где  $L_0 = 0,136$ . Тогда  $\lambda = 0,1$  дает фактическое значение  $L$ . Число  $\lambda$  будем далее рассматривать как малый параметр, и строить асимптотику задачи по этому параметру.

Введем переменные – отклонения от номинальных значений:  $\omega = \Omega - \Omega_{nom}$ ,  $i = I - I_{nom}$ ,  $u = U - U_{nom}$  и перепишем уравнения ЭД в отклонениях при условии  $M_{load} \approx M_{load\_nom}$

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= a_1\omega + a_2i + m_{load}, \\ \lambda \frac{di}{dt} &= a_3\omega + a_4i + bu. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\lambda$  – малый параметр,  $\omega$  – медленная переменная,  $i$  – быстрая,  $m_{load} = M_{load} - M_{load\_nom} \approx 0$ , а постоянные коэффициенты выражаются формулами

$$a_1 = -\frac{C_{fr}}{J}, \quad a_2 = \frac{C_m}{J}, \quad a_3 = -\frac{C_e}{L_0}, \quad a_4 = -\frac{R}{L_0}, \quad b = \frac{1}{L_0}.$$

Поставим задачу перевести ЭД в номинальный режим по скорости из состояния с начальной скоростью  $\Omega(0)$  за конечное время  $t_f$ . В терминах переменной  $\omega$  это эквивалентно переводу системы (1) из начального состояния  $\omega(0) = \Omega(0) - \Omega_{nom}$  в нулевое состояние  $\omega = 0$ . Качество перевода будем оценивать квадратичным функционалом

$$J_f = \frac{1}{2} f \omega^2(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (q_1 \omega^2 + q_2 i^2 + r u^2) dt, \quad (2)$$

где весовые коэффициенты  $f > 0$ ,  $q_{1,2} \geq 0$ ,  $r > 0$  выбираются дополнительно из соображений эффективности управления.

Общепринятым способом считается в настоящее время выбор значений указанных коэффициентов обратно пропорционально квадрату размаха допустимых отклонений соответственных переменных состояния и управления от желаемых значений с последующей доводкой в процессе численного моделирования [3]. В рассматриваемой нами терминалльной задаче выбирается, в том числе, параметр  $f$ . Его величина берется обратно пропорционально квадрату желаемой терминалльной ошибки, т. е. ошибки управления по скорости в момент  $t = t_f$ . При достаточно большом весе  $f$  терминалльная ошибка  $\omega(t_f) = \Omega(t_f) - \Omega_{nom}$  может быть сделана сколь угодно малой:  $\omega(t_f) \approx 0$  [4].

Данный способ использован в настоящей статье. Заметим, что точные регулярные методы дополнительной оптимизации системы по коэффициентам функционала качества (2) в настоящее время отсутствуют.

Не вдаваясь в рутинные промежуточные расчеты, сразу назовем выбранные значения коэффициентов:

$$f = 0,1, \quad q_1 = 1, \quad q_2 = 4600, \quad r = 300.$$

Они обеспечивают

1) отсутствие перерегулирования по скорости вращения вала ЭД;

2) приемлемую амплитуду управляющего напряжения, безопасную для якорной цепи ЭД;

3) достаточно малую терминалльную ошибку, т. е. малое отклонение конечной скорости от заданной в 400 рад/с.

Результаты, подтверждающие указанное качество управления, приводятся в конце статьи.

Время  $t_f$  определяется требованиями к скорости управления. Для систем управления с микродвигателями, к которым относится рассматриваемая система с электродвигателем постоянного тока, можно взять время регулирования  $t_f$  равным типичному для таких систем значению в 15 миллисекунд.

**Закон управления.** Перепишем задачу (1), (2) в матричном виде

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, \quad (3)$$

$$J_f = \frac{1}{2} (x' \Phi x)_{t=t_f} + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x' Q x + r u^2) dt, \quad (4)$$

где  $x = \begin{bmatrix} \omega \\ i \end{bmatrix}$ ,  $A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ \lambda^{-1} a_3 & \lambda^{-1} a_4 \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda^{-1} b \end{bmatrix}$ ,

$$S = BR^{-1}B' = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \lambda^{-2} S \end{bmatrix}, \quad s = b^2 r^{-1}, \quad H = [1 \ 0],$$

$$\Phi = H' f H = \begin{bmatrix} f & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 \\ 0 & q_2 \end{bmatrix}, \quad \text{штрих обозначает транспонирование.}$$

Оптимальное управление для задачи (3), (4) на отрезке  $0 \leq t \leq t_f$  определяется выражением [4]

$$u = -r^{-1} B' K(t) x, \quad (5)$$

где матрица  $K(t)$  находится из уравнения Риккати

$$\frac{dK}{dt} = -KA - A'K + KSK - Q, \quad K|_{t=T} = \Phi.$$

Согласно [4]  $K$  представляется с помощью матричного разложения

$$K = P + W'(M + F^{-1})^{-1}W, \quad (6)$$

где матрицы  $K$ ,  $P$ ,  $W$ ,  $M$  и  $F$  имеют покомпонентный вид

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & \lambda k_2 \\ \lambda k_2 & \lambda k_3 \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} p_1 & \lambda p_2 \\ \lambda p_2 & \lambda p_3 \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} w_1 & \lambda w_2 \end{bmatrix}, M = m \text{ и } F = f - \text{ скаляры.}$$

В развернутой записи матрица  $K$  приобретает тогда вид

$$K = \begin{bmatrix} k_1 & \lambda k_2 \\ \lambda k_2 & \lambda k_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{10} & \lambda p_2 \\ \lambda p_2 & \lambda p_3 \end{bmatrix} + \frac{1}{m + f^{-1}} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \lambda w_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 & \lambda w_2 \end{bmatrix}.$$

Отдельные компоненты удовлетворяют следующим уравнениям, которые для удобства запишем в смещенном времени  $\vartheta = t - t_f$ ,  $-t_f \leq \vartheta \leq 0$

$$\frac{dp_1}{d\vartheta} = -2a_1 p_1 - 2a_3 p_2 + sp_2^2 - q_1, \quad p_1|_{\vartheta=0} = 0,$$

$$\lambda \frac{dp_2}{d\vartheta} = -a_2 p_1 - a_4 p_2 - \lambda a_1 p_2 - a_3 p_3 + sp_2 p_3, \quad p_2|_{\vartheta=0} = 0,$$

$$\lambda \frac{dp_3}{d\vartheta} = -2\lambda a_2 p_2 - 2a_4 p_3 + sp_3^2 - q_2, \quad p_3|_{\vartheta=0} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{dw_1}{d\vartheta} = -(a_3 - sp_2)w_2, \quad w_1|_{\vartheta=0} = 1,$$

$$\lambda \frac{dw_2}{d\vartheta} = -a_2 w_1 - (a_4 - sp_3)w_2, \quad w_2|_{\vartheta=0} = 0,$$

$$\frac{dm}{d\vartheta} = -sw_2^2, \quad m|_{\vartheta=0} = 0.$$

**Асимптотика матриц обратной связи  $P$ ,  $W$  и  $M$ .** Согласно теореме из [4], компоненты решения системы уравнений (7) при малом  $\lambda$  имеют равномерные асимптотические разложения нулевого порядка вида

$$p_1(\vartheta, \lambda) = p_{10}(\vartheta) + \lambda O(1),$$

$$p_i(\vartheta, \lambda) = p_{i0}(\vartheta) + \Pi_0 p_i(\tau) + \lambda O(1) \quad (i = \overline{2, 3}),$$

$$w_1(\vartheta, \lambda) = w_{10}(\vartheta) + \lambda O(1),$$

$$w_2(\vartheta, \lambda) = w_{20}(\vartheta) + \Pi_0 w_2(\tau) + \lambda O(1),$$

$$m(\vartheta, \lambda) = m_0(\vartheta) + \lambda O(1),$$

где  $\tau = (t - t_f)/\lambda$ , а  $O(1)$  – ограниченные на области  $-t_f \leq \vartheta \leq 0$ ,  $0 \leq \lambda \leq \lambda_0$  функции от  $\vartheta$  и  $\lambda$ ,  $\lambda_0$  – некоторое положительное число.

Составляющие типа  $\Pi_0 X(\tau)$  быстро убывают при  $\tau \rightarrow -\infty$  [1].  $\Pi_0 X(\tau) < Ce^{k\tau}$  и, значит, они несущественны вне малой окрестности конечного момента  $t = t_f$  ( $\vartheta = 0$ ). По этой причине в теории разномасштабных

систем они называются составляющими пограничного слоя, или «погранслойными» составляющими. Попытаемся ими пренебречь. Это приведет к потере точности задания коэффициентов обратной связи в законе (5), но лишь в конце промежутка управления (в узком пограничном слое). По нашему предположению такая потеря не должна существенно отразиться на точности управления скоростью ввиду инерционности вала двигателя. Подобное усеченное представление коэффициентов обратной связи в (5) и названо выше редуцированным. Оно имеет вид

$$p_1(\vartheta, \lambda) = p_{10}(\vartheta) + \lambda O(1),$$

$$p_i(\vartheta, \lambda) = p_{i0}(\vartheta) + \lambda O(1) \quad (i = \overline{2, 3}),$$

$$w_1(\vartheta, \lambda) = w_{10}(\vartheta) + \lambda O(1),$$

$$w_2(\vartheta, \lambda) = w_{20}(\vartheta) + \lambda O(1),$$

$$m(\vartheta, \lambda) = m_0(\vartheta) + \lambda O(1),$$

где  $O(1)$  – функции от  $\vartheta$  и  $\lambda$ , ограниченные на отрезке  $-t_f \leq \vartheta \leq \vartheta_0 < 0$  при  $0 \leq \lambda \leq \lambda_0$ ,  $\vartheta_0$  – фиксировано и близко к нулю [4].

Главные члены записанных разложений определяются из уравнений (7), если положить в них  $\lambda = 0$  [4]

$$\frac{dp_{10}}{d\vartheta} = -2a_1 p_{10} - 2a_3 p_{20} + sp_{20}^2 - q_1, \quad p_{10}(0) = 0$$

$$0 = -a_2 p_{10} - a_4 p_{20} - a_3 p_{30} + sp_{20} p_{30},$$

$$0 = -2a_4 p_{30} + sp_{30}^2 - q_2,$$

$$\frac{dw_{10}}{d\vartheta} = -(a_3 - sp_{20})w_{20}, \quad w_{10}(0) = 1, \quad (8)$$

$$0 = -a_2 w_{10} - (a_4 - sp_{30})w_{20},$$

$$\frac{dm_0}{d\vartheta} = -sw_{20}^2, \quad m_0|_{\vartheta=0} = 0.$$

Уточним, выражения вида  $X(0)$  имеют здесь смысл значений функций  $X(\vartheta)$  при  $\vartheta = 0$ , т. е. при  $t = t_f$ . Заметим также, так как  $p_{30}(\vartheta)$  – постоянная величина, то  $p_{30}(\vartheta) = p_{30}(0) = p_{30}|_{t=t_f}$ .

**Асимптотика матрицы  $K$  и асимптотика закона управления.** Используя представленные асимптотические приближения компонент матриц  $P$ ,  $W$  и  $M$ , запишем нулевое асимптотическое приближение этих матриц и всей матрицы Риккати  $K$  [4]

$$K_0 = \begin{bmatrix} k_{10} & \lambda k_{20} \\ \lambda k_{20} & \lambda k_{30} \end{bmatrix} = P_0 + W_0' W_0 (m_0 + f^{-1})^{-1} =$$

$$= \begin{bmatrix} p_{10} & \lambda p_{20} \\ \lambda p_{20} & \lambda p_{30} \end{bmatrix} + \frac{1}{m_0 + f^{-1}} \cdot \begin{bmatrix} w_{10} \\ \lambda w_{20} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_{10} & \lambda w_{20} \end{bmatrix}.$$

**Асимптотический закон управления** выражается теперь формулой

$$u_0 = -r^{-1} B' K_0 x. \quad (9)$$

Для нахождения  $K_0$  в функции времени надо решить уравнения (8). Для этого сначала из алгебраических уравнений системы (8) выразим члены  $p_{30}$ ,  $p_{20}$  и  $w_{20}$  через константы и члены  $p_{10}$ ,  $w_{10}$ . Затем подставим их в оставшиеся дифференциальные уравнения и проинтегрируем последние. Из алгебраических уравнений (8) находим

$$\begin{aligned} p_{30} &= \frac{1}{s} \left( a_4 + \sqrt{a_4^2 + sq_2} \right) = \text{const}, \\ p_{20} &= \frac{1}{\sqrt{a_4^2 + sq_2}} (a_2 p_{10} + a_3 p_{30}), \\ p_{20}(0) &= \frac{1}{\sqrt{a_4^2 + sq_2}} (a_2 p_{10}(0) + a_3 p_{30}) = \frac{1}{\sqrt{a_4^2 + sq_2}} a_3 p_{30}, \quad (10) \\ w_{20} &= \frac{1}{\sqrt{a_4^2 + sq_2}} a_2 w_{10}, \\ w_{20}(0) &= \frac{1}{\sqrt{a_4^2 + sq_2}} a_2 w_{10}(0) = \frac{a_2}{\sqrt{a_4^2 + sq_2}}, \end{aligned}$$

Дифференциальные уравнения для оставшихся компонент запишем отдельно

$$\frac{dp_{10}}{d\theta} = -2a_1 p_{10} - 2a_3 p_{20} + sp_{20}^2 - q_1, \quad p_{10}(0) = 0,$$

$$\frac{dw_{10}}{d\theta} = -(a_3 - sp_{20})w_{20}, \quad w_{10}(0) = 1, \quad (11)$$

$$\frac{dm_0}{d\theta} = -sw_{20}^2, \quad m_0|_{\theta=0} = 0.$$

Интегрируя уравнения (11) и подставляя их решения в конечные уравнения (10), рассчитаем матрицу  $K_0$  в функции текущего времени. Затем с помощью формулы (9), в силу уравнений объекта (1), найдем асимптотически оптимальное управление  $u_0$  и формируемые им процессы в объекте  $\omega_0$  и  $i_0$ . Для нахождения точных оптимальных процессов  $u$ ,  $\omega$  и  $i$  аналогично решим систему уравнений (7) совместно с (1), (3) при указанной выше величине малого параметра  $\lambda = 0,1$ .

