

Запорізький національний технічний університет



# Радіоелектроніка Інформатика Управління

**1(24)'2011**

## 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 **КВ № 6904**

Засновник і видавник – Запорізький національний технічний університет

Запоріжжя, ЗНТУ  
2011

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 (фізики).

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 пе-ріодика 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.

**Заст. головного редактора** – канд. техн. наук Дубровін В. І.

**Члени редколегії :**

д-р фіз.-мат. наук Ахметшин А. М.  
д-р техн. наук Волков О. В.  
д-р фіз.-мат. наук Горбань О. М.  
д-р фіз.-мат. наук Горр Г. В.  
д-р техн. наук Гостєв В. І.  
д-р фіз.-мат. наук Дробахин О. О.  
д-р техн. наук Карпуков Л. М.  
д-р фіз.-мат. наук Корніч Г. В.

д-р техн. наук Кулік А. С.  
д-р фіз.-мат. наук Матюшин В. М.  
д-р фіз.-мат. наук Онуфрієнко В. М.  
д-р фіз.-мат. наук Погосов В. В.  
д-р техн. наук Потапенко Є. М.  
д-р техн. наук Толок В. О.  
д-р техн. наук Труфанов І. Д.  
д-р фіз.-мат. наук Чумаченко В. П.

Рекомендовано до видання вченого радиою Запорізького національного технічного університету, протокол № 4 від 22.11.2010 р.

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

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом  
Запорізького національного технічного університету

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

Тел: (061) 769-82-96 – редакційно-видавничий відділ  
Факс: (061) 764-21-41  
E-mail: [rvv@zntu.edu.ua](mailto:rvv@zntu.edu.ua)

---

# ЗМІСТ

РАДІОФІЗИКА .....	7
Ніконова А. А., Небеснюк О. Ю., Шмалий С. Л., Ніконова З. А. ІССЛЕДОВАННЯ МЕХАНИЗМОВ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК МДП-СТРУКТУР .....	7
Чумаченко Я. В., Чумаченко В. П. О БЕСКОНЕЧНИХ СИСТЕМАХ МЕТОДА ПРОІЗВЕДЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ РАССЕЯННЯ ВОЛН В ПЛОСКОСТНИХ УЗЛАХ С СОЕДИНІТЕЛЬНОЙ ПОЛОСТЬЮ ПРЯМОУГОЛЬНОЇ ФОРМИ .....	10
РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ .....	15
Сфіменко А. А. ВІБІР ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ МІЖБЛОЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ .....	15
Остренко В. С. АЛГОРІТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПОНЕНТІ, ЩО АПРОКСИМУЮТЬ ПЕРЕХІДНИЙ ТЕПЛОВИЙ ОПІР ОХОЛОДЖУВАЧА .....	23
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ .....	35
Коломицев М. В., Носок С. А. УЯЗВИМОСТИ ПРИЛОЖЕНИЙ К НЕКОРРЕКТНЫМ ВХОДНЫМ ДАННЫМ .....	35
Колпакова Т. А. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЕТЕНТНОСТИ ЭКСПЕРТОВ ПРИ ПРИНЯТИИ ГРУППОВЫХ РЕШЕНИЙ .....	40
Львовін В. М., Дубровін В. І., Оніщенко В. Ф. ПРОГНОЗУВАННЯ ФАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЕКТУ НА СТАДІЇ ПЕРЕДПРОЕКТНОГО ПЛАНУВАННЯ .....	44
Неласа Г. В., Дозоренко І. С. ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯННЯ СХЕМ ЦИФРОВИХ МУЛЬТИПІДПІСІВ .....	52
Пелешко Д. Д., Кустра Н. О., Шнак З. Я. СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НАБОРУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ДИСПЕРСІЙ КОЛЬОРУ ЗОБРАЖЕНЬ .....	56
Чумаченко Я. В., Чумаченко В. П. ІСПРАВЛЕННЯ К СТАТЬЄ «К ОБОСНОВАНІЮ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕННЯ ОДНОЇ ЗАДАЧІ РАССЕЯННЯ ВОЛН ДЛЯ НАГРУЖЕННОГО ИЗЛОМА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА» .....	14
Тімовський А. К., Голдобін О. О. ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ САР ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМИ МАЕС-П .....	30
Потій А. В., Комін Д. С. ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЦЕНИВАНИЯ ГАРАНТИЙ В КОНТЕКСТЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛІНГВІСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА .....	64
Романюк В. В. РОЗВ'ЯЗУВАННЯ НЕЧІТКОЇ АНТАГОНІСТИЧНОЇ 2x2-ГРИ .....	74
Федюкович В. Е. О НЕОБХОДИМОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЇ ПРОВЕРКИ СЕРТИФІКАТА СХЕМЫ DAA .....	79
Халимов Г. З. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КРИВЫХ ФЕРМА ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ХЕШИРОВАНИЯ .....	82
Овсяк О. В. МОДЕЛЬ РОЗШИРЕНОЇ НОТАЦІЇ ТЕКСТОВОГО ОПИСУ ФОРМУЛ АЛГОРИТМІВ .....	86

---

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ .....	91
<i>Дубровин В. И., Твердохлеб Ю. В.</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭКГ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙвлет- ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ.....	91
<i>Колчигин Б. В., Волкова В. В., Бодянский Е. В.</i> АДАПТИВНАЯ НЕЙРО-ФАЗЗИ СЕТЬ КОХОНЕНА.....	99
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЙ .....	111
<i>Евланов М. В., Терещенко И. В., Штангей С. В.</i> РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЯ .....	111
<i>Зинченко Ю. Е., Гриценко А. А., Зеленева И. Я., Войтов Г. В.</i> ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ БИБЛИОТЕКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ СИСТЕМ НА ПЛИС .....	118
ТЕОРІЯ І МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....	139
<i>Гостев В. И.</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ИДЕНТИЧНЫХ ГАУССОВЫХ ФУНКЦИЯХ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ .....	139
<i>Кудин В. Ф., Колесниченко С. П.</i> СУБОПТИМАЛЬНОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО КРИТЕРИЮ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА БЕЛЛМАНА – ЛЯПУНОВА.....	144
<i>Орловский И. А.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ВИДЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ И НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С СЕРИЕСНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ .....	149
<i>Тимченко В. Л., Кондратенко Ю. П.</i> СИНТЕЗ СТРУКТУРНО ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ .....	158
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ .....	164
<i>Рязанцев О. И., Кардащук В. С.</i> МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛІЗУ .....	164

---

# CONTENTS

RADIOPHYSICS .....	7
<i>Nikonova A. A., Nebesnjuk O. J., Shmaly S. L., Nikonova Z. A.</i> INVESTIGATION OF MIS STRUCTURE CHARACTERISTICS INSTABILITY MECHANISMS.....	7
<i>Chumachenko Ya. V., Chumachenko V. P.</i> ON LINEAR INFINITE SYSTEMS OF DOMAIN-PRODUCT TECHNIQUE FOR WAVE SCATTERING PROBLEMS IN PLANAR WAVEGUIDE JUNCTIONS WITH RECTANGULAR CONNECTING CAVITY .....	10
RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS .....	15
<i>Efimenko A. A.</i> CHOICE OF OPTIMAL INTERBLOCK ELECTRIC CONNECTONS DESIGN FOR ELECTRONIC MEANS .....	15
<i>Ostrenko V. S.</i> ALGORITHM FOR DETERMINATION OF EXPONENTS PARAMETERS WHICH APPROXIMATE HEAT SINK TRANSIENT HEAT RESISTANCE.....	23
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING .....	35
<i>Kolomytsev M., Nosok S.</i> APPLICATIONS VULNERABILITIES CAUSED BY INCORRECT INPUT DATA .....	35
<i>Kolpakova T. A.</i> DETERMINATION OF EXPERTS COMPETENCE IN GROUP DECISION-MAKING .....	40
<i>Lyovkin V., Dubrovin V., Onyshchenko V.</i> PREDICTION OF PROJECT ACTUAL RESULTS AT PRE-PROJECT PLANNING STAGE .....	44
<i>Nelasa A. V., Dozorenko I. S.</i> REVIEW AND COMPARISON OF MULTIPLE DIGITAL SIGNATURES .....	52
<i>Peleshko D. D., Kustra N. O., Shpak Z. Ya.</i> COMPOSITION IMAGE REGISTRATION USING PICTURE COLOR DISPERSION.....	56
<i>Potij A. V., Komin D. S.</i> ONTOLOGICAL MODELING OF ASSURANCE EVALUATION IN THE CONTEXT OF FUNCTIONAL- LINGUISTIC APPROACH .....	64
<i>Romanuke V. V.</i> SOLVING THE FUZZY ANTAGONISTIC $2 \times 2$ -GAME.....	74
<i>Fedyukovich V.</i> ON ADDITIONAL VERIFICATION OF DDA CERTIFICATE.....	79
<i>Khalimov G. Z.</i> ESTIMATION OF FERMA CURVES PARAMETERS FOR UNIVERSAL HASHING OF NUMBER SOLUTION FOR HURVITZ EQUATION IN THE FINITE FIELD .....	82
<i>Ovsyak O. V.</i> MODEL OF EXTENDED NOTATION OF ALGORITHM FORMULAS TEXTUAL DESCRIPTION .....	86
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	91
<i>Dubrovin V. I., Tverdohlib J. V.</i> IMPROVEMENT OF ECG SIGNALS ANALYSIS BASED ON WAVELET CONVERSION IN HIGH-RESOLUTION ELECTROCARDIOGRAPHY SYSTEM.....	91
<i>Kolchygina B., Volkova V., Bodyanskiy Ye.</i> ADAPTIVE NEURO-FUZZY KOHONEN'S NETWORK ....	99
<i>Subbotin S. A.</i> EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND ANALYSIS OF INFORMATION QUALITY INDICES CORRELATION FOR DIAGNOSTIC NEUROMODELS.....	104

---

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES .....	111
<i>Evlanov M. V., Terecshenko I. V., Shtangey S. V.</i> DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY OF ENTERPRISE BUSINESS PROCESSES MONITORING.....	111
<i>Zinchenko Y. E., Grytsenko A. A., Zelenyova I. J., Voytov G. V.</i> HARDWARE-SOFTWARE MATH LIBRARY FOR SOPC .	118
<i>Pozdnyakov A. A., Parkhomenko A. V., Tamras N. I., Chizhik O. V.</i> AUTOMATIZED MANAGEMENT OF PROGRAM SYSTEM INTRODUCTION PROJECT .....	123
<i>Hahanov V. I., Chumachenko S. V., Litvinova E. I., Guz O. A.</i> MULTIPROCESSOR FOR INFORMATION SPACE ANALYZING .....	129
THEORY AND METHODS OF AUTOMATIC CONTROL ..... 139	
<i>Gostev V. I.</i> DESIGNING OF A FUZZY CONTROLLER AT IDENTICAL GAUSS MEMBERSHIP FUNCTIONS.....	139
<i>Kudin V. F., Kolesnichenko S. P.</i> SUBOPTIMUM NONLINEAR CONTROL BY OPERATION SPEED CRITERION BASED ON BELLMAN-LYAPUNOV METHOD .....	144
<i>Orlovsky I. A.</i> IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL IN THE FORM OF POLYNOMIAL RECURRENT NEURAL NETWORK AND ADJUSTMENT OF ELECTRIC DRIVE WITH SERIES-WOUND MOTOR .....	149
<i>Tymchenko V. L., Kondratenko Y. P.</i> SYNTHESIS OF STRUCTURALLY COMMUTED SYSTEMS FOR MULTIDIMENSIONAL MOVING OBJECTS CONTROL .....	158
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS ..... 164	
<i>Ryazantsev A. I., Kardashuk V. S.</i> METHODS AND PROGRAM-TECHNICAL MEANS FOR AEROSOL NANOCATALYSIS AUTOMATIC CONTROL .....	164

# РАДІОФІЗИКА

# РАДИОФИЗИКА

# RADIOPHYSICS

УДК 534.222.2

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

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорожской государственной инженерной академии

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

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК МДП-СТРУКТУР

В статье приведены результаты исследования влияния термополевой обработки на характеристики МДП-структур.