Полные значения процессов выражаются через номинальные значения и найденные отклонения:

$$U = U_{nom} + u, \quad \Omega = \Omega_{nom} + \omega, \quad I = I_{nom} + i \text{ – точные оптимальные процессы}; \quad U_0 = U_{nom} + u_0, \quad \Omega_0 = \Omega_{nom} + \omega_0, \quad I_0 = I_{nom} + i_0 \text{ – их асимптотики.}$$

**Результаты расчетов** матрицы Риккати и процессов управления представлены на нижеследующих рис. 1–3. Оптимальные (точные) компоненты матрицы Риккати обозначены на графиках именами  $K11 = k_1$ ,  $K12 = \lambda k_2$ ,  $K22 = \lambda k_3$ . Их нулевые асимптотические приближения  $-K011 = k_{10}$ ,  $K012 = \lambda k_{20}$ ,  $K022 = \lambda k_{30}$ . Аналогичным образом обозначены и процессы  $U$ ,  $\Omega$  и  $I$  – оптимальное управляющее напряжение, угловая скорость и ток в обмотке соответственно;  $U0 = U_0$ ,  $\Omega0 = \Omega_0$  и  $I0 = I_0$  – их асимптотические приближения.

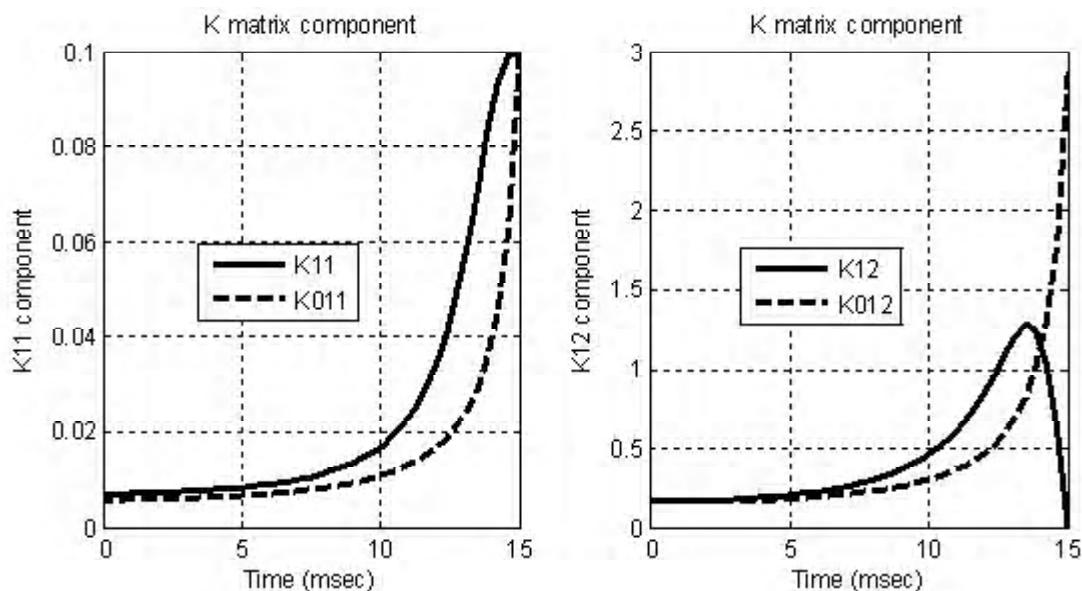


Рис. 1. Компоненты матрицы Риккати:  $K11 = k_1$  и  $K12 = \lambda k_2$  – точные;  $K011 = k_{10}$  и  $K012 = \lambda k_{20}$  – асимптотически приближенные

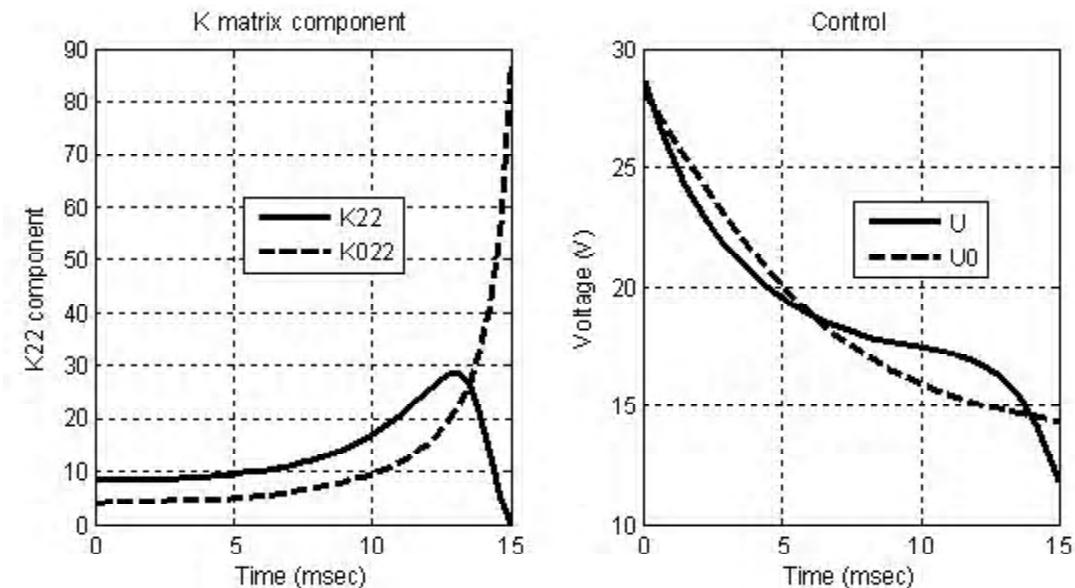


Рис. 2. Компонента матриці Ріккаті:  $K_{22} = \lambda k_3$  – точна;  $K_{022} = \lambda k_{30}$  – асимптотично приближена (слева). Управляюче електрическе напряжение  $U$  и его асимптотическое приближение  $U_0 = U_0$  (справа)

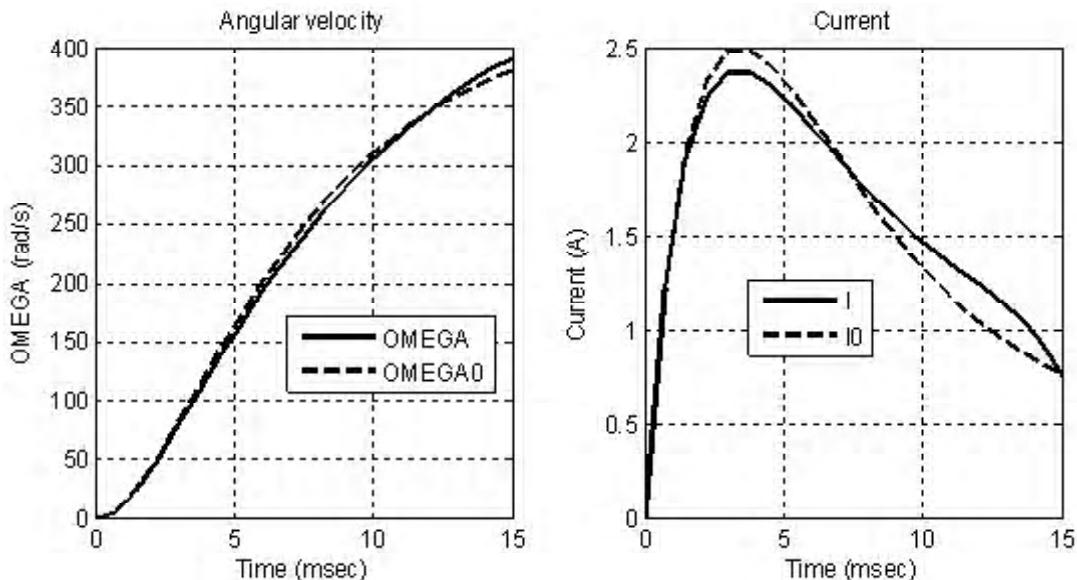


Рис. 3. Угловая скорость вращения вала двигателя  $OMEGA = \Omega$ , ток в обмотке  $I$ , их асимптотические приближения  $OMEGA_0 = \Omega_0$ ,  $I_0 = I_0$

Из графиков на рис. 1 и 2 наблюдается определенное расхождение точных и асимптотических компонент матрицы Риккати. Это связано с использованием асимптотики нулевого порядка малости по  $\lambda$ , а также с отбрасыванием пограничных составляющих.

Тем не менее, сами процессы управления близки (см. напряжения  $U$  и  $U_0$  на рис. 2, справа, скорости микродвигателя  $\Omega$  и  $\Omega_0$  на рис. 3, слева и токи  $I$  и  $I_0$  на рис. 3, справа). Заметим, что это наблюдается при довольно жестком ограничении на время управления, составляющее в нашем примере всего лишь 15 мс.

Одновременно достигается достаточно точный терминалный переход скорости из нулевого значения в заданное номинальное  $\Omega_{nom}$  за указанное малое время 15 мс без перерегулирования (см. рис. 3, слева).

Следует также отметить, что, хотя и происходит бросок пускового тока  $I$  до 2,5 А (см. рис. 3, справа), но этот бросок кратковременный. Он не может вызвать перегрева обмотки микродвигателя.

## ВЫВОД

Выполненные расчеты свидетельствуют о приемлемой точности упрощенной асимптотики закона управления. Формирование подобного управления осуществляется путем решения более простых уравнений, чем точного, оптимального управления. Его встраивание в управляющий микроконтроллер связано с заданием существенно меньшего числа узловых точек по времени и, вследствие этого, уменьшением расхода объема памяти и времени работы контроллера.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ**

1. *Васильєва, А. Б.* Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений / А. Б. Васильєва, В. Ф. Бутузов. – М. : Наука, 1973. – 272 с.
2. *Yackel, R. A.* A boundary layer method for the matrix Riccati equation/ R. A. Yackel, P. V. Kokotovic // IEEE Trans. on Automatic Control. – 1973. – V. 18. – № 1, February. – P. 17–24.
3. *Kwakernaak, H.* Design Methods for Control Systems / O. H. Bosgra, H. Kwakernaak, G. Meinsma. – Notes for a course of the Dutch Institute of Systems and Control, 2006. – 319 pp.
4. *Козырев, В. Г.* Редуцированный оптимальный регулятор выхода сингулярно возмущенных систем / В. Г. Козырев // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2005. – № 1. – С. 134–139.

Стаття надійшла до редакції 27.01.2012.

Після доробки 24.02.2012.

Козирев В. Г.

**РІЗНОМАСШТАБНЕ ТЕРМІНАЛЬНЕ УПРАВЛІННЯ ШВІДКІСТЮ ОБЕРТАННЯ ВАЛА ЕЛЕКТРОДВИГУНА**

Запропонований редукований закон термінального керування швидкістю обертання вала електродвигуна, що враховує регулярні компоненти асимптотичного представлення динаміки двигуна і істотно спрощує алгоритм керування. Моделювання динаміки вала із запропонованим законом керування показало його ефективність.

**Ключові слова:** різномасштабна система, термінального керування, зредукована асимптотика закону керування.

Kozyrev V. G.

**MULTI-TIME-SCALE TERMINAL CONTROL OF MOTOR AXIS ANGULAR VELOCITY**

Reduced law of terminal control of electric motor shaft speed of rotation utilizing truncated motor dynamics asymptotic approximation and appreciably simplifying control algorithm is proposed. Modeling of the dynamics of the shaft with the proposed control law has shown its effectiveness.