**Ключевые слова:** заряд, термополевая обработка, МДП-структура.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Известно, что зарядовое состояние МДП-структур определяется наличием в диэлектрике целого ряда зарядов, появляющихся как в нормальных условиях, так и в условиях повышенных температур и электрических полей [1]. Чтобы повысить стабильность их характеристик и установить вероятностные причины появления зарядов в диэлектрике, были исследованы механизмы нестабильности характеристик МДП-структур после термополевой обработки (ТПО).

Цель статьи – исследование влияния ТПО на характеристики МДП-структур.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ДОСТИЖЕНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Известно, что нестабильность эффективного заряда МДП-структур обусловлена генерацией или пространственным перераспределением заряда в диэлектрической пленке [2]. Это приводит к изменению величины зарядов в полупроводнике, а, следовательно, и к изменению поверхностного потенциала полупроводника. Исследования механизмов нестабильности МДП-систем показали, что чаще всего нестабильность связана с миграцией примесных ионов или переориентацией диполей в диэлектрике, накоплением носителей заряда на центрах захвата в объеме диэлектрика (рис. 1).

### МАТЕРИАЛЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В реальных МДП-структурах существует много состояний и зарядов, которые влияют на идеальные кривые вольт-фарадовых характеристик (ВФХ) этих структур.

Основная классификация этих зарядов и состояний следующая:

– фиксированные поверхностные заряды, которые локализуются вблизи поверхности полупроводника и не способны перемещаться под действием приложенного электрического поля;

– заряды подвижных ионов, способные перемещаться по объему диэлектрика под действием внешнего электрического поля;

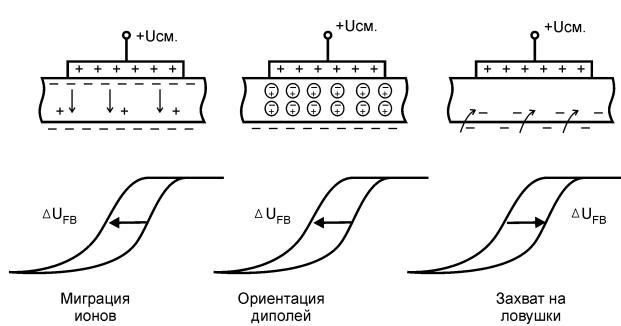


Рис. 1. Основные механизмы нестабильности МДП-структур

– поверхности состояния (или состояния на границе раздела), которые определяются как энергетические уровни в запрещенной зоне на границе раздела диэлектрик-полупроводник, способные обмениваться зарядом с полупроводником в течение короткого времени.

Фиксированный заряд обладает следующими свойствами:

– плотность фиксированного заряда не зависит от величины поверхностного изгиба зон или от приложенного смещения;

– фиксированный заряд неподвижен, центры, ответственные за его образование, остаются неподвижными при проведении термополевой обработки;

– полярность фиксированного заряда всегда положительна, поэтому термически окисленная поверхность всегда *n*-типа, даже если нет загрязнения ионами щелочных металлов;

– фиксированные заряды всегда локализуются вблизи границы раздела диэлектрик-полупроводник.

Фиксированный заряд вызывает смещение вольт-фарадной характеристики на величину [3]:

$$\Delta U_{FB} = Q_\Phi / C_0, \quad (1)$$

где  $Q_\Phi$  – величина фиксированного заряда;  $C_0$  – емкость МДП-структуры.

Установлено, что при наличии этого заряда напряженность поля в диэлектрике МДП-структуры оказывается выше напряженности поля поверхности полупроводника. Для получения заданной величины поля приходилось прикладывать больший потенциал.

Одна из причин нестабильности МДП-структур – наличие в диэлектрике подвижных заряженных частиц, типа ионов щелочных металлов (Na, Li) или протонов. Обычно этот заряд вводится в диэлектрик при формировании последнего.

Эти частицы обладают относительно большой подвижностью, которая возрастает с увеличением температуры. Поэтому под действием электрического поля, особенно при повышенных температурах (100–300 °C), эти заряженные ионы могут легко перемещаться в диэлектрике, что приводит к изменению (不稳定) во времени потенциала плоских зон.

Подвижность щелочных ионов в диэлектрике в значительной мере определяется величиной ионного радиуса элемента. При этом загрязнения Li более ощутимы, чем загрязнения Na и K. Однако вследствие того, что Na более распространен в природе, чем Li, именно Na определяет ионный заряд в диэлектрике.

При исследовании МДП-структур методом ВФХ присутствие подвижных примесей проявляется в сильном сдвиге ВФХ относительно теоретической (рис. 2), особенно после термополевой обработки (рис. 3).

В качестве объекта исследований были взяты две партии пластин с тестовыми (эталонными) МДП-структурами (полупроводник Si *p*-типа с кристаллографической ориентацией (111), диэлектрик – стекло толщиной 1000 E).

I партия пластин. Спекание стеклопорошка проводилось при температуре 725 °C в среде кислорода с расходом 0,8–1,2 в течение 1,5–3 часов. Осаждение стекла проводилось электрофоретическим способом. Процесс осаждения длился 40 секунд, оплавление стекла происходило при температуре 950 °C ± 10 % в горячей зоне в течение 30–45 секунд в атмосфере кислорода (100–200 л/час).

II партия пластин. Помол стекла для этой партии проводился на мельнице Fritsch в стаканах из оплавленного электрокорунда. Режимы осаждения и оплавления стекла полностью соответствовали технологическому процессу нанесения стекла: время осаждения – 1,  $I_{\text{осажд.}} = 80$  A,  $U_{\text{осажд.}} = 200$  В,  $T_{\text{оплавл.}} = 950$  °C в атмосфере кислорода.

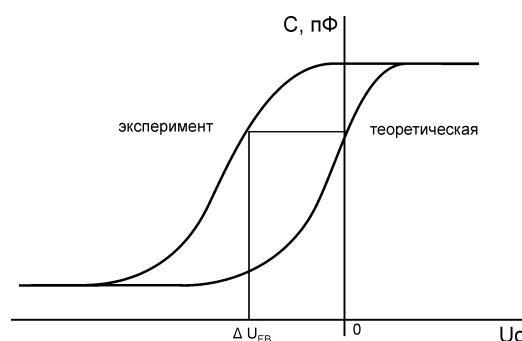


Рис. 2. Общий вид вольт-фарадной характеристики МДП-структур

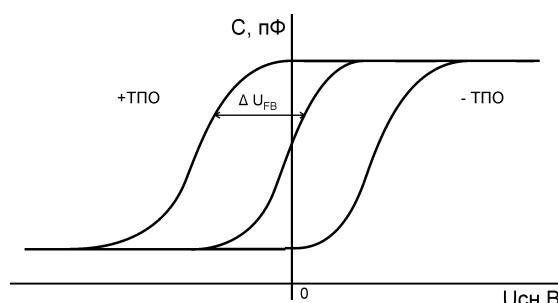


Рис. 3. Эффект действия термополевой обработки МДП-структур

После оплавлення стекла пластины со структурами подвергались термополевой обработке, которая требует четкого контроля зарядов в диэлектрике. Для проведения исследований авторами была использована ранее разработанная мини-печь малой мощности с автоматизированным управлением параметрами полупроводниковых структур [4]. В ходе исследований установлено, что пластины с тестовыми структурами имели в исходном состоянии (при нулевом значении напряжения смещения) большие величины тангенса угла диэлектрических потерь. В связи с этим ВФХ на этих структурах не могли быть измерены.

Отдельные структуры при измерении ВФХ пробивались при подаче на них 50–100 В напряжения смещения. Образцы обеих партий (рис. 4, 5) имели отрицательный заряд. Эффективная плотность заряда, рассчитанная по ВФХ, составила  $5\text{--}8 \cdot 10^{-8} \text{ см}^{-2}$ .

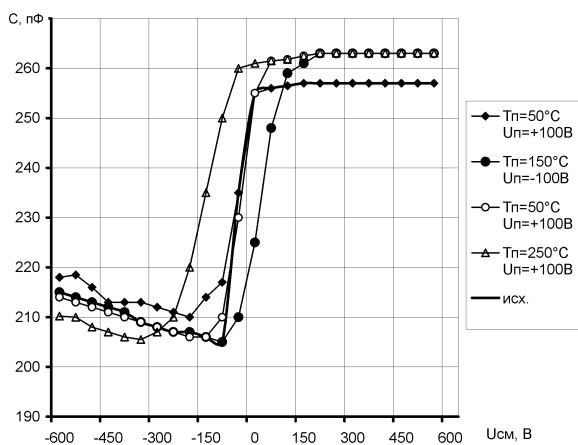


Рис. 4. Вплив термополової обробки на зарядове становище тестових МДП-структур. Партия I

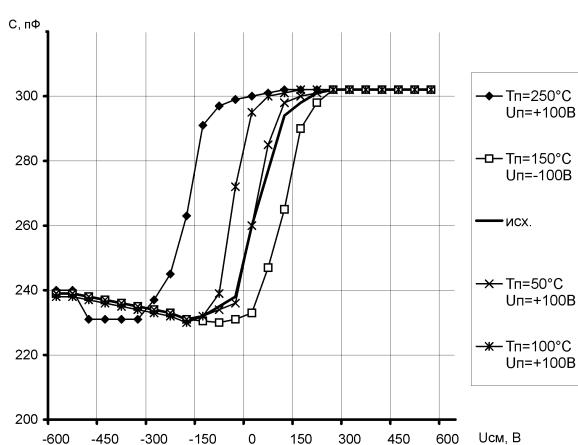


Рис. 5. Вплив термополової обробки на зарядове становище тестових МДП-структур. Партия II

Из экспериментальных данных (рис. 4, 5) следует, что на структурах, имеющих отрицательный заряд, после нагрева в обычной атмосфере до 250 °C наблюдается смещение потенциала плоских зон в область отрицательных напряжений, т. е. заряд таких структур становится положительным.

## ВЫВОДЫ

В ходе исследований установлено:

- термополевая обработка оказывает существенное влияние на зарядовое состояние тестовых структур (инверсия заряда в диэлектрике), что приводит к нестабильности характеристик МДП-структур;
- при незначительной температуре и подаче напряжения на структуры наступает пробой и дальнейшие измерения на них становятся невозможными;

– распределение зарядов в диэлектрике МДП-структур оказывает значительное влияние на пороговое напряжение, что приводит к нестабильности их проходных характеристик. После ТПО при температуре до 250 °C наблюдалось существенное отклонение  $U_{\text{пор.}}$  ( $\pm 1\text{--}1,15$  В) от граничных условий.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Карабасов, Ю. С. Новые материалы / Ю. С. Карабасов, В. Н. Анциферов, Ф. Ф. Безудный, Л. Н. Белянчиков. – М. : МИСИС, 2002. – 736 с.
2. Гуртов, В. А. Электронные процессы в структурах метал – диэлектрик – полупроводник / В. А. Гуртов. – Петрозаводск, 1984. – 116 с.
3. Nicollian, E. H. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology / E. H. Nicollian, J. R. Brews. – Wiley-Interscience, 1982. – 928 р.
4. Ніконова, А. А. Розробка міні-печі малої потужності з автоматизованим управлінням відпалу напівпровідникових структур / Ніконова З. А., Ситий М. Л., Шмалій С. Л. // Металургія : збірник наукових праць. – 2008. – Вип. 17. – С. 158–161.

Надійшла 06.09.2010  
Після доробки 29.09.2010

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

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ НЕСТАБІЛЬНОСТІ ХАРАКТЕРИСТИК МДН-СТРУКТУР

У статті наведено результати дослідження впливу термополової обробки на характеристики МДН-структур.

**Ключові слова:** заряд, термополева обробка, МДН-структур.

Nikonova A. A., Nebesnjuk O. J., Shmaly S. L., Nikonova Z. A.

## INVESTIGATION OF MIS STRUCTURE CHARACTERISTICS INSTABILITY MECHANISMS

The results of investigation are presented in the paper showing the influence of thermal processing on characteristics of MIS structures.

**Key words:** charge, thermal processing, MIS structure.

УДК 537.874.6

Чумаченко Я. В.<sup>1</sup>, Чумаченко В. П.<sup>2</sup><sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета<sup>2</sup>Д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой Запорожского национального технического университета

## О БЕСКОНЕЧНЫХ СИСТЕМАХ МЕТОДА ПРОИЗВЕДЕНИЯ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ РАССЕЯНИЯ ВОЛН В ПЛОСКОСТНЫХ УЗЛАХ С СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ПОЛОСТЬЮ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФОРМЫ

Изучаются свойства бесконечных систем линейных уравнений, возникающих при использовании метода произведения областей для определения характеристик рассеяния плоскостных волноводных трансформаторов с нагруженной соединительной полостью прямоугольной формы. На примере задачи о волноводном изломе показано, что в случае однородных условий Неймана на проводящих границах применение этого метода приводит к квазирегулярным системам.

**Ключевые слова:** бесконечные системы линейных уравнений, метод произведения областей, волноводные неоднородности.

### ВВЕДЕНИЕ

Ряд широко используемых волноводных узлов имеет область связи, являющуюся общей частью пересекающихся под прямым углом бесконечных, полу бесконечных или конечных волновых каналов. В качестве примеров укажем ответители мощности, а также уголковые, Т-образные и крестообразные соединения волноводов (см. [1–5] и библиографию к ним). Подобные конфигурации возникают и в теории волноводов со сложным поперечным сечением [6]. Одним из методов, применяемых при анализе рассеяния волн в волноводных трансформаторах рассматриваемого типа, является метод произведения областей [7, 8], обеспечивающий адекватное представление поля внутри выпукло многоугольной соединительной полости. Согласно [7], искомая компонента поля в такой области задается суммой нескольких рядов по тригонометрическим функциям с разделенными переменными. Каждый из этих рядов тождественно удовлетворяет уравнению Гельмгольца внутри полости, а полнота используемых систем функций обеспечивает возможность выполнения требуемых граничных условий на ее контуре. Наложение условий сопряжения в апертурах области связи приводит к связанным бесконечным системам линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных коэффициентов разложений поля в подобластях волноводного узла.

В [9, 10] было показано, что в случае однородных граничных условий Дирихле на стенах исследуемого объекта описанный подход порождает так называемые квазирегулярные СЛАУ. В настоящей работе на примере простейшего соединения описанного типа ис-

следуются системы линейных уравнений, возникающие при нагруженной диэлектриком области связи и граничных условиях Неймана на контуре волноводного трансформатора. Полученные результаты применимы для соединений волноводов с магнитными стенками (ВМС), соединений плоскопараллельных волноводов (ППВ), а также Е-плоскостных соединений прямоугольных волноводов (ПВ). В последнем случае структура должна быть однородно заполненной, так как при наличии границ раздела сред задача рассеяния волн в таком узле уже не сводится к нахождению одной скалярной функции и требует отдельного рассмотрения [11]. Заметим также, что системы, близкие к исследуемым, появляются и при использовании метода частичных пересекающихся областей [12, 13].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемая конфигурация показана на рис. 1. Структура однородна вдоль оси  $z$  и имеет размер  $a$  в этом направлении ( $a = \infty$  в случае ППВ). Внешний ее контур представляет собой сечение плоскостью  $z = \text{const}$  идеальных электрических (ППВ, ПВ) или магнитных (ВМС) поверхностей. Области 1 и 2 соответствуют полу бесконечным волноводам с поперечными размерами  $b$  и  $c$  соответственно. Прямоугольная область связи 3 или является незаполненной (ПВ), или нагружена диэлектриком (ППВ, ВМС) с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$ . Узел возбуждается слева основной волной единичной амплитуды.

Задача состоит в отыскании ненулевой  $z$ -компоненты электромагнитного поля  $H_z = u$  (ППВ),  $H_z =$

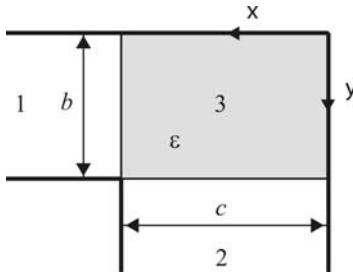


Рис. 1. Геометрия задачи

$= usin\frac{\pi z}{a}$  (ПВ) или  $E_z = u$  (БМС), где временная зависимость  $e^{i\omega t}$  опущена. Функция  $u$  должна удовлетворять уравнению Гельмгольца, однородным граничным условиям Неймана на идеальных поверхностях, условиям непрерывности тангенциальных составляющих поля на границах частичных областей, условиям излучения на бесконечности и условиям ограниченности энергии поля, запасенной внутри любой конечной подобласти. Эти условия обеспечивают единственность решения исходной электродинамической задачи [14].

Обозначим значения  $u$  в областях 1, 2 и 3 через  $u_1$ ,  $u_2$  и  $u_3$ . Внутри своих областей функции  $u_j$  являются решениями уравнений

$$\Delta u_j + \chi_j^2 u = 0, \quad j = 1, 3 \quad (1)$$

со значениями параметров  $\chi_j$ , определяемыми равенствами

$$\chi_1 = \chi_2 = \chi = k_0, \quad \chi_3 = k_0\sqrt{\epsilon} \quad (\text{ППВ, БМС}) \quad (2)$$

или

$$\chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = \chi = \sqrt{k_0^2 - \left(\frac{\pi}{a}\right)^2} \quad (\text{ПВ}), \quad (3)$$

где  $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ , а  $\lambda$  – длина волны в свободном пространстве. Условия непрерывности тангенциальных компонент электромагнитного поля в апертурах области 3 приводят к соотношениям

$$u_1 = u_3, \quad \frac{\partial u_1}{\partial x} = \kappa \frac{\partial u_3}{\partial x} \text{ при } x = c, \quad (4)$$

$$u_2 = u_3, \quad \frac{\partial u_2}{\partial y} = \kappa \frac{\partial u_3}{\partial y} \text{ при } y = b. \quad (5)$$

Здесь

$$\kappa = \begin{cases} \chi^2 / \chi_3^2 & (\text{ППВ}) \\ 1 & (\text{БМС, ПВ}) \end{cases}. \quad (6)$$

Тогда

$$u_1 = e^{\gamma_0^{(1)}(x-c)} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(1)} \cos \frac{n\pi y}{b} e^{-\gamma_n^{(1)}(x-c)}, \quad (7)$$

$$u_2 = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(2)} \cos \frac{n\pi x}{c} e^{-\gamma_n^{(2)}(y-b)}, \quad (8)$$

где  $A_n^{(1)}$  и  $A_n^{(2)}$  – коэффициенты разложения, подлежащие определению, а

$$\gamma_n^{(1)} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \chi_1^2}, \quad \gamma_n^{(2)} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{c}\right)^2 - \chi_2^2}. \quad (9)$$

Функцию  $u_3$  будем искать в виде суммы двух рядов Фурье по косинусам

$$u_3 = \sum_{n=0}^{\infty} B_n^{(1)} \cos \frac{n\pi y}{b} \left[ e^{\gamma_n^{(x)}(x-c)} + e^{-\gamma_n^{(x)}(x+c)} \right] + \sum_{n=0}^{\infty} B_n^{(2)} \cos \frac{n\pi x}{c} \left[ e^{\gamma_n^{(y)}(y-b)} + e^{-\gamma_n^{(y)}(y+b)} \right], \quad (10)$$

$$\gamma_n^{(x)} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 - \chi_3^2}, \quad \gamma_n^{(y)} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{c}\right)^2 - \chi_3^2}. \quad (11)$$

Представление (10) удовлетворяет однородным граничным условиям Неймана на идеальных стенах единительной полости и имеет достаточную степень произвольности, чтобы обеспечить выполнение условий сопряжения (4), (5).