**Key words:** multi-time-scale system, terminal control, reduced asymptotic of control law.

## ABSTRACTS. REFERENCES.

### RADIOPHYSICS

Gorbenko V. I., Gorban A. N.

## THERMAL DECOMPOSITION OF INDIUM PHOSPHIDE IN VACUUM AND ATOMIC HYDROGEN ENVIRONMENT

The thermal decomposition of indium phosphide has been investigated by Auger-electron spectroscopy and mass-spectroscopy. Scanning electron microscopy has been used for study of indium islands growth on surface of the compound semiconductor. The role of atomic hydrogen in processes of decomposition and growth of metallic islands was determined by comparing with these processes under vacuum.

**Key words:** indium phosphide, atomic hydrogen, thermal decomposition, scanning electron microscopy.

### REFERENCES

1. M'hamed O., Proix F., Sebenne C. A. Interaction of atomic hydrogen with cleaved InP. I. The adsorption stage, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1988, Vol. 6, No. 2, pp. 193–198.
2. Proix F., M'hamed O., Sebenne C. A. Interaction of atomic hydrogen with cleaved InP. II. The decomposition stage, *Journal of Vacuum Science and Technology A*, 1988, Vol. 6, No. 2, pp. 199–203.
3. Proix F. Dissociation effects of H and  $H_2^+$  on clean III–V compounds, *Physica B*, 1991, No. 170, pp. 457–468.
4. Schaefer J. A. Atomic hydrogen – a local probe for interface characterization, *Surface Science*, 1987, No. 189/190, pp. 127–136.
5. Gorbenko V., Shvets J., Gorban A. Oxidation and metallization in  $H_2/H_2O/InP$  system. Proceedings of the Twenty-Seventh State-of-The-Art Program On Compound Semiconductors (SOTAPCS XXVII) by editors S. N. G.Chu, D. N. Buckley, K. Wada et. al, Vol. 97 21, The Electrochemical Society, Pennington, 1997, pp. 375–381.
6. Panish M. B., Arthur J. R. Phase equilibria and vapor pressures of the system In+P. J, *Chem. Thermodynamics*, 1970, Vol. 2, No. 3, pp. 299–318.

Nikonov A. Y., Nebesnjuk O. J., Shmaly S. L., Nikonova Z. A.

## RESEARCH OF FEATURES THE FORMATION OF DEFECTS IN HIGHLY ALLOYING SILICON DURING IRRADIATED

In the article the results of experimental research mechanisms interaction high-energy radiation on silicon.

**Key words:** radiation, doping impurity, concentration.

### SPISOK LITERATURY'

1. Emcev V. V., Mashovecz T. V. Primesi i tochechny'e defekty' v poluprovodnikax. Ed. by Ry'vkin S.M. Moscow, Radio i svyaz', 1981, 248 p.
2. Shherbachev K. D., Bublik V. T., Mordkovich V. N. Osobennosti obrazovaniya radiacionny'x defektov v sloe kremniya struktur «kremnij na izolyatore», *Fizika i texnika poluprovodnikov*, 2011, Vol. 45, No. 6, pp. 754–758.
3. Vavilov V. S., Uxin N. A. Radiacionny'e effekty' v poluprovodnikax i poluprovodnikovy'x priborax. Moscow, Atomizdat, 1969, 312 p.
4. Tompson M. Defekty' i radiacionny'e povrezhdeniya v metallax. Moscow, Mir, 1971, 368 p.
5. Pagava T. A., Bzhalava N. T., Majsuradz N. I. Dva kanala otzhiga divakansij v obluchenny'x kristallax kremniya n-tipa, *Ukrainskyi fizichnyi zhurnal*, 2010, Vol. 55, No. 11, pp. 1195–1200.
6. Stas' V. F., Antonova I. V., Neustroev E. P. Termoakeptory' v obluchennom kremnii, *Fizika i texnika poluprovodnikov*, 2000, Vol. 34, No. 2, pp. 162–167.

# RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

Petrova K. V., Furmanova N. I., Farafonov A. Y.

## DEVELOPMENT OF SIMPLIFIED ALGORITHM FOR THE DESIGN OF MICROSTRIP BAND-PASS ON HAIRPIN RESONATORS FILTERS WITH SLOTS IN THE GROUND PLANE ON THE ELECTRODYNAMICS ANALYSIS IN ANSOFT HFSS

Analysis of microstrip band-pass filters hairpin resonators meander shape with slots in the ground plane is presented. The calculations of the geometric parameters of the band-pass on hairpin resonator filters on the basis of prototype filters of reduce frequencies are presented. A model of the band-pass on hairpin resonator filters with slots in the ground plane has been designed and was used optimization. In research a simplified algorithm for the design process of this type of filters is proposed.

**Key words:** pass-band filter, coupled line, slots in the ground plane, hairpin resonators, center frequency.

### SPIISOK LITERATURY'

1. Nikolaev M. Kompaktny'e mikropoloskovy'e fil'try' s pov'y'shennoj selektivnost'yu, *Sovremennaya elektronika*, 2008, No. 1, pp. 28–30.
2. Lotfi Neyestanak A. A. Enhanced Wide Band Microstrip Hairpin Filter, *Journal of Mobile Communication*, 2009, Vol. 3, No. 3, pp. 59–61.
3. Sulaiman A., Mokhtar H., Jusoh H., Baba H., Awang A., Ain F. Simple Multilayer Hairpin Bandpass Filter, *European Journal of Scientific Research*, 2010, Vol. 42, No. 4, pp. 604–613.
4. Hasan A., Nadeem A. E. Novel Microstrip Hairpinline Narrowband Bandpass Filter Using Via Ground Holes, *Progress In Electromagnetics Research*, 2008, No. 78, pp. 393–419.
5. Militaru N., Banciu M. G., Lojewski G. Enhanced Couplings in Broadband Planar Filters with Defected Ground Structures, *Romanian Journal of Information*, 2007, Vol. 10, No. 2, pp. 199–212.
6. Gipsman A. I., Krasnoperkin V. M., Samoxin G. S., Silin R. A. Sovremenny'e metody i rezul'taty kvazistaticheskogo analiza poloskovy'x linij i ustrojstv, Obzory po e'lektronnoj texnike. Seriya 1. E'lektronika SVCh, No. 1 (1602), Moscow, CzNII «E'lektronika», 1991, 94 p.
7. Velazquez-Ahumada M.-C., Martel J., Medina F. Parallel coupled microstrip filters with ground-plane aperture for spurious band suppression and enhanced coupling. *IEEE trans. on microwave theory and techniques*, 2004, Vol. 52, No. 3, pp. 1082–1086.
8. Mattej D. L., Yang L., T. Dzhons E. M. Fil'try' SVCh, soglasuyushchie cepi i cepi svyazi, Vol. I. Ed. by Alekseeva L. V., Kushnira F. V. Moscow, «Svyaz», 1971, 440 p.
9. Maloraczkij L. G., Yavich L. R. Proektirovanie i raschet SVCh e'lementov na poloskovy'x liniyax. Moscow, «Sov. radio», 1972, 232 p.
10. Farafonov A. Yu., Voropaj A. Yu., Karpukov L. M. Sintez mikropoloskovy'x polosovoy'x fil'trov na svyazanny'x liniyax s otverstiymami v e'krane, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2009, No. 1 (20), pp. 41–44.

## MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

Gostev V. I.

## DESIGNING OF AN THREE-REGIME FUZZY CONTROLLER FOR SYSTEMS OF ACTIVE QUEUE MANAGEMENT IN TCP/IP NETWORKS

Questions of designing of an three-regime fuzzy controller are stated at identical triangular membership functions with three terms for systems of active queue management in TCP/IP networks and the basic scheme of controller in system MATLAB is presented

**Key words:** designing, fuzzy controller, membership functions, active queue management, TCP/IP networks, MATLAB.

**SPISOK LITERATURY\***

1. Ming Liu, Wenhua Dou, Xiao Rui Design of a Multi-model Fuzzy Controller for AQM. *Fuzzy Systems and Knowledge Discovery – FSKD: Third International Conference (September 24–28, 2006, Xi'an)*, Lecture Notes in Computer Science, China, Xi'an, 2006, Vol. 4223, pp. 739–742.
2. Weiyan Liu, Liu Liu, Zhang Shunyi, Zhang Mu, Tao Liu A fuzzy-logic control algorithm for active queue management in IP networks, *Journal of Electronics*, 2008, Vol. 25, No. 1, pp. 102–107.
3. Hadjadjou Y., Nafaa A., Negru D., Mehaoua A. FAFC: Fast Adaptive Fuzzy AQM Controller For TCP/IP Networks. *IEEE GLOBAL Telecommunication Conference (29.II–3.III, 2004)*, Dallas, Texas, USA, 2004. pp. 95–98
4. Chrysostomou C., Pitsillides A., Hadjipollas G., Polycarpou A., Sekercioglu M. Fuzzy Logic Based Congestion Control in TCP/IP Networks for Quality of Service Provisioning. *Next Generation Teletraffic and Wired, Wireless Advanced Networking (NEW2AN'04): Proceedings of the International Conference (2–6 February 2004, St. Petersburg)*, St. Petersburg, Russia, 2004, pp. 235–243.
5. Chrysostomou C., Pitsillides A. Fuzzy logic congestion control in TCP/IP tandem networks. *Computers and Communications (IEEE ISCC 2006): Proceedings of the 11th IEEE Symposium (June 26–29, 2006, Cagliari)*, Cagliari, Italy, 2006, pp. 123–129.
6. Chrysostomou C., Pitsillides A. Using Fuzzy Logic Control to Address Challenges in AQM Congestion Control in TCP/IP Networks. *Workshop on Modeling and Control of Complex Systems (MCCS'05): CD ROM Proceedings (June 30–July 1, 2005, Ayia Napa)*, Ayia Napa, Cyprus, 2005, 22 p.
7. Di Fatta G., Hoffmann F., Lo Re G., Urso A. A genetic algorithm for the design of a fuzzy controller for active queue management. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews*, 2003, Vol. 33, Iss. 3, R. pp. 129–134.
8. Yaghmaee M. H., Toosi H. A. A Fuzzy Based Active Queue Management Algorithm. *SPECTS'2003: Proc. International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (July 20–24)*, 2003, Montreal, Canada, pp. 458–462.
9. Gostev V. I. Nechetkie regulyatory v sistemakh avtomaticheskogo upravleniya. Kiev, Radioamator, 2008, 972 p.
10. Gostev V. I. Novyj metod proektirovaniya odnogo klassa nechetkix cifrovyyx regulyatorov, *Problemy upravleniya i informatiki*, 2007, No. 6, pp. 73–84
11. Gostev V. I. Novyj metod proektirovaniya odnogo klassa nechetkix cifrovyyx regulyatorov. *Avtomatika–2007: Materialy XIV mizhnarodnoi konferentsii z avtomatychno upravlinnia (10–14 veresnia 2007 roku, m. Sevastopol)*, Ch.1, Sevastopol, CNUIale ta P, 2007, pp. 122–132.
12. Gostev V. I., Skurto S. N. Fuzzy-sistemy aktivnogo upravleniya ocheredyu v setyakh TCP/IP: monografiya. Nezhin, OOO Vydavnitstvo «Aspekt-Poligraf», 2011, 464 p.

Gofman Ye., Oliinyk A., Subbotin S.

**LINGUISTIC RULES BASES REDUCTION BASED ON DECISION TREES**

The problem of linguistic rules induction is considered. A method of decision trees identification for linguistic rules induction is developed. The software based on the proposed method is created. Experiments on the solution of practical problems, which allowed to investigate the effectiveness of the proposed method are made.

**Key words:** decision tree, rules induction, linguistic rule.

**SPYSOK LITERATURY**

1. Encyclopedia of artificial intelligence. Ed. by J. R. Dopico, J. D. de la Calle, A. P. Sierra. New York, Information Science Reference, 2009, Vol. 1–3, 1677 p.
2. Barsegyan A. A. Texnologii analiza dannyx: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP: uchebnoe posobie. St. Petersburg, BHV, 2007, 384 p.
3. Quinlan J. R. Decision trees and decision making. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1990, No. 2 (20), pp. 339–346.
4. Quinlan J. R. Induction of decision trees, *Machine Learning*, 1986, No. 1, pp. 81–106.
5. Gelfand S. B., Ravishankar C. S., Delp E. J. An Iterative Growing and Pruning Algorithm for Classification Tree Design. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, No. 13 (2), pp. 163–174.
6. Liu X., Da Q. A decision tree solution considering the decision maker's attitude, *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, No. 152 (3), pp. 437–454.
7. Breiman L., Friedman J. H., Olshen R. A., Stone C. J. Classification and regression trees. California, Wadsworth & Brooks, 1984, 368 p.
8. J. Willems F. M., Shtarkov Y. M., Tjalkens T. J. The Context Tree Weighting Method: Basic Properties, *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, No 3, pp. 653–664.
9. UCI Machine Learning Repository [electronic resource] / Center for Machine Learning and Intelligent Systems, Access mode: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets.html>.