## СИСТЕМА ЛІНЕЙНИХ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

Подставив разложения (7) и (10) в условия (4) и воспользовавшись ортогональностью тригонометрических функций, мы получим

$$\delta_{0m} + A_m^{(1)} = (1 + e^{-2\gamma_m^{(x)}c})B_m^{(1)} + \sum_{n=0}^{\infty} d_{mn}^{(x)} B_n^{(2)}, \quad m = \overline{0, \infty}, \quad (12)$$

$$\delta_{0m} \gamma_0^{(1)} - \gamma_m^{(1)} A_m^{(1)} = \kappa \gamma_m^{(x)} (1 - e^{-2\gamma_m^{(x)}c}) B_m^{(1)}, \quad m = \overline{0, \infty}, \quad (13)$$

где

$$d_{mn}^{(x)} = \frac{2(-1)^{m+n} \gamma_n^{(y)} (1 - e^{-2\gamma_n^{(y)}b})}{\epsilon_m b \left[ \gamma_n^{(y)2} + \left( \frac{m\pi}{b} \right)^2 \right]}, \quad (14)$$

$\delta_{0m}$  – символ Кронекера, а  $\epsilon_m = \begin{cases} 2 & \text{при } m = 0 \\ 1 & \text{при } m \geq 1 \end{cases}$ .

Границные условия (5) приводят к уравнениям

$$A_m^{(2)} = (1 + e^{-2\gamma_m^{(y)}b})B_m^{(2)} + \sum_{n=0}^{\infty} d_{mn}^{(y)} B_n^{(1)}, \quad m = \overline{0, \infty}, \quad (15)$$

$$-\gamma_m^{(2)} A_m^{(2)} = \kappa \gamma_m^{(y)} (1 - e^{-2\gamma_m^{(y)}b}) B_m^{(2)}, \quad m = \overline{0, \infty}, \quad (16)$$

$$d_{mn}^{(y)} = \frac{2(-1)^{m+n}\gamma_m^{(x)}(1-e^{-2\gamma_m^{(x)}c})}{\epsilon_m c \left[ \gamma_m^{(x)2} + \left(\frac{m\pi}{c}\right)^2 \right]}. \quad (17)$$

С помощью (13) и (16)  $B_m^{(1)}$  и  $B_m^{(2)}$  в (12) и (15) исключаются, что сводит рассматриваемую граничную задачу к парной СЛАУ относительно  $A_m^{(1)}$  и  $A_m^{(2)}$ :

$$A_m^{(1)} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tilde{d}_{mn}^{(x)}}{\Delta_m^{(x)}} A_n^{(2)} = \frac{r\delta_{0m}}{\Delta_0^{(x)}}, \quad m = \overline{0, \infty}, \quad (18)$$

$$A_m^{(2)} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tilde{d}_{mn}^{(y)}}{\Delta_m^{(y)}} A_n^{(1)} = \frac{\tilde{d}_{m0}^{(y)}}{\Delta_m^{(y)}}, \quad m = \overline{0, \infty}. \quad (19)$$

Здесь

$$\tilde{d}_{mn}^{(x)} = \frac{2(-1)^{m+n}\gamma_m^{(x)}\gamma_n^{(2)}(1-e^{-2\gamma_m^{(x)}c})}{\epsilon_m b \left[ \left(\frac{n\pi}{c}\right)^2 + \gamma_m^{(x)2} \right]}, \quad (20)$$

$$\Delta_m^{(x)} = \gamma_m^{(1)}(1+e^{-2\gamma_m^{(x)}c}) + \kappa\gamma_m^{(x)}(1-e^{-2\gamma_m^{(x)}c}), \quad (21)$$

$$r = \gamma_0^{(1)}(1+e^{-2\gamma_0^{(x)}c}) - \kappa\gamma_0^{(x)}(1-e^{-2\gamma_0^{(x)}c}), \quad (22)$$

$$\tilde{d}_{mn}^{(y)} = \frac{2(-1)^{m+n}\gamma_m^{(y)}\gamma_n^{(1)}(1-e^{-2\gamma_m^{(y)}b})}{\epsilon_m c \left[ \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \gamma_m^{(y)2} \right]}, \quad (23)$$

$$\Delta_m^{(y)} = \gamma_m^{(2)}(1+e^{-2\gamma_m^{(y)}b}) + \kappa\gamma_m^{(y)}(1-e^{-2\gamma_m^{(y)}b}) \quad (24)$$

и учтено, что

$$\gamma_m^{(y)2} + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 = \left(\frac{n\pi}{c}\right)^2 + \gamma_m^{(x)2}. \quad (25)$$

СЛАУ (18), (19) является прямым следствием исходной краевой задачи и ее разрешимость следует из разрешимости краевой задачи. Условие конечности энергии поля в ограниченной области определяет класс числовых последовательностей, к которому должны принадлежать искомые амплитудные коэффициенты:

$$\sum_{n=0}^{\infty} |A_n^{(j)}|^2(n+1) < \infty, \quad j = 1, 2. \quad (26)$$

Аналогичным условиям должны удовлетворять и коэффициенты  $B_m^{(1)}$ ,  $B_m^{(2)}$ , как это следует из (13) и (16). Исходя из единственности решения краевой задачи и используя методику [15], можно доказать и единственность решения СЛАУ (18), (19) в пространстве последовательностей (26).

## АНАЛИЗ МАТРИЧНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЛАУ

Обозначим

$$a_{mn}^{(\xi)} = \frac{(m+1)\tilde{d}_{mn}^{(\xi)}}{(n+1)\Delta_m^{(\xi)}}, \quad \xi = x, y \quad (27)$$

и введем новые неизвестные

$$\tilde{A}_m^{(j)} = A_m^{(j)}(m+1), \quad j = 1, 2. \quad (28)$$

Тогда уравнения (18), (19) преобразуются к виду

$$\tilde{A}_m^{(1)} + \sum_{n=0}^{\infty} a_{mn}^{(x)} \tilde{A}_n^{(2)} = \frac{r\delta_{0m}}{\Delta_0^{(x)}}, \quad m = \overline{0, \infty}, \quad (29)$$

$$\tilde{A}_m^{(2)} + \sum_{n=0}^{\infty} a_{mn}^{(y)} \tilde{A}_n^{(1)} = a_{m0}^{(y)}, \quad m = \overline{0, \infty}. \quad (30)$$

Из (26) и (28) следует, что если последовательности  $\tilde{A}_m^{(1)}$  и  $\tilde{A}_m^{(2)}$  представляют решение краевой задачи, то они ограничены и сходятся к нулю.

Пусть далее

$$t_m = \left| \frac{\gamma_m^{(x)}(1-e^{-2\gamma_m^{(x)}c})}{\epsilon_m \Delta_m^{(x)}} \right| \xrightarrow[m \rightarrow \infty]{} \frac{1}{|1+\kappa|} = t, \quad (31)$$

$$\beta_{mn} = \frac{2(m+1)|\gamma_n^{(2)}|}{(n+1)b \left[ \left(\frac{n\pi}{c}\right)^2 + \gamma_m^{(x)2} \right]}, \quad (32)$$

$$\beta_m = \sum_{n \leq \alpha_c} \beta_{mn} \xrightarrow[m \rightarrow \infty]{} 0, \quad (33)$$

где  $\alpha_c = \frac{c\chi_2}{\pi}$ . Заметив, что  $\gamma_n^{(2)} < \frac{n\pi}{c}$  при  $n > \alpha_c$ , получим

$$\sum_{n=0}^{\infty} \beta_{mn} < \beta_m + \frac{2(m+1)c}{\pi b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\left| n^2 + \left(\frac{c\gamma_m^{(x)}}{\pi}\right)^2 \right|}. \quad (34)$$

Предположим, что

$$m^2 > \left(\frac{b}{\pi}\right)^2 \operatorname{Re}(\chi_3^2). \quad (35)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \left| n^2 + \left(\frac{c\gamma_m^{(x)}}{\pi}\right)^2 \right| &\geq n^2 + \left(\frac{c}{\pi}\right)^2 \left[ \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 - \operatorname{Re}(\chi_3^2) \right] = \\ &= n^2 + s_m^2 \end{aligned} \quad (36)$$

и

$$\begin{aligned} \frac{2(m+1)c}{\pi b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\left| n^2 + \left(\frac{c\gamma_m^{(x)}}{\pi}\right)^2 \right|} &\leq \frac{2(m+1)c}{\pi b} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + s_m^2} \leq \\ &\leq \frac{(m+1)c}{bs_m} \xrightarrow[m \rightarrow \infty]{} 1, \end{aligned} \quad (37)$$

где принято во внимание, что

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + s^2} = \frac{\pi}{2s} \left( \operatorname{cths} \pi - \frac{1}{s\pi} \right) \quad [16, \text{с. 37}] \quad (38)$$

и

$$\operatorname{cthp} - \frac{1}{p} \leq 1, \quad 0 \leq p < \infty. \quad (39)$$

Учитывая (31)–(37), получим оценку

$$\sum_{n=0}^{\infty} |a_{mn}^{(x)}| = t_m \sum_{n=0}^{\infty} \beta_{mn} < \\ < t_m \left( \beta_m + \frac{(m+1)c}{bs_m} \right) \xrightarrow{m \rightarrow \infty} t. \quad (40)$$

В случаях ПВ и ВМС  $t = \frac{1}{2}$ , а для ППВ  $t < 1 - \delta$  ( $\delta > 0$ ) для любого конечного значения диэлектрической проницаемости  $\epsilon$ . Поэтому, исходя из определения предела, можно утверждать, что начиная с некоторого значения  $m$ ,

$$\sum_{n=0}^{\infty} |a_{mn}^{(x)}| < 1 - \vartheta_1, \quad \vartheta_1 > 0. \quad (41)$$

Аналогично можно показать, что для достаточно больших  $m$  выполняется и условие

$$\sum_{n=0}^{\infty} |a_{mn}^{(y)}| < 1 - \vartheta_2, \quad \vartheta_2 > 0. \quad (42)$$

Заметим также, что

$$\sum_{n=0}^{\infty} |a_{mn}^{(\xi)}| < +\infty, \quad \xi = x, y \quad (43)$$

для всякого  $m$ , а правые части уравнений (29), (30) ограничены и стремятся к нулю.

Перенумеруем неизвестные

$$C_{2m-1} = A_{m-1}^{(1)}, \quad C_{2m} = A_{m-1}^{(2)}, \quad m = \overline{1, \infty} \quad (44)$$

и перепишем в соответствующем порядке уравнения системы (29), (30). Учитывая установленные свойства матричных коэффициентов, можно утверждать, что полученная после этого бесконечная СЛАУ является квазирегулярной [17]. Пусть  $M+1$  – номер уравнения этой системы, начиная с которого оба условия (41) и (42) выполняются. Считая  $C_n$ ,  $n = \overline{1, M}$  заданными и отбросив первые  $M$  уравнений, получим вполне регулярную СЛАУ по отношению к неизвестным  $C_{M+n}$ ,  $n = \overline{1, \infty}$ . Такая система имеет единственное ограниченное решение, которое может быть найдено методом редукции. Выразив из этой системы неизвестные со старшими номерами через первые неизвестные и подставив их в отбрасываемые равенства, мы сведем задачу к решению  $M$  уравнений относительно коэффициентов  $C_n$ ,  $n = \overline{1, M}$ . Заметим, что если при построении приближения к решению вполне регулярной СЛАУ используется редуцированная система из  $N$  уравнений, то это эквивалентно усечению исходной СЛАУ до порядка  $M+N$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере нагруженного излома волновода изучены свойства бесконечных СЛАУ, возникающих в результате применения метода произведения областей к исследованию рассеяния волн в волноводных трансформаторах с прямоугольной соединительной полостью и однородными условиями Неймана на проводящих границах. Установлено, что, как и в случае граничных условий Дирихле, этот метод приводит к квазирегулярным системам. Полученные результаты будут полезными при построении обоснованных алгоритмов для расчета технических характеристик волноводных узлов описанного типа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шестопалов, В. П. Резонансное рассеяние волн. Т. 2. Волноводные неоднородности / В. П. Шестопалов, А. А. Кириленко, Л. А. Рудь. – Киев : Наукова думка, 1986. – 216 с.
2. Widarta, A. Simple and accurate solutions of scattering coefficients of E-plane junctions in rectangular waveguides / A. Widarta, S. Kuwano and K. Kokubun // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1995. – Vol. 43, Dec. – P. 2716–2718.
3. Rebollar, J. M. Fullwave analysis of three and four-port rectangular waveguide junctions / J. M. Rebollar, J. Esteban and J. E. Page // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1994. – Vol. 42, Feb. – P. 256–263.
4. Esteban, J. Generalized scattering matrix of generalized two-port discontinuities: application to four-port and nonsymmetric six-port couplers / J. Esteban and J. M. Rebollar // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1991. – Vol. 39, Oct. – P. 1725–1734.
5. Liang, X.-P. A rigorous three plane mode-matching technique for characterizing waveguide T-junctions, and its application in multiplexer design / X.-P. Liang, K. A. Zaki and A. E. Atia // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1991. – Vol. 39, Dec. – P. 2138–2147.
6. Заргано, Г. Ф. Волноводы сложных сечений / Г. Ф. Заргано, В. П. Ляпин, В. С. Михалевский и др. – М. : Радио и связь, 1986. – 124 с.
7. Chumachenko, V. P. Efficient field representation for polygonal region / V. P. Chumachenko // Electronics Letters. – 2001. – Vol. 37, No. 19 – P. 1164–1165.
8. Chumachenko, V. P. Accurate analysis of waveguide junctions with rectangular coupling cavity / V. P. Chumachenko, E. Karaçuba and I. V. Petrusenko // Microwave and Optical Technology Letters. – 2001. – Vol. 31, Oct. – P. 305–308.
9. Чумаченко, Я. В. К обоснованию численного решения одной задачи рассеяния волн для нагруженного излома прямоугольного волновода / Я. В. Чумаченко, В. П. Чумаченко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2009. – № 2. – С. 32–34.
10. Чумаченко, Я. В. Исправления к статье «К обоснованию численного решения одной задачи рассеяния волн для нагруженного излома прямоугольного волновода» / Я. В. Чумаченко, В. П. Чумаченко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 1. – С. 14.
11. Kanellopoulos, V. N. A complete E-plane analysis of waveguide junctions using the finite element method / V. N. Kanellopoulos and J. P. Webb // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1990. – Vol. 38, Mar. – P. 290–295.
12. Прохода, И. Г. Расчет Н-плоскостного направленного ответвителя с учетом толщины общей стенки между волноводами / И. Г. Прохода, В. И. Лозяной, В. П. Чумаченко // Изв. вузов. Радиофизика. – 1974. – Т. 17, № 8. – С. 1214–1218.

13. Yakovlev, A. B. Analysis of microstrip discontinuities using method of integral equations for overlapping regions / A. B. Yakovlev and A. B. Gnilenko // IEE Proceedings. Microwaves, Antennas and Propagation. – 1997. – Vol. 144, Dec. – P. 449–457.
14. Хенл, Х. Теория дифракции / Х. Хенл, А. Мауз, К. Вестфаль. – М. : Мир, 1964. – 428 с.
15. Шестопалов, В. П. Матричные уравнения типа свертки в теории дифракции / В. П. Шестопалов, А. А. Кириленко, С. А. Масалов.– Киев : Наукова думка, 1984. – 296 с.
16. Градштейн, И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : Наука, 1971. – 1108 с.
17. Канторович, Л. В. Приближенные методы высшего анализа / Л. В. Канторович, В. И. Крылов. – М.-Л. : Физматгиз, 1962. – 708 с.

Надійшла 04.11.2010

Чумаченко Я. В., Чумаченко В. П.

ПРО НЕСКІНЧЕННІ СИСТЕМИ МЕТОДУ ДОБУТКУ ОБЛАСТЕЙ ДЛЯ ЗАДАЧ РОЗСІЮВАННЯ ХВИЛЬ В ПЛОЩИННИХ ВУЗЛАХ ЗІ З'ЄДНУВАЛЬНОЮ ПОРЖНОЮ ПРЯМОКУТНОЇ ФОРМИ

Вивчаються властивості нескінченних систем лінійних рівнянь, які виникають при використанні методу добутку областей для знаходження характеристик розсіювання площин-

них хвилевідніх трансформаторів з навантаженою з'єднувальною порожниною прямокутної форми. На прикладі задачі про злам хвилеводу показано, що у випадку однорідних умов Неймана на провідних межових поверхнях застосування цього методу приводить до квазірегулярних систем.

**Ключові слова:** нескінченні системи лінійних рівнянь, метод добутку областей, хвилевідні неоднорідності.

Chumachenko Ya. V., Chumachenko V. P.

ON LINEAR INFINITE SYSTEMS OF DOMAIN-PRODUCT TECHNIQUE FOR WAVE SCATTERING PROBLEMS IN PLANAR WAVEGUIDE JUNCTIONS WITH RECTANGULAR CONNECTING CAVITY

Properties of infinite systems of linear equations that occur when applying the domain-product technique to scattering problems for planar waveguide transformers with a loaded rectangular connecting cavity are studied. By the example of a waveguide bend, it is shown that in case of homogeneous Neumann conditions at conducting boundaries the method results in quasiregular systems.

**Key words:** linear infinite systems, domain-product technique, waveguide discontinuities.

УДК 537.874.6

Чумаченко Я. В.<sup>1</sup>, Чумаченко В. П.<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Д-р физ.-мат. наук, заведующий кафедрой Запорожского национального технического университета

## ИСПРАВЛЕНИЯ К СТАТЬЕ «К ОБОСНОВАНИЮ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ОДНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ ВОЛН ДЛЯ НАГРУЖЕННОГО ИЗЛОМА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА»

В работе [1] авторы обнаружили ошибку, которая, однако, не повлияла на полученные результаты.

Если  $k_0$  таково, что для  $n \leq N$   $\gamma_n^{(y)} = i\beta_n$  ( $\beta_n$  – действительная величина), то  $|e^{-2\gamma_n^{(y)}d} - 1| \leq 2$  при  $n \leq N$  и  $|e^{-2\gamma_n^{(y)}d} - 1| \leq 1$  при  $n > N$ . Введем обозначения

$$\alpha = \frac{m^2 c}{d^2 \gamma_m^{(x)}} \sum_{n=1}^N \frac{1}{n^2 + \left(\frac{\gamma_m^{(x)} c}{\pi}\right)^2} \xrightarrow[m \rightarrow \infty]{} 0,$$

$$A = \frac{m^2 c}{d^2 \gamma_m^{(x)}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2 + \left(\frac{\gamma_m^{(x)} c}{\pi}\right)^2}.$$

Тогда в [1] оценка (14) с учетом соотношений (15)–(17) должна иметь вид

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{\tilde{d}_{mn}^{(x)}}{\Delta_m^{(x)}} \right| < \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left| \tilde{d}_{mn}^{(x)} \right|}{2\gamma_m^{(x)}} \leq \alpha + A \leq$$

$$\leq \alpha + \frac{1}{2} \frac{1}{1 - \left( \frac{\chi d}{m\pi} \right)^2} \xrightarrow[m \rightarrow \infty]{} \frac{1}{2}.$$

Это означает, что, начиная с некоторого значения  $m$ , выполняется неравенство (19). Справедливость неравенства (21) для достаточно больших  $m$  устанавливается аналогично. Отсюда следует, что итоговая СЛАУ является квазирегулярной и известным образом может быть сведена к конечной системе после применения метода усечения к уравнениям, для которых выполняются оба условия (19) и (21).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чумаченко, Я. В. К обоснованию численного решения одной задачи рассеяния волн для нагруженного излома прямоугольного волновода / Я. В. Чумаченко, В. П. Чумаченко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2009. – № 2. – С. 32–34.

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

## РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

### RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.396.6

Єфіменко А. А.

*Канд. техн. наук, доцент Одесського національного політехнічного університету*

#### ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ МІЖБЛОЧНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННИХ ЗАСОБІВ

Запропоновано моделі та алгоритми вибору конструкцій електричних з'єднань за критеріями вартості і трудомісткості, показниками якості та ефективності, які дозволяють оптимізувати процес розробки електронних засобів.

**Ключові слова:** електричні з'єднання, міжконтактні з'єднання, оптимізація вартості, електронні пристрой.

#### ВСТУП

Існує досить велика кількість варіантів конструктивно-технологічного виконання міжблочних електричних з'єднань електронних засобів (ЕЗ), які розглядаються у двох нерозривно зв'язаних між собою аспектах – міжконтактні з'єднання і контактні з'єднання (власне контактування). Різноманіття варіантів об'єднання міжконтактних з'єднань (видів електричних з'єднань) і контактних з'єднань (методів електричних з'єднань), які мають різні техніко-економічні показники, приводить до необхідності визначення оптимальних варіантів конструкцій електричних з'єднань на базі впровадження математичного апарату та широкогоЗастосування засобів обчислювальної техніки і є актуальною задачею.