Il'yashenko M. B., Goldobin A. A.

## GRAPH-SUBGRAPH ISOMORPHISM PROBLEM SOLVING FOR DESIGNING SPECIAL COMPUTERS

An advanced algorithm for solving graphs isomorphism problem is proposed and experimental results of its efficiency are presented. Object of investigation is set of control flow graphs of solutions achieved, that were received after circumvent of the semantic network by Warren abstract machine.

**Key words:** declarative logic, predicate, O-Tree, Prolog, recursively returning, graph-subgraph isomorphism.

### СПІСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Goldobin A. A. Kvazigomomorfnoe preobrazovanie gipergrafov v avtomatizacii proektirovaniya ustroystv upravleniya, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2006, No. 1, p. 41.
2. Hassan Ait-Kasi Warren's Abstract Machine: a tutorial reconstruction. MIT Press, 1999, 144 p.
3. Il'yashenko M. B. Razrabotka i issledovanie parallel'nogo algoritma proverki graf-podgraf izomorfizma. *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2006, No. 1, pp. 63–69.

4. Pinchuk V. P. Osnovannaya na volnovom razlozhenii sistema invariantov dlya prosty'x grafov i algoritm raspoznavaniya izomorfnosti. Kiev, 1995, Dep. v GNTB Ukrayny' 10.05.95, N 1002 – Uk95.
5. Barkalov A. A. Sintez ustrojstv upravleniya na programmiruem'yx logicheskix ustrojstvax. Doneck, RVA DonNTU, 2002, 262 p.
6. Solov'ev V. V. Proektirovanie cifrovyyx sistem na osnove programmiruem'yx logicheskix integral'nyx sxem. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2001, 636 p.

Lysytska I. V.

## COMPARING ON EFFECTIVENESS OF SUPERBOXES SOME MODERN SIPHERS

New method of assessment indicators provable security block symmetric ciphers sets out. With application of this method are analyzed for differential properties superblock three ciphers: cipher AES, the reduced version cipher Muhamor and cipher MISTY1. The results of computational experiments to determine the values of AMDP and MADP AES superblock are presented. Demonstrated that the resistance of large ciphers and, in particular cipher Rijndael (AES) is independent of the differential properties of S-blocks used in the ciphers. It seems like one of the promising solutions for building superblocks transformation FI cipher MISTY1, which is noteworthy that sells for one cycle of differential performance random permutation corresponding degree.

**Key words:** of provable security, differential, superblock, random permutation.

### СПІСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Lamberger M., Daemen J., Pramstaller N. Computational aspects of the expected differential probability of 4-round AES and AES-like ciphers. *Abstract – 8<sup>th</sup> Central European Conference on Cryptography 2008. Computing – 2009*, pp. 85–104. DOI: 10.1007/s00607-009-0034-y.
2. Daemen J., Rijmen V. Understanding two-round differentials in AES. Proc. Security and Cryptography for Networks (SCN 2006), LNCS, 4116. Edited by De Prisco, R., Yung M. Springer, 2006, pp. 78–94.
3. Keliher L., Sui J. Exast maximum expected differential and linear probability for 2-round advanced encryption standard (AES). Cryptology ePrint archive Report 2005/321, 2005, Access mode: <http://eprint.iacr.org>.
4. Sano F., Ohkuma K., Shimizu H., Kawamura S. On the Security of Nested SPN Cipher against the Differential and Linear Cryptanalysis, *IEICE Trans. Fundamentals*, January 2003, Vol. E86-a, No.1, pp. 37–46.

5. Dolgov V. I., Lisiczkaya I. V., Kazimirov A. V. Variaciia na temu shifra Rijndael, *Prikladnaya radioelektronika*, 2010, Vol. 9, No. 3, pp. 321–325.
6. Lisiczkaya I. V., Oleshko O. I., Rudenko S. N. Kriptograficheskie svojstva umen'shennoj versii shifra «Muxomor», *Spetsialni telekomunikatsiini systemy ta zakhyyst informatsii. Zbirnyk naukovykh prats*, Kyiv, 2010, No. 2 (18), pp. 33–42.
7. Kuznecov A. A., Lisiczkaya I. V., Isaev S. A. Linejn'y'e svojstva blochnyyx simmetrichnyx shifrov, predstavlennyyx na ukrainskij konkurs, *Prikladnaya radioelektronika*, 2011, Vol. 10, No. 2, pp. 135–140.
8. Lisiczkaya I. V., Kovtun V. V. Ob uchastii S-blokov v formirovaniu maksimal'nyx znamenij linejn'yx veroyatnostej blochnyyx simmetrichnyx shifrov, *Mezhvedomstvennyj nauchn. texnicheskij sbornik «Radiotexnika»*, 2011, No. 166, pp. 17–25.

9. Lisczkaya I. V., Nastenko A. A. Bol'shie shifry' – sluchajny'e podstanovki, *Mezhdunarodnyj nauchn. tekhnicheskij sbornik «Radiotekhnika»*, 2011, No. 166, pp. 50–55.
10. Lisczkaya I. V., Kajdalov D. S. Differencial'ny'e svojstva shifra FOX, *Prikladnaya radioelektronika*, 2011, Vol. 10, No. 2, pp. 122–126.
11. Horbenko I. D., Bondarenko M. F., Dolgov V. I. Perspektivnyi blokovyi symetrychnyi shyfr «Mukhomor» – osnovni polozhennia ta spetsifikatsiya, *Prikladnaya radioelektronika*, 2007, Vol. 6, No. 2, pp. 147–157.
12. Matsui M. New block encryption algorithm Misty. *Fast Software Encryption '97, LNCS 1267*. Ed. by E. Biham. Springer-Verlag, 1997, pp. 64–74.
13. Gorbenko I. D., Dolgov V. I., Lisczkaya I. V., Olejnikov R. V. Novaya ideologiya ocenki stojkosti blochny'x simmetrichny'x shifrov k atakam differencial'nogo i linejnogo kriptoanaliza, *Prikladnaya radioelektronika*, 2010, Vol. 9, No. 3, pp. 212–320.

Barkalov A. A., Malcheva R. V., Soldatov K. A.

## OPTIMIZATION OF MOORE FINITE STATE MACHINE IMPLEMENTED ON THE PROGRAMMABLE LOGIC

This article is proposed a method which is designed to reduce the number of input variables and intermediate terms of Boolean functions. The method is based on the extended codes of states and replacement of logic conditions. Application of the proposed method allows up to 20% reduction in the total count of macrocells in blocks BLC and BFM.

**Key words:** Moore FSM, Programmable Logic, GSA, pseudoequivalent states, replacement of logic conditions.

### SPISOK LITERATURY'

1. Baranov S. Logic and System Design of Digital Systems. Tallinn, TUT Press, 2008, 328 p.
2. Barkalov A., Titarenko L. Logic Synthesis for FSM-based Control Units. Berlin, Springer, 2009, 233 p.
3. Grushniczkij R. I., Murzaev A. X., Ugryumov E. P. Proektirovanie sistem s ispol'zovaniem mikrosistem programmiroemoy logiki. Saint Petersburg, BXV.-Peterburg, 2002, 608 p.
4. Maxfield C. The Design Warrior's Guide to FPGAs. Amsterdam, Elsevier, 2004, 541 p.
5. Solov'yov V. V., Klimovich A. S. Logicheskoe proektirovanie cifrovyyx sistem na osnove programmiroemyx logicheskix integral'nyx sxem. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2008, 376 p.
6. DeMicheli G. Synthesis and Optimization of Digital circuits. New York, McGraw Hill, 1994, 541 p.
7. FPGA, CPLD, and ASIC from Altera: baza danny'x soderzhit svedeniya o mikrosxemax PLIS firmy' Altera, Access mode: <http://www.altera.com>.
8. FPGA and CPLD Solutions from Xilinx, Inc: baza danny'x soderzhit svedeniya o mikrosxemax PLIS firmy' Xilinx, Access mode: [www.xilinx.com](http://www.xilinx.com).
9. Cypress Semiconductor: baza danny'x soderzhit svedeniya o mikrosxemax PLIS firmy' Cypress, Access mode: [www.cypress.com](http://www.cypress.com).
10. Barkalov A. A. Principy' optimizacii logicheskoy sxemy' mikroprogrammnogo avtomata Mura, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 1998, No. 1, pp. 65–72.
11. Barkalov A. A., Mal'cheva R. V., Soldatov K. A. Matrichnaya realizaciya avtomata Mura s rasshireniem kodov sostoyaniy perexoda, *Nauchnye trudy' Doneckogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Informatika, kibernetika i vy'chislitel'naya texnika» (IKVT-2010)*, 2010, No. 11 (164), pp. 79–83.
12. Baranov S. Logic Synthesis for Control Automata. New York, Kluwer Academic Publishers, 1994, 312 p.

Kirichenko L. O., Demerchan K. A., Kayali E., Habachyova A. Yu.

## MODELING TELECOMMUNICATIONS TRAFFIC USING STOCHASTIC MULTIFRACTAL CASCADE PROCESS

In the work the simulation of telecommunications traffic has been examined, which has multifractal properties, based on a mathematical model of the stochastic multiplicative cascade, the weights of which are beta probability distribution.

**Key words:** a stochastic cascade process, the model of telecommunications traffic, self-similar process, multifractal process.

### SPIISOK LITERATURY\*

1. Leland W. E., Taqqu M. S., Willinger W., Wilson D. V. On the self-similarnature of ethernet traffic, *IEEE/ACM Transactions of Networking*, 1994, No. 2 (1), pp. 1–15.
2. Sheluhin O. I., Smolskiy S. M., Osin A. V. Similar processes in telecommunications. John Wiley & Sons Ltd, England, 2007, 337 p.
3. Stollings V. Sovremenny'e komp'yuterny'e seti 2-e izd. Saint Petersburg, 2003, 784 p.
4. Sheluxin, O. I. Mul'tifraktal'nye infokommunikacionnye prilozheniya prilozheniya. Moscow, Goryachaya Liniya-Telekom, 2011, 578 p.
5. Veitch D., Hohn N., Abry P. Multifractality in TCP/IP traffic: the case against, *Computer Networks-2005*, No. 48 (3), pp. 293–313.
6. Riedi R. H., Doukhan P., Oppenheim G., Taqqu M. S. Multifractal processes. Long Range Dependence: Theory and Applications, Birkhäuser, 2002, pp. 625–715.
7. Kantelhardt J. W. Fractal and Multifractal Time Series, 2008, Access mode: <http://arxiv.org/abs/0804.0747>.
8. Feder E. Fraktaly'. Moscow, Mir, 1991, 254 p.
9. Calvet L., Fisher A., Mandelbrot B. B. Large Deviations and the Distribution of Price Changes, *Cowles Foundation Discussion Paper*, 1997, No. 1165, pp. 1–30.
10. Malla S. Ve'jlyety' v obrabotke signalov. Moscow, Mir, 2005, 671 p.
11. Muzy J. F., Bacry E., Arneodo A. Multifractal formalism for fractal signals: the structure-function approach versus the wavelet-transform modulus-maxima method, *Phys. Rev. E*, 1993, Vol. 47, pp. 875–884.
12. Pavlov A. N., Anishchenko V. S. Mul'tifraktal'nyj analiz signalov, *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya «Fizika»*, 2007, Vol. 7, No. 1, pp. 3–25.

Koshevoy N. D., Sukhobrus E. A.

## THE COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS OF MULTILEVEL MULTIFACTOR EXPERIMENT PLANS

A method for finding the optimal or close to the optimum implementation value of a multi-level multifactorial experiment plan are proposed. To automate the search process using the proposed method, the software was developed. A comparative analysis of the developed software with multi-level program for finding the optimal combinatorial plans of multifactor experiment, which implements the generating permutations method with a minimal number of adjacent elements transpositions are implemented.

**Key words:** software, simplex method, speed.

### SPIISOK LITERATURY\*

1. Koshevyyi M. D., Kostenko O. M., Derhachov V. A. Kompiuterna prohrama «Prohrama poshuku optymalnykh

bahatorivnevykh kombinatornykh planiv bahatofaktornoho eksperymentu». Zareestr. v Derzh. depart. intelektualnoi vlasnosti Ministerstva osvity i nauky Ukrayiny; Reestr. 28.01.2010, Svid. pro reestr. avtor. prava na tvir # 31824.

## MODELS AND ALGORITHMS FOR FINDING ERRORS WHILE SOLVING TASKS USING COMPUTER-ASSISTED LEARNING

An algorithm for diagnosing errors in a computer training program for solutions of the control system characteristic equation using a numerical method is offered. Its feature is the formation of a product knowledge base for searching errors and using dichotomous tree in the process of diagnosis.

**Key words:** computer training programs, diagnosis, dichotomous tree.

### SPISOK LITERATURY'

1. Gurzhij A. N., Krivczov V. S., Kulik A. S., Mirnaya E. V., Chuxraj A. G. Informacionno-analiticheskie modeli upravleniya texnicheski vy'shimi uchebny'mi zavedeniyami. Kharkov, XAI, 2004, 386 p.
2. Pishhuxina O. A., Biryukova D. V., Klymenko O. V. Informacionnaya texnologiya razrabotki komp'yuterny'x obuchayushhix program, *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, 2006, No. 2 (14), pp. 57–62.
3. Kulik A., Chukhray A., Pedan S., Kulik T. Development of the universal environment for creation and translation of intelligent tutoring programs. In *Proceedings of the International Conference of «Interactive computer aided learning» ICL 2009: EPortofolio and Quality in e-Learning*, Austria, Villach, 2009, pp. 579–588.
4. Pedan S. I. Modeli i metody' intellektual'noj komp'yuternoj podderzhki priobreteniya professional'ny'x znanij i umenij, *Systemy upravlinnia, navigatsii ta zviazku: zbirnyk naukovykh prats*, Kiev, 2011, No. 4 (20), pp. 177–190.
5. Pishchukhina O. O., Biriukova D. V., Klymenko O. V. Svidotstvo # 17725. Kompiuterna prohrama «Navchalna

- prohrama rovziazzannia dyferentsiynykh rivnian operatornym metodom». Data reieistratsii 28.08.06.
6. Pishchukhina O. O., Biriukova D. V., Klymenko O. V. Svidotstvo # 17651. Kompiuterna prohrama «Navchalna prohrama rovziazzannia dyferentsiynykh rivnian metodom Eiler». Data reieistratsii 15.08.06.
7. Dergachev K. Yu., Pishhuxina O. A., Klochok A. Yu. Formirovanie kompleksa intellektual'ny'x obuchayushhix programm pri reshenii navigacionny'x zadach, *Lyudina i kosmos*, 2011, pp. 211.
8. Pishhuxina O. A., Klochok A. Yu. Podxod k formirovaniyu obratnoj svyazi v intellektual'ny'x obuchayushhix sistemax v sfere vy'sshego texnicheskogo obrazovaniya, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2011, No. 2, pp. 107–110.
9. Kulik A. S. Signal'no-parametricheskoe diagnostirovanie sistem upravleniya. Kharkov, Gos. ae'rokosmicheskij un-t «XAI», Biznes Inform, 2000, 260 p.
10. Demidovich B. P., Maron I. A. Osnovy' vy'chislitel'noj matematiki. Moscow, Nauka, 1986, 664 p.

Melnykova N. I.

## MODELING OF EXPERT SYSTEM ASSIGNMENT TREATMENT

Developed models expert system of treatment, that optimize the assignment of treatment and providing efficiency convalescence of patients.

**Key words:** model of expert system, optimization of the process, medical systems.

### SPYSOK LITERATURY

1. Chernoruezkij I. G. Metody' prinyatiya reshenij. St. Peterburg, BXV-Peterburg, 2005, 416 p.
2. Hlushkov V. M. Entsyklopediia kibernetky. Kiev, Holov. red. Ukr, rad. entsyklopedii, 1973, 584, [12] p.
3. Shynkaruka V. I. Filosofskyi slovnyk. Kiev, Holov. Red. URE, 1986, 476 p.
4. Savel'ev A. Ya. Prikladnaya teoriya cifrovyy'x avtomatov: ucheb. [dlya vuzov po specz. E'VM]. Moscow, Vy'sshaya shkola, 1987, 272 p.
5. Samofalov K. G., Romankevich A. M., Valujskij V. N. Prikladnaya teoriya cifrovyy'x avtomatov. Kiev, Vyshcha shkola, Holovne vydavnytstvo, 1987, 375 p.
6. Majorov S. A., Novikov G. I., Struktura e'lektronny'x vy'chislitel'ny'x mashin. Lvov, Mashinostroenie. Leningradskoe otdelenie, 1979, 384 p.

7. Kagan B. M. E'lektronny'e vy'chislitel'ny'e mashiny' i sistemy': ucheb. posobie [dlya vuzov]. Moscow, E'nergoatomizdat, 1991, 592 p.
8. Samofalov K. G., Kornejchuk V. I., Tarasenko V. P. Cifrovyy'e E'VM: teoriya i proektirovanie. Kiev, Vyshcha shkola, Holovne vydavnytstvo, 1989, 424 p.
9. Savel'ev A. Ya. Arifmeticheskie i logicheskie osnovy' cifrovyy'x avtomatov. Moscow, Vy'sshaya shkola, 1999, 255 p.
10. Savel'ev A. Ya. Prikladnaya teoriya cifrovyy'x avtomatov. Moscow, Vy'sshaya shkola, 2007, 272 p.
11. Vavilov E. N., Portnoj G. P. Sintez sxem e'lektronny'x cifrovyy'x mashin. Moscow, Sovetskoe radio, 2003, 440 p.
12. Solov'ev G. N. Arifmeticheskie ustrojstva E'VM. Moscow, E'nergiya, 1978, 177 p.

Sabo I. I., Tolok V. O.

## MODELLING THE STAMP PROBLEM IN TWO-DIMENSIONAL FORMULATION

In this paper we construct a solution of the two-dimensional elasticity problem (plane deformation) about stamp action on an elastic half-plane by using the symbolic method of Vlasov V. Z. [1] and the exact solution of the harmonic equation for the half-plane. The substitution of symbolic functions to appropriate harmonic functions allows us to get the exact solution of this problem.

**Key words:** symbolic method, stamp, half-plane, harmonic equation, symbolic function, harmonic function, exact solution.

### SPISOK LITERATURY'

1. Vlasov V. Z., Leont'ev N. N. Balki, plity' i obolochki na uprugom osnovanii. Moscow, Fizmatgiz, 1960, 491 p.
2. Polyanin A. D. Spravochnik po linejnym uravneniyam matematicheskoy fiziki. Moscow, Fizmatlit, 2001, 576 p.
3. Zel'dovich Ya. B., Myshkis A. D. Elementy' prikladnoy matematiki. Moscow, Nauka, 1967, 648 p.
4. Tolok V. A., Shapar V. V. Operatorno-simvol'nye ryady' Vlasova V. Z. v reshenii zadach teorii uprugosti v sisteme Maple, *Hidroakustichnyi zhurnal*, 2006, No. 3, pp. 66–74.
5. Ovskij A. G., Galan E. E., Tolok V. A. Ispol'zovanie sistemy' Maple pri realizacii metoda nachal'nyx funkciy Vlasova, *Zbirnyk Zapiskov natsionalnogo universytetu: Zbirnyk naukovykh statei. Fiziko-matematichni nauky*, 2008, No. 1, pp. 16–26.
6. Ovskij A. G., Tolok V. O. Modelirovaniye sxemy' resheniya trexmernoy zadachi teorii uprugosti v sisteme Maple, *Hidroakustichnyi zhurnal*, 2008, No. 3, pp. 88–97.
7. Gorshkov A. G., Starovoitov E. I., Tarlakovskij D. V. Teoriya uprugosti i plastichnosti. Moscow, Fizmatlit, 2002, 416 p.

Chaplanova E.

## OPERATING SPECIFICATIONS OF THE OBJECT-RELATIONAL DATA MODEL

The article proposed the development of general principles of formation of the operating specifications of object-relational data model. Formally defined the basic operations, and defined basis of the operating specifications of object-relational data model. It is proposed to use the apparatus of the relational algebra with a recursive component to perform operations on relations, which contain nested non-atomic attributes.

**Key words:** object-relational data model, nested attributes recursive relational algebra, the operating specification.

### SPISOK LITERATURY'

1. Makinouchi A. A consideration on Normal Form of Not-Necessarily-Normalized Relations in the Relational Data Model. *Proc. of the 3rd International Conference on Very Large Data Bases*, Tokyo, 1977, pp. 447–453.
2. Garani G. Generalized Relation Data Model, *International Journal of Computer Systems Science and Engineering (IJCSES)*, 2007, Vol. 4, No. 1, pp. 43–59.
3. Mejer D. Teoriya relyacionnyx baz dannyx. Moscow, Mir, 1987, pp. 45–48.
4. Tiori T., Fraj Dzh. Proektirovanie struktur baz dannyx: v 2-x kn. Moscow, Mir, 1985, Vol. 1, p. 287 : Vol. 2, p. 320.
5. Chaplanova E. B., Kasatkina N. V., Tanyanskij S. S. Ob odnom podxode k postroeniyu ob'ektno-relyacionnoj modeli dannyx, *Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka*, Kiyiv, VIKNU, 2009, No. 20, pp. 141–146.

## DISCRETE ANALOGUE OF THE POISSON INTEGRAL FOR A BALL

The Dirichlet problem for the ball with discretely given conditions on the boundary is solved in the work. Construction from hexahedron and octahedron inscribed in a ball is used in the role of computational template. A discrete analogue of the Poisson integral formula in the form of a proportional stratified sampling is obtained.

**Key words:** Dirichlet problem, ball, Poisson integral, pattern, hexahedron, octahedron.

### SPIISOK LITERATURY\*

1. Farlou S. Uravneniya s chastny'mi proizvodnymi dlya nauchny'x rabotnikov i inzhenerov. Moscow, Mir, 1985, 384 p.
2. Levin V. I. Metody' matematicheskoy fiziki. Moscow, Uchpedgiz, 1956, 243 p.
3. Xomchenko A. N., Nadzhafov M. T., Val'ko N. V. Dve modeli usredneniya granichny'x potencialov na adaptivuemom shablonе, *Heometrychne ta kompiuterne modeliuvannia*, 2004, No. 8, pp. 26–30.
4. Kozub N. A., Xomchenko A. N. Ot ravnomernogo raspredeleniya sluchajny'x tochek k bazisu trilinejnoj interpoliacii, *Vestnik Xersonskogo nacional'nogo texnicheskogo universiteta*, 2006, No. 1 (24), pp. 99–102.
5. Xomchenko A. N., Motajlo A. P. Baricentricheskaya zadacha Mebiusa i odnoshagovy'e bluzhdaniya so sluchajny'm startom, *Vestnik Xersonskogo nacional'nogo texnicheskogo universiteta*, 2011, No. 2 (41), pp. 23–26.
6. Xomchenko A. N., Motajlo A. P. Veroyatnostnaya koncepciya polinomial'noj interpoliacii v oktae'dre. *Problemy matematichnogo modeliuvannia: mizhderzh. nauk.-metod. konf.*, 25–27 travnia 2011 r.: tezy dop, Dniprodzerzhynsk, 2011, pp. 20–22.
7. Novozhilov V. V. Voprosy' mehaniki sploshnoj sredy'. L., Sudostroenie, 1989, 400 p.
8. Motajlo A. P. Bazisy' shestiu zlovo go oktae'dra. *Perspektivny'e nauchny'e issledovaniya – 2011: mezhdunar. nauch.-praktich. konf.*, 17–25 fevr. 2011, tezisy'dokl, Sofiya, Bolgariya, 2011, Access mode: <http://www.rusnauka.com>.

Vysochyna O. S., Danich V. N., Parkhomenko V. P.

## MANUFACTURING PROCESSES MODELING OF INDUSTRIAL ENTERPRISES BY MEANS OF ARENA SYSTEM SIMULATION

The article presents a manufacturing processes simulation model of industrial car valves production enterprises. A description of the model building and simulation results were considered.

**Key words:** Arena, discrete-event approach, simulation modelling, simulation of manufacturing systems.

### SPIISOK LITERATURY\*

1. Danich V. N. Modelirovanie by'stry'x i lavinoobrazny'x processov. Lugansk, VNU, 2010, No. 3 (145), pp. 86–101.
2. Mezhdunarodnoe obshhestvo sistemnoj dinamiki = System Dynamics Society : predstavlyayet soboj professional'nyyu associaciyu specialistov v oblasti sistemnoj dinamiki – professorov VUZov, praktikov-konsul'tantov i prepodavatelej so vsego mira [199-?]. – Access mode: <http://www.systemdynamics.org>.
3. Digris A. V. Diskretno-soby'tijnoe modelirovaniye. Minsk, BGU, 2011, 201 p.
4. Vy'sochina O. S., Danich V. N., Demin M. K. Sravnitel'nyj analiz sistem imitacionnogo modelirovaniya dlya resheniya zadachi optimizacii proizvodstvenny'x processov promy'shlennogo predpriyatiya, *Vestnik Vostochnoukr. nacion. un-ta im. V. Dalya*, 2012, No. 8 (179), Vol. 1, pp. 47–51.
5. Lou Averill M., Kel'ton De'vid V. Imitacionnoe modelirovaniye. Saint Petersburg, Piter, 2004, 848 p.

# NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

Deineko A. A., Pliss I. P., Bodyanskiy Ye.