У свою чергу, обумовлюється актуальність розвитку методологічних аспектів проєктування, що включають у себе виявлення і дослідження комплексу практично необхідних вимог до перспективних електричних з'єднань, розробку системи класифікації їхніх параметрів і показників якості, математичну постановку задач синтезу оптимальних варіантів електричних

з'єднань. Важливим є також ефективність методів проєктування, що впроваджуються, – вони повинні забезпечувати високу достовірність результатів при незначних матеріальних та часових затратах.

Дослідження в напрямку вирішення даних проблем не носять систематичного характеру і останнім часом обмежуються розробкою нових видів та методів електричних з'єднань без створення об'єктивних засобів їх аналізу та оптимального використання, наприклад [1–5]. Попередні дослідження (деякі з них представлени в [6–10]) потребують врахування розвитку теорії та практики створення ЕЗ і використання сучасних можливостей обчислювальної техніки та програмних засобів проєктування. Крім того, слід враховувати, що розробка оптимальної конструкції електричних з'єднань являє собою досить складну науково-технічну задачу, тому що вибір необхідно вести за багатьма критеріями та при різних обмеженнях, що накладаються на умови задачі та елементи її рішення. Це створює передумови для розробки та використання достатньо великої множини моделей оптимізації [11].

Метою даної статті є розробка моделей та алгоритмів вибору (синтезу) і оптимізації конструкцій електричних з'єднань в електронних засобах, які можна було б використовувати на ранніх стадіях проектування. При цьому доцільно використовувати різні критерії і, відповідно, моделі з метою надання розробникам ЕЗ різних можливостей щодо деталізації початкових даних і достовірності результатів оптимізації.

З метою врахування всіх можливих варіантів конструкцій електричних з'єднань дуже важливим є розгляд всіх їх складових елементів, а також тих інфраструктур, де вони будуть використовуватись.

Зважаючи на суттєвий взаємовплив електричних з'єднань та інших частин ЕЗ, можна зробити висновок, що електричні з'єднання є важливою частиною електронних засобів і потребують найбільш пильної уваги при їх проектуванні за умов отримання оптимальних результатів. Вирішуючи задачу розробки електричних з'єднань у складі ЕЗ, можна керуватися схемою, представленою на рис. 1, на якій конкретизовано деякі роботи (штрих-пунктирною лінією ок-

реслені блоки, що стосуються розробки електричних з'єднань). На схемі використані позначення: ТЗ – технічне завдання; ЭЗ – схема електрична принципова; ПЭЗ – перелік елементів до схеми електричної принципової; НК – несучі конструкції; КД – конструкторська документація.

Відповідно до розглянутої схеми важливою частиною створення електричних з'єднань є вибір їх структури (варіантів конструкції) та її оптимізація.

Вибір оптимального варіанту конструкції електричних з'єднань доцільно вести за такими напрямками:

- 1) мінімальна вартість;
- 2) мінімальна трудомісткість;
- 3) максимальні показники якості;
- 4) максимальні показники ефективності.

Ці варіанти не рівноцінні як з точки зору затрат на їх реалізацію, так і з позицій достовірності результатів оптимізації. Звичайно і використання тих чи інших варіантів є прерогативою розробників ЕЗ і залежать від умов, в яких вони діють.

Нижче наведено математичні моделі оптимізації, що відповідають розглянутим напрямкам.



**Рис. 1.** Процес розробки ЕЗ з конкретизацією деяких робіт зі створення електричних з'єднань

## МОДЕЛІ ВИБОРУ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ

### 1. Мінімізація вартості електричних з'єднань

В цьому випадку модель вибору структури (варіанта конструкції) електричних з'єднань ЕЗ може бути представлена як

$$K_1 = \min \sum_{i=1}^n C_i \quad (1)$$

при обмеженнях  $a \subset a_{\text{доп}}$ ,  $r \subset r_{\text{доп}}$ ,  $h \subset h_{\text{доп}}$ , де  $a$ ,  $r$ ,  $h$  – відповідно типи міжконтактних, контактних з'єднань і елементів кріплення, які лежать в області припустимих типів  $a_{\text{доп}}$ ,  $r_{\text{доп}}$ ,  $h_{\text{доп}}$ ;  $n$  – кількість складових частин конструкції електричних з'єднань;  $C = \{M, Q, P\}$  – вартість електричних з'єднань;  $M \subset \{M_1, M_2, \dots, M_a, \dots, M_s\}$  – множина вартостей міжконтактних з'єднань  $M$ , що складається з вартостей окремих типів міжконтактних з'єднань;  $s$  – кількість типів міжконтактних з'єднань;  $Q \subset \{Q_1, Q_2, \dots, Q_r, \dots, Q_t\}$  – множина вартостей контактних з'єднань  $Q$ , що складається з вартостей окремих типів контактних з'єднань;  $t$  – кількість типів контактних з'єднань;  $P \subset \{P_1, P_2, \dots, P_h, \dots, P_l\}$  – множина вартостей елементів кріплення  $P$ , що складається з вартостей окремих типів кріплення;  $l$  – кількість типів елементів кріплення.

У свою чергу

$$M_a = \sum_{k=1}^d m_k, Q_r = \sum_{v=1}^z q_v, P_h = \sum_{w=1}^g p_w,$$

де  $m_k$  – вартість окремих складових міжконтактних з'єднань;  $q_v$  – вартість окремих складових контактних з'єднань;  $p_w$  – вартість окремих складових елементів кріплення.

### 2. Мінімізація трудомісткості виготовлення електричних з'єднань

Модель вибору має вигляд

$$K_2 = \min \sum_{i=1}^n T_i \quad (2)$$

при обмеженнях  $a \subset a_{\text{доп}}$ ,  $r \subset r_{\text{доп}}$ ,  $h \subset h_{\text{доп}}$ , де  $T_i$  – трудомісткість  $i$ -го типу електричних з'єднань.

Ця модель є спрощеною модифікацією попередньої моделі у зв'язку з тим, що трудомісткість є частиною всіх затрат, тобто повної вартості. В деяких випадках зручніше користуватись саме цим показником.

### 3. Максимізація показників якості

Модель вибору оптимальної структури (варіанту конструкції) електричних з'єднань ЕЗ за показниками якості має вигляд

$$K_3 = \max \sum_{j=1}^b K_j \quad (3)$$

при обмеженнях  $a \subset a_{\text{доп}}$ ,  $r \subset r_{\text{доп}}$ ,  $h \subset h_{\text{доп}}$ , де  $b$  – кількість часткових показників якості  $K_j$  електричних з'єднань.

Як часткові можуть бути використані такі показники якості [12]:

– коефіцієнт об'єму конструкції електричних з'єднань

$$K_V = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n V_i l_i + \sum_{i=1}^n V_{ki} n_{ki}}{V}, \quad (4)$$

де  $V_i$  – об'єм одиниці довжини  $i$ -го з'єднання;  $V_{ki}$  – об'єм контакту  $i$ -го з'єднання;  $V$  – об'єм всього виробу;  $l_i$  – довжина  $i$ -го з'єднання;  $n_{ki}$  – число контактів  $i$ -го з'єднання;  $n$  – число з'єднань у виробі;

– показник питомого об'єму конструкції електричних з'єднань

$$V_{\text{пит}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i l_i + \sum_{i=1}^n V_{ki} n_{ki}}{n}; \quad (5)$$

– коефіцієнт маси конструкції електричних з'єднань

$$K_m = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n m_i l_i + \sum_{i=1}^n m_{ki} n_{ki}}{M}, \quad (6)$$

де  $m_i$  – маса одиниці довжини  $i$ -го з'єднання;  $m_{ki}$  – маса контакту  $i$ -го з'єднання;  $M$  – маса всього виробу;

– показник питомої маси конструкції електричних з'єднань

$$m_{\text{пит}} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i l_i + \sum_{i=1}^n m_{ki} n_{ki}}{n}; \quad (7)$$

– показник питомого напрацювання на відмову конструкції електричних з'єднань

$$t_{\text{пит}} = \frac{1}{\left( \sum_{i=1}^n \lambda_i + \sum_{j=1}^d \lambda_j \right) \cdot n}, \quad (8)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність відмови  $i$ -го з'єднання;  $\lambda_j$  – інтенсивність відмови  $j$ -го контакта;  $d$  – кількість контактів у виробі;

– показник приведеного часу затримки передачі (обробки) інформації при використанні заданої конструкції електричних з'єднань

$$\tau_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \tau_i / \sum_{i=1}^n l_i, \quad (9)$$

де  $\tau_i$  – затримка сигналу в  $i$ -му з'єднанні тракту передачі (обробки) інформації;

– коефіцієнт автоматизації виконання електромонтажу

$$K_a = n_a / n, \quad (10)$$

де  $n_a$  – кількість з'єднань, що виконуються автоматизованими методами.

Для рішення задачі вибору оптимального варіанту конструкції електричних з'єднань використаємо теорію пасивних ігор [13]. Ця теорія добре підходить для вирішення такого класу задач з неповною початковою інформацією.

Складемо ігрову матрицю (табл. 1). Рядки матриці відповідають варіантам конструкції електричних з'єднань  $Y_i$ , а стовпці – їх частковим показникам якості  $K_j$ . В комірки ігрової матриці заносяться розраховані значення часткових показників якості  $\Pi_{ij}$  за різними варіантами конструкції  $Y_i$ .

Серед часткових показників якості є такі, що максимізуються, і такі, що мінімізуються. Для наведених вище показників максимізуються  $K_v$ ,  $K_m$ ,  $t_{\text{пит}}$ ,  $K_a$  і мінімізуються  $V_{\text{пит}}$ ,  $m_{\text{пит}}$ ,  $\tau_{\text{пр}}$ . Для об'єднання (згортачки) всіх часткових показників в інтегральний, наприклад, у вигляді суми, потрібно табл. 1 фактично розділити на дві: одна – з матрицею значень показників якості, що максимізуються [ $\Pi \max_{ij}$ ], друга – з матрицею значень показників якості, що мінімізуються [ $\Pi \min_{ij}$ ]. В свою чергу, для обох таблиць кількість варіантів конструкції однакова, тобто  $i$  лежить у межах від 1 до  $u$ , а кількість часткових показників якості в загальному випадку може бути різною: для максимізуючих  $j$  лежить у межах від 1 до  $c$ , для мінімізуючих – від 1 до  $e$ , при цьому  $c + e = b$ .