## EVOLVING NEURO-FUZZY SYSTEM COMBINED LEARNING

In this work the evolving neuro-fuzzy system with kernel activation function that contains fuzzy support vector machine, normalized radial basis function neural network and general regression neuro-fuzzy network as subsystems is proposed. This network is tuned using both optimization and memory based approaches and does not inclined to the «curse of dimensionality», is able to real time mode information processing by Deineko A. A., Pliss I. P., Bodyanskiy Ye.

**Key words:** evolving neuro-fuzzy system, normalized radial-basis function neural network, general regression neuro-fuzzy network, fuzzy support vector machine, kernel activation function.

### SPYSOK LITERATURY

1. Osovskij S. Nejronny'e seti dlya obrabotki informacii. Moscow, Finansy' i statistika, 2002, 344 p.
2. Rutkowski L. Computational Intelligence. Methods and Techniques. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2008, 514 p.
3. Nelles O. Nonlinear System Identification. Berlin, Springer, 2001, 785 p.
4. Friedman J., Hastie T., Tibshirani R. The Elements of Statistical Learning. Data Mining, Inference and Prediction. Berlin, Springer, 2003, 552 p.
5. Zahirniak D., Chapman R., Rogers S. [and other] Pattern recognition using radial basis function network. *Dayton, OH: Application of AI Conf*, 1990, pp. 249–260.
6. Specht D. F. A general regression neural network, *IEEE Trans. on Neural Networks*, 1991, Vol. 2, pp. 568–576.
7. Kasabov N. Evolving Connectionist Systems. London, Springer, Verlag, 2003, 307 p.
8. Bodyanskiy Ye., Teslenko N., Grimm P. Hibrid evolving neural network using kernel activation functions. *Conf. Proc. 17th Zittau East-West Fuzzy Coll*, Zittau Goerlitz, HS, 2010, pp. 39–46.
9. Bodianskyi Ye. V., Deineko A. O., Teslenko N. O. Evoliutsiina neironna merezha z yadernymy funktsiiamy aktyvatsii ta adaptivnyi alhorytm yii navchannia, *Naukovi pratsi*, Vol. 143, No. 130, Kompiuterni tekhnolohii, Mykolaiv, Vyd-vo ChDU im. Petra Mohyly, 2010, pp. 71–78.
10. Jang J.-S., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Maching Intelligence. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1997, 640 p.
11. Wang L.-X., Mendel J. M. Fuzzy basis functions, universal approximation and orthogonal least squares learning, *IEEE Trans. on Neural Networks*, 1993, Vol. 3, pp. 807–814.
12. Cios K. J., Pedrycz W. Neuro-fuzzy algorithms. Oxford, IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, Handbook of Neural Computation, 1997, D1. 3:1 – D1. 3:7.
13. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, 1985, Vol. 15, pp. 116–132.
14. Wang L.-X. Adaptive Fuzzy Systems and Control. Design and Stability Analysis. Upper Saddle, N. J., Prentice Hall, 1994, 256 p.
15. Bodyanskiy Ye., Teslenko N. Generalized regression neuro-fuzzy network. *Proc. XIII-th Int. Conf. «Information Reaserch & Application»*, i. TECH 2007, V. 1, Varna, 2007, pp. 219–225.
16. Bodyanskiy Ye., Otto P., Pliss I., Teslenko N. Nonliner process identification and modeling using general regression neuro-fuzzy network. *Proc. 52 nd Int. Sci. Coll. «Computer Science Meets Automation.»*, TU Ilmenau (Thuer.), 2007, pp. 23–27.
17. Bodyanskiy Ye., Teslenko N. General regression neuro-fuzzy network for identification of nonstationary plants. *Int. J. Informaion Technologies and Knowledge*, 2008, Vol. 2, No. 2, pp. 136–142.
18. Bishop C. M. Neural Networks for Pattern Recognition. Oxford, Clarendon Press, 1995, 482 p.
19. Vapnik V. N. The Nature of Statistical Learning Theory. N.Y., Springer, 1995, 188 p.
20. Vapnik V. N. Statistical Learning Theory: Adaptive and Learning Systems. N. Y., John Wiley & Sons, 1998, 736 p.
21. Suykens J.A.K., Gestel T.V., Brabanter J.D. [and other] Least Squares Support Vector Machines. Singapore, World Scientific, 2002, 294 p.
22. Lin Ch.-F. Wang Sh.-D. Fuzzy Support Vector Machines, *IEEE Trans. on Neural Networks*, 2002, Vol. 13, No. 2, pp. 646–671.
23. Tsujinishi D., Abe S. Fuzzy Least Squares Support Vector Machines for multiclass problems, *Neural Networks*, 2003, Vol. 16, pp. 785–792.
24. Hansen L. K., Salamon P. Neural networks ensembles, *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1990, Vol. 12, pp. 993–1000.
25. Sharkey A. J. C. On combining artificial neural nets/Connect. Sci, 1996, Vol. 8, pp. 299–313.
26. Hashem S. Optimal linear combination of neural networks, *Neural Networks*, 1997, Vol. 10, pp. 599–614.
27. Naftaly U., Intrator N., Horn D. Optimal ensemble averaging of neural networks, *Network: Comput. Neural Syst.*, 1997, Vol. 8, pp. 283–296.

28. Bodianskyi Ye. V., Mykhalov O. I., Pliss I. P. Adaptyvne vyiavlennia rozladhan v obiektakh keruvannia za dopomohoioi shtuchnykh neironnykh merezh. Dnipropetrovsk, Systemni tekhnolohii, 2000, 140 p.
29. Polyak B. T. Vvedenie v optimizaciyu. Moscow, Mir, 1984, 541 p.
30. Bodyanskiy E. V., Pliss I. P., Solov'eva T. V Adaptivnoe oboobshchennoe prognozirovaniye mnogomernykh sluchajnykh posledovatel'nostej. Doklady' AN USSR, 1989, A, No. 9, pp. 73–75.

Romanuke V. V.

## OPTIMAL STRATEGIES CONTINUUM FOR PROJECTING THE FOUR-MOUNT CONSTRUCTION UNDER INTERVAL UNCERTAINTIES WITH INCORRECTLY PRE-EVALUATED TWO LEFT AND ONE RIGHT ENDPOINTS

There is investigated a two-person game model of optimizing cross-section squares of the four-mount construction, where the model kernel is defined on the six-dimensional hyperparallelepiped as the product of three closed intervals of unit-normed loads and of three closed intervals of unit-normed cross-section squares. For the case of incorrectly pre-evaluated two left and one right endpoints of those interval uncertainties there has been proved that the projector may obtain an optimal strategies continuum. A criterion for singularizing that continuum has been proposed.

**Key words:** optimizing cross-section squares, two-person game model, four-mount construction, incorrect pre-evaluation.

### REFERENCES

1. Darkov A. V., Shaposhnikov N. N. Stroitel'naya mehanika: [uchebnik dlya stroit. specz. vuzov]. Moscow, Vy'ssh. shk., 1986, 607 p.
2. Kiselev V. A. Stroitel'naya mehanika: Specz. kurs. Dinamika i ustojchivost' sooruzhenij: [uchebnik dlya vuzov]. Moscow, Strojizdat, 1980, 616 p.
3. Vorob'ev N. N. Teoriya igr dlya ekonomistov-kibernetikov. Moscow, Nauka, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury', 1985, 272 p.
4. Romaniuk V. V. Modeluvannia dii normovanoho odynychnoho navantazhennia na try kolony odnakovoii vysoti u budivelni konstruktsii i znakhodzhennia optymalnoi ploshchi kozhnoi opory, *Problemy tryboloohii*, 2010, No. 3, pp. 18–25.
5. Truxaev R. I. Modeli prinyatiya reshenij v usloviyah neopredelennosti. Moscow, Nauka, 1981, 258 p.
6. Chernoruczkij I. G. Metody prinyatiya reshenij. St. Peterburg, BXV–Peterburg, 2005, 416 p.
7. Romaniuk V. V. Rehuliarna optymalna strategiia proektuvalnyka u modeli dii normovanoho odynychnoho navantazhennia na N-kolonnii budivelnu konstruktsii-oporu, *Problemy tryboloohii*, 2011, No. 2, pp. 111–114.
8. Petrosyan L. A., Zenkevich N. A., Semina E. A. Teoriya igr: [ucheb. posobie dlya un-tov]. Moscow, Vy'sshaya shkola, Knizhnyj dom «Universitet», 1998, 304 p.
9. Romaniuk V. V. Pro osoblyvi komponenty optymalnoi strategii proektuvalnyka u modeli dii normovanoho odynychnoho navantazhennia na trykolonnu budivelnu konstruktsii, *Problemy tryboloohii*, 2011, No. 1, pp. 44–46.

Subbotin S. A.

## CONSTRUCTED FEATURES FOR AUTOMATIC CLASSIFICATION OF STATIONARY TIMING SIGNALS

The challenge for automation to reduce the dimension of the data has been solved for the construction of diagnostic and recognizing patterns, based on steady-state one-dimensional signals, distributed in time. The set of indicators characterizing the properties of the signals, which allows to reduce the description of the classified objects is firstly proposed. The experiments on studying of the proposed indicator set at practical problem solving s are conducted.

**Key words:** pattern recognition, technical diagnosis, feature extraction.

### SPISOK LITERATURY'

1. Subbotin S. O., Oliynyk A. O., Oliynyk O. O. Neiterativni, evoliutsiini ta multyahentni metody syntezu nechitkolohichnykh i niromerezhnykh modelei: monohrafiia. Zaporizhzhia, ZNTU, 2009, 375 p.
2. Boguslaev A. V., Olejnik Al. A., Olejnik An. A., Pavlenko D. V., Subbotin S. A. Progressivny'e texnologii modelirovaniya, optimizacii i intellektual'noj avtomatizacii e'tapov zhiznennogo cikla aviacionnyx dvigatelej: monografiya. Zaporozh'e, OAO «Motor-Sich», 2009, 468 p.

3. Oliinyk A. O., Subbotin S. O., Oliinyk O. O. Evoliutsiini obchyslennia ta prohramuvannia: navchalnyi posibnyk. Zaporizhzhia, ZNTU, 2010, 324 p.
4. Dash M., Liu H. Feature selection for classification, *Intelligent data analysis*, 1997, No. 1, pp. 131–156.
5. Hyvarinen A., Karhunen J., Oja E. Independent component analysis. New York, John Wiley & Sons, 2001, 481 p.
6. Lee J. A., Verleysen M. Nonlinear dimensionality reduction. New York, Springer, 2007, 308 p.
7. Jiang Y., Zhang R., Liu G. [et al.] Multifactor dimensionality reduction for detecting haplotype-haplotype interaction. *Fuzzy systems and knowledge discovery: sixth international conference, 14–16 August 2009, Tianjin: proceedings*, Los Alamitos, IEEE, 2009, pp. 241–245.
8. Oppenheim A., Shafer R. Cifrovaya obrabotka signalov. Moscow, Texnosfera, 2007, 856 p.
9. Mallat S. A wavelet tour of signal processing: the sparse way. Waltham, Academic Press, 2008, 832 p.
10. For A. Vospriyatie i raspoznavanie obrazov. Ed. by G. P. Katy'sa. Moscow, Mashinostroenie, 1989, 271 p.
11. Forsyth D., Ponce J. Computer vision: a modern approach. New Jersey, Prentice Hall, 2002, 693 p.
12. Subbotin S. A. The training set quality measures for neural network learning. *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2010, Vol. 19, No. 2, pp. 126–139.
13. Dubrovin V., Subbotin S., Morshchavka S., Piza D. The plant recognition on remote sensing results by the feed-forward neural networks. Smart Engineering System Design, 2001, No. 3, pp. 251–256.
14. Guyon I. Arcene data set. Access mode: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Arcene>.
15. Dubrovin V. I., Subbotin S. A., Boguslaev A. V., Yacenko V. K. Intellektual'nye sredstva diagnostiki i prognozirovaniya nadezhnosti aviadvigatelej: monografiya. Zaporozh'e, OAO «Motor-Sich», 2003, 279 p.

Tkachenko R., Mashevska M.

## NEURO-FUZZY SYSTEM FOR AUTOMATION SYNTHESIS OF MATHEMATICAL MODELS FOR EVALUATING AN INDEX OF LEVEL OF BIOCOMFORT

The process of creating the mathematical model by the neuro-fuzzy modeling is described. The stages of construction of the fuzzy model to evaluating the level of biocomfort of habitation are considered.