Таблиця 1

Варіант конструкції	$K_1$	$K_2$	...	$K_j$	...	$K_b$
$Y_1$	$\Pi_{11}$	$\Pi_{12}$	...	$\Pi_{1j}$	...	$\Pi_{1b}$
.	.	.	.	.	.	.
$Y_i$	$\Pi_{i1}$	$\Pi_{i2}$	...	$\Pi_{ij}$	...	$\Pi_{ib}$
.	.	.	.	.	.	.
$Y_u$	$\Pi_{u1}$	$\Pi_{u2}$	...	$\Pi_{uj}$	...	$\Pi_{ub}$

Часткові показники якості, що використовуються, є різними за фізичною природою і можуть бути розмірними та такими, що не мають розмірності. При цьому значення кожного  $j$ -го показника можуть суттєво відрізнятися між собою за величиною. У зв'язку з цим потрібно виконати нормування значень показників якості, використовуючи таке співвідношення:

$$\Pi_{ijH} = \Pi_{ij} / \max \Pi_j, \quad (11)$$

де  $\Pi_{ij}$  – значення показників якості в кожній із двох матриць;  $\max \Pi_j$  – максимальне значення  $j$ -го показника якості, тобто максимальне значення в кожному стовпці.

У результаті отримуємо дві пронормовані матриці [ $\Pi \max_{ijH}$ ] та [ $\Pi \min_{ijH}$ ].

Часткові показники якості, як такі, що максимізуються, так і такі, що мінімізуються, по-різному впливають на інтегральний показник якості, за яким визначається оптимальний варіант конструкції електричних з'єднань. Ступінь впливу можливо врахувати за допомогою коефіцієнтів вагомості, які можна визначити, наприклад, експертним шляхом. З цією метою елементи обох матриць (значення часткових показників) помножуються на коефіцієнти вагомості. В результаті отримуємо пронормовані зважені матриці [ $\Pi \max_{ijH}^*$ ] та [ $\Pi \min_{ijH}^*$ ].

Наступним кроком є згортка значень показників якості для кожного варіанта конструкції електричних з'єднань в межах кожної з двох матриць – за максимізуючими та мінімізуючими показниками:

$$K_{3\max i} = \sum_{j=1}^c \Pi \max_{ijH}^*; K_{3\min i} = \sum_{j=1}^e \Pi \min_{ijH}^*. \quad (12)$$

Для визначення оптимального варіанту конструкції електричних з'єднань виконуємо згортку загальних значень максимізуючих та мінімізуючих показників якості для кожного варіанта у вигляді частки

$$K_{3i} = \sum_{j=1}^c \Pi \max_{ijH}^* / \sum_{j=1}^e \Pi \min_{ijH}^*. \quad (13)$$

Оптимальним буде той варіант, який дає максимальне відношення  $K_{3i} \rightarrow \max$ .

#### 4. Максимізація показників ефективності

У ряді випадків доцільно використовувати не просто показники якості, а показники ефективності – відношення показників якості до вартості варіанту конструкції електричного з'єднання. Це дає змогу оцінювати не тільки технічні характеристики,

а її економічні, тобто враховувати загалом співвідношення «якість/вартість».

Модель вибору оптимального варіанту конструкції електричних з'єднань ЕЗ за показниками ефективності має вигляд

$$K_4 = \max \sum_{j=1}^b E_j \quad (14)$$

при тих же обмеженнях  $a \subset a_{\text{доп}}$ ,  $r \subset r_{\text{доп}}$ ,  $h \subset h_{\text{доп}}$ , де  $E_j$  – часткові показники ефективності.

Для рішення задачі оптимізації представляємо всі часткові показники якості у вигляді показників ефективності (виграшів), які завжди максимізуються, за допомогою співвідношень:

– для максимізуемых часткових показників

$$E_j = \frac{K_j}{C_i},$$

де  $C_i$  – вартість  $i$ -го варіанта конструкції електричних з'єднань;

– для мінімізуемых часткових показників

$$E_j = \frac{1}{K_j \cdot C_i}.$$

Для розрахунку елементів матриці ефективності (виграшів) слід використовувати такі співвідношення, що витікають із попередніх:

$$E_{ij} = \frac{\Pi \max_{ij}}{C_i} \text{ та } E_{ij} = \frac{1}{\Pi \min_{ij} \cdot C_i}. \quad (15)$$

Розрахувавши таким чином показники ефективності, побудуємо матрицю виграшів (табл. 2), в якій всі показники максимізуються.

**Таблиця 2**

Варіант конструкції	$K_1$	$K_2$	...	$K_j$	...	$K_b$
$Y_1$	$E_{11}$	$E_{12}$	...	$E_{1j}$	...	$E_{1b}$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
$Y_i$	$E_{i1}$	$E_{i2}$	...	$E_{ij}$	...	$E_{ib}$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
$Y_u$	$E_{u1}$	$E_{u2}$	...	$E_{uj}$	...	$E_{ub}$

Як і у випадку використання попередньої моделі, для визначення оптимального варіанту конструкції електричних з'єднань слід виконати такі операції:

– нормування значень показників ефективності за таким співвідношенням:

$$E_{ijn} = E_{ij} / \max E_j, \quad (16)$$

де  $E_{ijn}$  – нормоване значення показника ефективності ( $E_{ijn} \leq 1$ );  $\max E_j$  – максимальне значення показника ефективності по кожному частковому показнику якості (в кожному стовпці матриці);

– уведення коефіцієнтів вагомості та отримання пронормованої зваженої матриці  $[E_{ijn}^*]$ ;

– згортка часткових показників ефективності в інтегральний у вигляді суми для кожного з варіантів конструкції електричних з'єднань:

$$K_{4i} = \sum_{j=1}^b E_{ijn}^*; \quad (17)$$

– визначення оптимального варіанта конструкції як

$$K_{4i} \rightarrow \max.$$

## АЛГОРИТМИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ

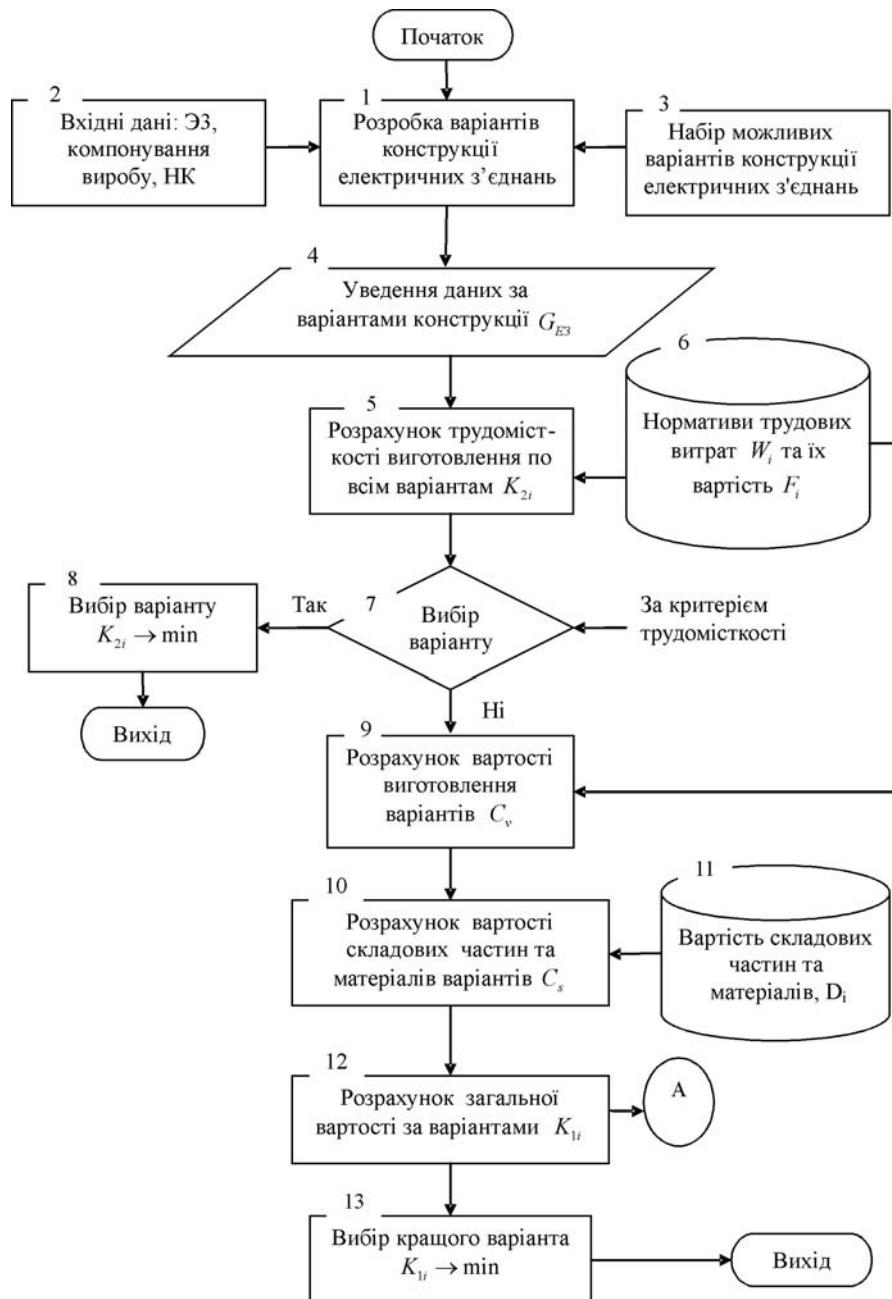
У відповідності до представлених моделей розроблено алгоритми (рис. 2, 3), які дозволяють в різних умовах проводити вибір конструкцій електричних з'єднань.

Враховуючи наявність однакових початкових даних, баз даних та операцій, що виконуються, алгоритми побудовані таким чином, що чотири моделі вибору реалізовані двома алгоритмами.

### 1. Алгоритм вибору за критеріями трудомісткості та вартості

Алгоритм представлений на рис. 2, при цьому визначається мінімальна трудомісткість чи вартість конструкції електричних з'єднань. Вибір конструкції відбувається на основі порівняння трудомісткості виготовлення їх варіантів, якщо цього достатньо (алгоритм використовується частково), або порівняння повної вартості варіантів (алгоритм використовується повністю).

**Блок 1.** Процес вибору варіанта електромонтажу передбачає наявність цих варіантів. Тому насамперед потрібно в ескізному вигляді розробити ці варіанти. Для цього необхідні початкові дані (**блок 2**) – як мінімум, схема електрична принципова (ЭЗ), несуча конструкція (НК), яка буде використана для виробу, що розробляється, та компонувальний ескіз. Звичайно, на момент розробки виробу відомі набори можливих варіантів конструкції електричних з'єднань, а також частина їх, що рекомендуються для переважного використання з урахуванням вимог до виробу, умов його експлуатації, а також рівня розвитку технологій електромонтажу (**блок 3**). Аналіз цих даних дозволяє визначити обмеження до математичної



**Рис. 2.** Алгоритм вибору варіанта конструкції електрических з'єднань за критеріями трудомісткості та вартості

моделі вибору оптимального варіанту конструкції електрических з'єднань ЕЗ, що розробляється.