**Key words:** neuro-fuzzy system, compact model, parameters of biocomfort.

### SPYSOK LITERATURY

1. Tkachenko R., Mashevska M. Intelektualizovana sistema otsiniuvannia parametiv biokomfortu prymishchennia, *Visnyk Nats. un-tu «Lvivska politehnika»: Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii*, 2010, No. 710, pp. 133–138.
2. Tkachenko O., Tkachenko R., Hirniak Yu., Ivakhiv O. Mushenyk P. Rule-based fuzzy system of improved accuracy. Materials of 56<sup>th</sup> International scientific colloquium (Ilmenau University of Technology, 12–16 September 2011), Ilmenau, TU Ilmenau, 2011, 25 p.
3. Tkachenko R. Nova paradyhma shtuchnykh neironnykh merezh priamooho poshyrennia, *Visnyk Nats. un-tu «Lvivska politehnika»: Kompiuterni nauky ta informatsiini tekhnolohii*, 1999, No. 386, pp. 43–54.
4. Bejker Dzh. Grejvs-Morris P., transl. by Raxmanova E. A., Suetina S. P., ed by. Gonchar A. A. Moscow, Mir, 1986, 502 p.
5. Tkachenko R. O., Mashevska M. V. Elementy arkhitektury dlia intellektualnoi sistemy pobudovy matematichnoi modeli prohnozuvannia rivnia teplovoho komfortu, *Naukovyi visnyk Natsionalnogo lisotekhnichnogo universytetu Ukrayiny: zbirnyk naukovo-teknichnykh prats*, Lviv, RVV NLTU Ukraine, 2011, No. 21.10, pp. 284–290.

## PROGRESSIV INFORMATICS TECHNOLOGIES

Vershina A. I., Kirichek G. G.

### MODEL SYSTEM OF INFORMATION SUPPORT FOR LEARNING

Investigated the influence of different variants of interdependent disciplines to the process of acquiring knowledge for future use, the resulting figures in the system of information support of learning.

**Key words:** information system, discipline, learning process, probability, information resource.

### SPISOK LITERATURY'

1. Maksimovich G. I. E'lektronny'e biblioteki, *Deloproizvodstvo*, 2001, No. 1, pp. 85–89.
2. Zghurovskyi M. Z., Pankratova N. D. Osnovy systemnoho analizu: pidruch. dlia stud. vyshch. navch. zakl. Kyiv, Vyadvyncha hrupa VNU, 2007, 543 p.

3. Bykov V. Yu. Modeli orhanizatsiinykh system vidkrytoi osvity = Models of the Education Organizational Systems: monohrafia. Kyiv, Atika, 2009, 682 p.
4. Barkova O. V. Dosvid stvorennia naukovoi elektronnoi biblioteky v Natsionalnii bibliotetsi Ukrayny imeni V. I. Vernadskoho, *Reestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*, 2001, Vol. 3, No. 4, pp. 51–62.
5. Antopol'skij A. B., Majstrovich T. V., Chugunov A. V. Formirovaniye Nacional'noj e'lektronnoj biblioteki i problemy vy'bora bazovy'x principov organizacii fonda e'lektronny'x dokumentov. Nacional'naya e'lektronnaya biblioteka: Proekty' metodicheskix materialov po formirovaniyu fonda / Rossiskaya gosudarstvennaya biblioteka, St. Peterburg, 2004, pp. 3–13.
6. Kyrychek H. H. Keruvannia informatsiinymy potokamy na vsikh rivniakh ierarkhii otrymannia znan, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2010, No. 1, pp. 70–78.

Kulik A. S., Luchenko O. O., Firsov S. N.

## ALGORITHMIC SOFTWARE OF DIAGNOSE AND SERVICEABILITY OF ATTITUDE AND STABILIZATION SATELLITE SYSTEM RESTORATION MODULES

Unified description of the processes in the model blocks and the satellite system as a process of development of abnormal situations and process of its parry is presented. In addition, four-level scheme of parameterization of the direct criterion of failure is offered. Models and tools of satellite systems serviceability restoration are presented.

**Key words:** attitude and stabilization satellite system, redundancy, sensors.

### SPISOK LITERATURY'

1. Baty'rev A. I., Baty'rev B. I., Bandarecz G. K. E'ksperimental'naya obrabotka sistem upravleniya ob'ektov raketno-kosmicheskoy texniki: ucheb. posobie. Ed. by Yu. M. Zlatkin, V. S. Krivcov, A. S. Kulik, V. I. Chumachenko. Kharkov, Nacz. ae'rokosm. un-t «Xar'k. aviacz. In-t», NPP «Karton-Arkos», 2008, 501 p.
2. Brovkin A. G., Burdy'chov B. G., Gordijko S. V. Bortovy'e sistemy' upravleniya kosmicheskimi apparatami: Uchebny'e posobiya. Ed. by A. S. Sy'rov. Moscow, MAI S. V-PRINT, 2010, 340 p.

3. Kulik A. S., Luchenko O. A., Firsov S. N. Koncepciya obespecheniya zhivuchesti sputnikovy'x sistem upravleniya orientaciej i stabilizaciej, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2011, No. 2 (25), pp. 41–47.
4. Kulik A. S., Luchenko O. A., Gavrilko O. I. Soderzhanie zadach po obespecheniyu otkazoustojchivosti, reshaemy'x v processe razrabotki sistemy' upravleniya uglovym dvizheniem kosmicheskogo letatel'nogo apparata, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2005, No. 1 (13), pp. 154–161.
5. Kulik A. S. Signal'no-parametricheskoe diagnostirovanie sistem upravleniya. Kharkov, Gos. ae'rokosmicheskij un-t «XAI»; Biznes Inform, 2000. – 260 p.

Levykin V. M., Kostenko O. P., Petrichenko O. V.

## METHOD DEVELOPMENT FOR SYSTEM DEMANDS ASSESSMENT TO THE DECISION OF MARKETING TASKS FOR INFORMATION SYSTEMS PROJECTING

In this work the method of estimation of system requirements to the decision of marketing tasks are developed for planning of the marketings informative systems.

**Key words:** marketing informative system, informative space, system requirements, metaphorical multidimensional information meta-space.

### SPYSOK LITERATURY

1. Ward J. Strategic planning for information systems. Willey, 1997, 586 pp.
2. Neumoin, V. Software Requirements Traceability in Reengineering Perspective, *Problemy' programmirovaniya*, 2002, No. 1–2, pp. 91–97.
3. Baxmann P. Programmn'y'e sistemy'. Moscow, Finansy' i Statistika, 1981, 287 p.
4. Levykin V. M., Kostenko O. P. Rozrobka prostorovo-triaktonoho pidkhodu dla proektuvannia marketynhovych informatsiinykh system . *Soma dystantsiina naukovo-*

- praktichna konferentsiia za mizhnarodnoiu uchastiu «systemy pidtrymky pryniattia rishen. Teoriia i praktika. SPPR-2011». Cherven, 2011 r., Ukraina*, m. Kyiv, pp. 50–53.
5. Bryabrin V. M. F-yazy'k: formalizm dlya predstavleniya znanij v intellektual'noj dialogovoj sisteme, *Prikladnaya informatika. Sb. statej*, Moscow, Finansy' i statistika, 1981, pp. 73–103.
6. Kreg L. Primenenie UML i shablonov proektirovaniya. Moscow, Vil'yams, 2001, 396 p.
7. Zade L. A. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoj i ego primenie k prinyatiyu priblzhenny'x reshenij. Moscow, Mir, 1976, 363 p.

8. Borisov A. N., Alekseev A. V., Krumberg O. A. i dr. Modeli prinyatiya reshenij na osnove lingvisticheskoy peremennoj. Riga, 1982, 256 p.
9. Leonenkov A. V. Nechetkoe modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH. St. Peterburg, BXV-Peterburg, 2003, 719 p.
10. Anderson Dzhordzh V., Anderson D. V., Larokka D., ed. by B. M. Kotsovskii, SAP za 24 hodyny: per. z anhl. Dnipropetrovsk, Balans Biznes Buks, 2007, 432 p.

Rizun N. O., Taranenko Y. K.

## MOBILE SYSTEM OF COMPUTER TESTING AS THE INSTRUMENT OF INTENSIFICATION OF STUDY PROCESS IN HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

Mobile system of computer testing, which allows intensifying study process because of ensuring of mobility, economy and confidentiality of testing control by means of using the technology of a short-term session of wireless connection with the server, which is located in the Internet and contains the base of test tasks and means of testing results identification, is suggested.

**Key words:** mobile system, study process, testing session, wireless connection.

### SPYSOK LITERATURY

1. Zgurovskij M. Z. Obshhestvo znanij i informacii – tendencii, vy'zovy', perspektivy', *Zerkalo nedeli*, 2003, No. 19 (444), May, 24.
2. Tsidelko V. D., Jaremchuk N. A., Shvedova V. V. Avtomatyrovana sistema testuvannia, navchannia ta monitorynju: patent na korysnu model №43616U. Ukraina: MPK G09B 7/00, Zaivnyk ta patentovlasnyk: Natsionalnyi tekhnichniy universytet Ukrayiny «Kyivskyi politekhnichnyi instytut», No. u200902620, zaival. 23.03.2009, opubl. 25.08.2009, biul. № 16, 2009.
3. Andrushchenko V. P., Kudin A. P., Zhabeev G. V., Padalka M. P. Kompleks zasobiv dlja zabezpechennia interaktyvnoho navchalnogo procesu: patent na korysnu model №33619U. Ukraina: MPK G09B 5/00, Zaivnyk ta patentovlasnyk: Natsionalnyi pedahohichnyi universytet imeni M. P. Drahomanova, zaival. 12.12.2007; opubl. 25.06.2008, biul. № 23, 2008.
4. Nazarenko A. P., Parshyn H. N., Safranova L. I., Stanevskiy A. H., Patentobladatel: Nazarenko A. P., Parshyn H. N., Safranova L. I., Stanevskiy A. H. Mobilna kompiuterna sistema navchannia: patent na korysnu model № 77 991 U1. Rossiya: G09B 5/00, G09B 21/06 / № 2007102241/22, zaival. 23.01.2007, opubl. 01.11.2008, biul. № 31, 2008.
5. Kalugyan K. X., Shcherbakov S. M. Komp'yuternaya sistema testirovaniya znanij kak komponent informacionnoj nauchno-obrazovatelnoj sredy' VUZa, *Vestnik Akademii*, 2005, No. 1 (20), pp. 61–66.
6. Markus L. I., Taly'gin A. K. Universal'nye programmy testovogo kontrolya znanij v VUZe. *Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: prioritety' razvitiya i podgotovka kadrov: Materialy' Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii Asociacii avtomobil'nyx inzhenerov (AAI), posvyashchennoj 145-letiyu, MGTU «MAMI»*, Vol. 12, Moscow, MGTU «MAMI», 2010, pp. 136–143.

Hahanov V. I., Chumachenko S. V., Litvinova E. I., Guz O. A.

## DIAGNOSIS INFRASTRUCTURE FOR SOFTWARE-HARDWARE SYSTEMS

An infrastructure and technologies for analyzing cyberspace are proposed. A transactional graph model and method for diagnosing digital systems-on-chips, focused to considerable reducing the time of fault detection and memory for storing the diagnosis matrix by forming ternary relations in the form of test, monitor, functional component, are created.

**Key words:** infrastructure, information analysis, diagnosis, graph model, digital system-on-chip.

### SPISOK LITERATURY'

1. Osnovy' texnicheskoy diagnostiki. Ed. by P. P. Parxomenko. Moscow, E'nergiya, 1976, 460 p.
2. Osnovy' texnicheskoy diagnostiki (Optimizaciya algoritmov diagnostirovaniya, apparaturny'e sredstva). Ed. by P. P. Parxomenko. Moscow, E'nergiya, 1981, 320 p.
3. Bondarenko M. F., Guz' O. A., Xaxanov V. I., Shabanov-Kushnarenko Yu. P. Infrastruktura mozgopodobnyx vy'chislitel'nyx processov. Kharkov, Novoe Slovo, 2010, 160 p.
4. Xaxanov V. I., Xaxanova I. V., Litvinova E. I., Guz' O. A. Proektirovanie i verifikaciya cifrovyyx sistem na kristallax. Kharkov, Novoe slovo, 2010, 528 p.
5. Semenec V. V., Xaxanova I. V., Xaxanov V. I. Proektirovanie cifrovyyx sistem s ispol'zovaniem yazy'ka VHDL. Kharkov, XNURE', 2003, 492 p.

- 
- 6. Xaxanov V. I., Xaxanova I. V. VHDL+Verilog = sintez za minuty'. Kharkov, XNURE', 2006, 264 p.
  - 7. IEEE Standard for Reduced-Pin and Enhanced-Functionality Test Access Port and Boundary-Scan: Architecture IEEE Std 1149.7, 2009, 985 p.
  - 8. Da Silva F., McLaurin T., Waayers T. The Core Test Wrapper Handbook. Rationale and Application of IEEE Std. 1500<sup>TM</sup>. Springer, 2006, XXIX, 276 p.
  - 9. Marinissen E. J., Yervant Zorian Guest Editors' Introduction: The Status of IEEE Std 1500. IEEE Design & Test of Computers, 2009, No. 26 (1), pp. 6–7.
  - 10. Benso A., Di Carlo S., Prinetto P., Zorian Y. IEEE Standard 1500 Compliance Verification for Embedded Cores. *IEEE Trans. VLSI*, 2008, No. 16 (4), pp. 397–407.
  - 11. Xaxanov V. I., Litvinova E. I., Chumachenko S. V., Guz' O. A. Logicheskij associativnyj vy'chislitel', *E'lektronnoe modelirovaniye*, No. 1, 2011, pp. 73–83.
- 

## THEORY AND METHODS CONTROL OF AUTOMATIC CONTROL

---

Alexandrova T. Ye.

### PARAMETRIC SYNTHESIS OF ROBUST OPTIMAL STABILIZERS OF MOVING OBJECTS

The problem of optimal synthesis for the accuracy of the stabilizer of a moving object with the requirement of robustness of the closed-loop system stability to changes in design parameter of the object.

**Key words:** robust system, the sensitivity function, the integral quadratic functional, the weights.

#### SPISOK LITERATURY'

- 1. Rozenvasser E. N., Yusupov R. M. Chuvstvitel'nost' sistem avtomaticheskogo upravleniya. L., E'nergiya, 1971, 292 p.
- 2. Tomovich R., Vukobratovich M. Obshchaya teoriya chuvstvitel'nosti. Moscow, Sov. Radio, 1972, 240 p.
- 3. Aleksandrov E. E., Bex M. V. Avtomatizirovannoe proektirovanie dinamicheskix sistem s pomoshh'yu funkciy Lyapunova. Kharkov, Osnova, 1993, 113 p.
- 4. Aleksandrov E. E., Aleksandrova T. E., Kostyanik I. V. Sintez robastnogo stabilizatora dlya pozicionnogo e'lektroprivoda, *Tekhnichna elektrodinamika. Special'nij vypusk «Silova elektronika ta energoefektivnist'»*, 2010, Part 1, pp. 178–181.
- 5. Ximmel'blau D. Prikladnoe nelinejnoe programmirovaniye. Moscow, Mir, 1975, 534 p.

Lozynsky A. O., Demkiv L. I.

### SYNTHESIS OF MULTICRITERIAOPTIMAL CONTROLWITH VARIABLEWEIGHTS

In paper the dynamical systems with Takagi-Sugeno fuzzy controller are considered. A new approach to constructing functional for multicriteria optimization is suggested, which, unlike traditional, allows the change of weight multipliers of integral quality criteria in time.

**Key words:** fuzzy logic, membership function, functional of quality, multicriteria optimization.

#### SPYSOK LITERATURY

- 1. Kolesnikov A. A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya. Moscow, E'nergoatomizdat, 1994, 344 p.
- 2. Krasnoshhechenko V. I., Grishchenko A. P. Nelinejnye sistemy: geometricheskij metod analiza i sinteza. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E'. Baumana, 2005, 520 p.
- 3. Lozynskyi A. O. Doslidzhennia stiikosti system z rehuliatorm Takahi-Suheno-Kanhi, *Visnyk NTU «KhPI» «Problemy avtomatizirovannogo ehlektroprovoda»*, 2008, Vol. 30, pp. 89–90.
- 4. Lozynskyi A. O., Demkiv I. Analiz stiikosti system z rehuliatorm Takahi-Suheno. IPSH MON i NAN Ukrayiny «Nauka i osvita», 2008, Vol. 4, pp. 545–549.
- 5. Marushchak Ya. Yu. Vykorystannia standartnykh form rozpodilu koreniv pry syntezi elektromekhanichnykh system metodom parametrychnoi optymizatsii, *Visnyk Kharkivskoho Natsionalnogo politekhnichnogo universytetu. Problemy avtomatyzovanoho elektroprovodu. Teoriia i praktyka*, 2001, No. 10, pp. 88–90.
- 6. Fel'dbaum A. A. Osnovy teorii optimal'nyx avtomaticheskix system. Moscow, Nauka, 1966, 624 p.
- 7. Huang H. Z. Fuzzy multi-objective optimization decision-making of reliability of series system, *Microelectronics Reliability*, 1997, Vol. 37, No. 3, pp. 447–449.
- 8. Isidori A. Nonlinear control systems. Springer-Verlag, 1995, 550 p.

- 
- 9. Loetamonphong J., Fang S. C., Young R.E. Multi-objective optimization problems with fuzzy relation equation constraints, *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, No. 127, pp. 141–164.
  - 10. Mitsuishi T., Shidama Y. Minimization of Quadratic Performance Function in T-S Fuzzy Model. FUZZ-IEEE'02. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 2002, pp. 75–79.
  - 11. Naidu D. S. Optimal control systems. CRC Press, 2002, 433 p.
  - 12. Shih C. J., Chang C. J. Pareto optimization of alternative global criterion method for fuzzy structural design, *Computers and Structures*, 1995, Vol. 54, No. 3, pp. 455–460.
  - 13. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control, *IEEE Trans. on Syst.,* 1985, V. SMC-15, No. 1, pp. 116–132.
- 

## CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

---



---

Busher V. V.

### OPTIMAL ASTATIC CONTROL WITH FRACTIONAL ORDER INTEGRAL-DIFFERENTIAL REGULATORS

The research of close-loop systems with fractional integral-differential regulators with order from 0,5 to 2,0 is carried out. Parameters of regulators for optimal dynamic and static control are defined. Presented methods of numeric solve of fractional equation for their microprocessor's realization.

**Key words:** astatic system, fractional integral, fractional differential.

#### SPISOK LITERATURY\*

- 1. Busher V. V. Identifikaciya e'lementov klimaticheskix sistem differencial'ny'mi uravneniyami drobnogo poryadka, *Elektromashinobuduvannia ta elektroobladnannia*, Kiiv, «Tekhnika», 2010, No. 75, pp. 68–70.
- 2. Martinyuk V. V., Busher V. V. Model' superkondensatora s drobno-integriruyushhim e'lementom i metod identifikacii ee parametrov, *Privodnaya texnika*, M, 2011, No. 9–10 (109).

Kozyrev V. G.

### MULTI-TIME-SCALE TERMINAL CONTROL OF MOTOR AXIS ANGULAR VELOCITY

Reduced law of terminal control of electric motor shaft speed of rotation utilizing truncated motor dynamics asymptotic approximation and appreciably simplifying control algorithm is proposed. Modeling of the dynamics of the shaft with the proposed control law has shown its effectiveness.

**Key words:** multi-time-scale system, terminal control, reduced asymptotic of control law.

#### SPISOK LITERATURY\*

- 1. Vasil'eva A. B., Butuzov V. F. Asimptoticheskie razlozheniya reshenij singulyarno vozmushhenny'x uravnenij. Moscow, Nauka, 1973, 272 p.
- 2. Yackel R. A., Kokotovic P. V. A boundary layer method for the matrix Riccati equation, *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1973, Vol. 18, No. 1, February, pp. 17–24.
- 3. Kwakernaak H. O., Bosgra H., Meinsma G. Design Methods for Control Systems. Notes for a course of the Dutch Institute of Systems and Control, 2006, 319 p.
- 4. Kozyrev V. G. Reducirovannyj optimal'nyj regul'uator vy'xoda singulyarno vozmushhenny'x system, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2005, No. 1, pp. 134–139.

# ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (РІУ) призначений для публікації найбільш значимих наукових і практичних результатів досліджень учених вищих навчальних закладів і наукових організацій.

Журнал включений у перелік наукових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття вчених ступенів доктора і кандидата технічних наук і фізико-математичних наук (радіофізики).

Статті, що опубліковано в журналі, реферуються в реферативних журналах і базах даних ВІНІТІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Журнал міститься у міжнародній базі наукових видань Index Copernicus (<http://journals.indexcopernicus.com/index.php>). Інтернет-сторінка журналу:

<http://journal.zntu.edu.ua/ric/index.php?page=index>.

Журнал видається два рази в рік і розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

Для розгляду питання про публікацію статті в редакцію журналу необхідно вислати поштою або представити особисто наступне:

- 1) рукопис (роздруківку) статті, підписаний на останній сторінці всіма авторами, в двох екземплярах;
- 2) відомості про авторів;
- 3) оригінал експертного висновку про можливість відкритого опублікування статті;
- 4) супровідний лист-клопотання з організації, де була виконана робота (або лист автора);
- 5) рецензію від фахівця в даній області з вченим ступенем доктора наук. Підпись рецензента обов'язково мусить бути завірений.
- 6) диск з наступними файлами:
  - електронна версія статті, повністю ідентична роздруківці;
  - відомості про авторів;
  - рисунки у графічному форматі .tif.

Файли з матеріалами статті можна вислати електронною поштою або передати особисто на оптичному диску або USB-накопичувачі.

**Вимоги до оформлення статті.** Приймаються статті, набрані в редакторі Microsoft Word.

Параметри сторінки:

- розмір паперу – А4 (210x297);
- орієнтація – книжкова;
- шрифт – Times New Roman, розмір – 12 pt;
- міжрядковий інтервал – полуторний;
- верхнє поле – 20 мм, нижнє – 20 мм, ліве – 25 мм, праве – 15 мм.

Сторінки рукопису повинні бути пронумеровані. Не допускаються розбіжності рукопису з електронною версією статті. Текст рукопису не повинен мати рукописних виправлень та позначок.

**Послідовність розміщення матеріалу статті:**

- 1) індекс УДК;
- 2) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова українською мовою (для громадян України);
- 3) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова російською мовою;
- 4) прізвища й ініціали авторів, назва статті, анотація й ключові слова англійською мовою;
- 5) текст статті;
- 6) список літератури.

**Текст статті.** Приймаються статті російською, українською та англійською мовами. Розмір статті до 0,5 авторського аркуша. У статті слід уникати зайвої деталізації, проміжних формул і висновків; не слід наводити відомі факти, повторювати зміст таблиць і ілюстрацій у тексті. Стаття не повинна мати граматичних або інших помилок, а також повинна відповісти тематиці журналу й вимогам ВАК щодо фахових видань.

**Структура** тексту статті мусить містити такі необхідні елементи: постановка проблеми в загальному виді і її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких розпочато розв'язання даної проблеми, і на які опирається автор; виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, висновки по даному дослідженню й перспективи подальших досліджень у даному напрямку. Матеріал публікації мусить бути розбитий на підрозділи не більше двох рівнів.

**Рисунки** розміщуються в тексті й додатково додаються в окремих файлах (формат .tif з роздільною здатністю 150–300 дрі, чорно-білі або у градаціях сірого). Розмір рисунків не повинен перевищувати ширини сторінки (17 см) або ширини колонки (8 см). Написи на рисунках бажано виконувати шрифтом Times New Roman, розмір 10. Рисунки нумерують і підписують унизу.

**Формули** виконуються за допомогою вбудованого в Word редактора Microsoft Equation. Формули нумерують у круглих дужках праворуч. Формули великого розміру записуються в кілька рядків.

**Нумерація** рисунків, формул і таблиць наскрізна одноівнева.

Обсяг **анотації** не повинен перевищувати 40 слів.

**Ключові слова** наводяться в називному відмінку у кількості до десяти слів.

**Список літератури** наприкінці статті подається мовою оригіналу і складається в порядку загадування посилань у тексті й відповідно до діючого стандарту на бібліографічний опис. Посилання на літературу в тексті нумеруються послідовно й позначаються цифрою у квадратних дужках.

У **відомостях про авторів** необхідно навести:

- 1) прізвище, ім'я, по батькові (повністю);
- 2) учений ступінь;
- 3) посаду;
- 4) місце роботи;
- 5) електронну адресу;
- 6) робочий, домашній, мобільний телефони.

Статті, які не відповідають зазначеним вимогам, не приймаються до розгляду.

Всі статті проходять закрите рецензування і в разі потреби можуть бути повернуті автору на доробку. Редакція залишає за собою право на літературну редакцію тексту статті без повідомлення автору.

Рукописи й диски не вертаються, коректура та відбитки статей авторам не надсилаються.

**Адреса редакції:** 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, редакція журналу «РІУ»

Тел.: (061) 7-698-2-96 – редакційно-видавничий відділ  
(061) 7-644-6-62 – головний редактор

Факс: (061) 7-642-1-41

E-mail: [rvv@zntu.edu.ua](mailto:rvv@zntu.edu.ua)

*Наукове видання*

**Радіоелектроніка,  
інформатика,  
управління**

**№ 1/2012**

**Науковий журнал**

Головний редактор – д-р техн. наук Піза Д. М.

Заст. головного редактора – канд. техн. наук Дубровін В. І.

Комп'ютерний моделювання та верстання

Зуб С. В.

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

*Підписано до друку 02.07.2012. Формат 60×84/8.*

*Папір офс.Різогр. друк. Ум. друк. арк. 20,2.*

*Тираж 300 прим. Зам. № 947.*

*69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64*