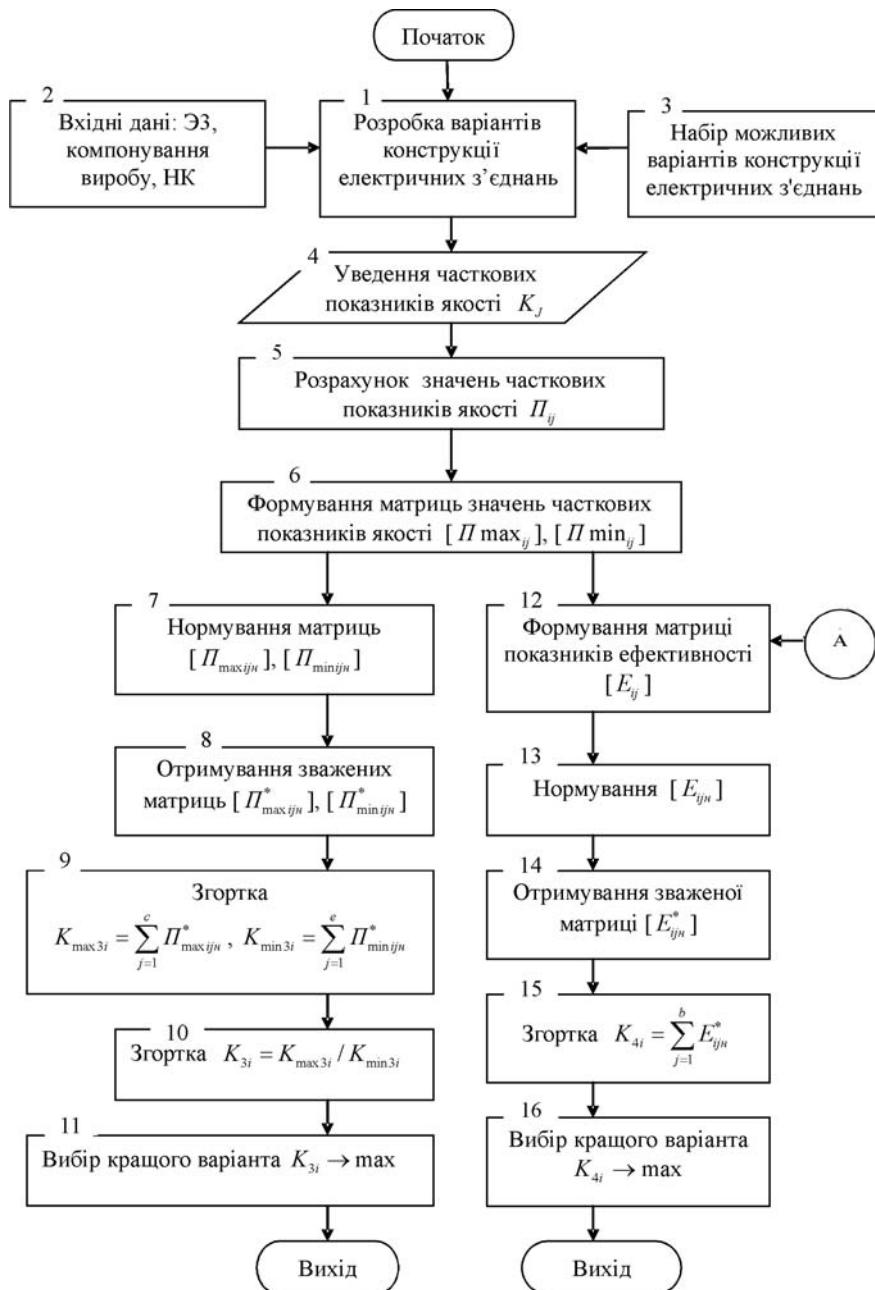
**Блок 4.** Для кожного із розроблених варіантів електромонтажу уводяться кількісні дані:

- типи проводів та кабелів;
- довжина проводів та кабелів за типом;
- інші матеріали;
- кількість роз'ємів;
- кількість підготовчих операцій (нарізка, лудіння, зачищення та ін.);
- кількість операцій монтажу;

- типи елементів кріплення та їх кількість;
- інші дані.

**Блок 5.** Для всіх прийнятих до розгляду варіантів конструкції електрических з'єднань проводиться розрахунок трудомісткості виконання електромонтажу з урахуванням всіх технологічних операцій, у тому числі підготовчих. Для цього крім даних, що надходять з блоку 4, використовуються нормативи трудових витрат, що знаходяться в базі даних (**блок 6**).

**Блок 7.** Визначається напрямок подальших розрахунків. Якщо зазначено вибір електромонтажу за кри-



**Рис. 3.** Алгоритм вибору варіанта конструкції електрических з'єднань за показниками якості та ефективності

терієм трудомісткості, то визначається варіант з мінімальним значенням трудомісткості (блок 8). Якщо потрібно врахувати повну вартість електромонтажу, то виконується перехід до блока 9.

**Блок 9.** Виконується розрахунок вартості трудових операцій виготовлення електромонтажу за прийнятими варіантами. Для цього використовуються отримані в блокі 5 значення трудомісткості, а також трудові нормативи в грошовому виразі (блок 6).

**Блок 10.** Виконується розрахунок вартості складових частин та матеріалів, що необхідні для створен-

ня конструкцій електрических з'єднань. Для цього крім даних, отриманих в блокі 4, використовується база даних, що включає нормативну вартість цих складових частин та матеріалів (блок 11).

**Блок 12.** Виконується розрахунок загальної вартості варіантів конструкції електрических з'єднань. В подальшому отримані значення використовуються для вибору кращого варіанта електромонтажу (блок 13), а також для розрахунку показників ефективності в наступному алгоритмі (зв'язок А).

## 2. Алгоритм вибору за показниками якості та ефективності

Алгоритм представлений на рис. 3. Вибір конструкції відбувається на основі порівняння показників якості чи ефективності варіантів конструкції електричних з'єднань. Кращий варіант визначається за максимальними значеннями цих показників.

**Блоки 1, 2, 3.** Ці блоки такі ж, як і в попередньому алгоритмі.

**Блок 4.** Уводяться часткові показники якості, що будуть використовуватись для оцінки, та залежності для їх розрахунку. Набір можливих для використання показників якості наведений вище { (4)–(10) }.

**Блок 5.** Розраховуються значення часткових показників якості за всіма прийнятими до розгляду варіантами конструкції електричних з'єднань.

**Блок 6.** Формуються дві таблиці з матрицями значень часткових показників якості:

- $[\Pi \max_{ij}]$  – з показниками, що максимізуються  $K_v, K_m, t_{\text{пир}}, K_a$ ;
- $[\Pi \min_{ij}]$  – з показниками, що мінімізуються  $V_{\text{пир}}, m_{\text{пир}}, \tau_{\text{пр}}$ .

Надалі алгоритм роз'єднується на два напрямки – перший (блоки 7–11) дає змогу вибрати варіант конструкції за показниками якості, другий (блоки 12–16) – за показниками ефективності.

**Блок 7.** Виконується нормування значень показників якості, використовуючи співвідношення (11). У результаті отримуємо дві пронормовані матриці:  $[\Pi \max_{ijn}]$  та  $[\Pi \min_{ijn}]$ .

**Блок 8.** Елементи обох матриць помножуються на коефіцієнти вагомості. В результаті отримуємо пронормовані зважені матриці  $[\Pi \max_{ijn}^*]$  та  $[\Pi \min_{ijn}^*]$ .

**Блок 9.** З використанням співвідношень (12) виконується згортка значень показників якості для кожного варіанта конструкції електричних з'єднань в межах кожної з двох матриць – за показниками, що максимізуються та мінімізуються.

**Блок 10.** Виконується згортка загальних значень максимізуючих та мінімізуючих показників якості для кожного варіанта за співвідношенням (13) для визначення оптимального варіанта конструкції (**блок 11**).

**Блок 12.** Для розрахунку елементів і формування матриці показників ефективності (виграшів) використовуються співвідношення (15).

**Блок 13.** Нормування значень показників ефективності виконується за співвідношенням (16).

**Блок 14.** Для отримання пронормованої зваженої матриці  $[E_{ijn}^*]$  уводяться коефіцієнти вагомості.

**Блок 15.** Виконується згортка часткових показників ефективності в інтегральний у вигляді суми

(17) для кожного з варіантів конструкції електричних з'єднань для вибору оптимального варіанта конструкції (**блок 16**).

Розроблені моделі і алгоритми призначенні для практичної реалізації вибору структур (варіантів конструкції) електричних з'єднань та їх оптимізації. Вони можуть використовуватися на різних стадіях проектування, в тому числі і на ранніх, для різних умов розробки і виробництва ЕЗ. Займатися питаннями створення оптимальних конструкцій електричних з'єднань доцільно в тісному поєднанні з вибором оптимальних базових несучих конструкцій [14].

Подальші дослідження та розробки слід розвивати в напрямку створення програмного продукту і баз даних, інших моделей оптимізації та визначення конструктивно-технологічних параметрів різних видів і методів електричних з'єднань.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ермолович, А. Оптоэлектрические печатные платы / А. Ермолович // Электронные компоненты и системы. – 2001. – № 12. – С. 3–4.
2. Фишер, Д. Реализация оптоэлектронных оснований для печатных плат / Д. Фишер // Печатный монтаж. – 2007. – № 6. – С. 30–32.
3. Беломытцев, В. Электромонтаж без отвертки / В. Беломытцев // Современные технологии автоматизации. – 2005. – № 4. – С. 68–71.
4. Комков, А. Кристалл – корпус – печатная плата. Проектирование соединений / А. Комков, Г. Хренов // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 7. – С. 84–86.
5. Назаров, Е. Внутренний монтаж функциональных радиоэлектронных блоков / Е. Назаров // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2008. – № 3. – С. 36–39.
6. Лутченков, Л. С. Аналитический метод определения метрических параметров проводного монтажа / Л. С. Лутченков // Техника средств связи. Сер. Техника проводной связи. – 1986. – Вып. 4. – С. 22–28.
7. Лутченков, Л. С. Расчет конструктивных параметров электромонтажа аппаратуры связи / Л. С. Лутченков // Электросвязь. – 1988. – № 11. – С. 53–55.
8. Ширяев, Ю. Н. О выборе вида электромонтажа аппаратуры многоканальной связи [Текст] / Ю. Н. Ширяев, А. Э. Бартули // Техника средств связи. Сер. Техника проводной связи. – 1988. – Вып. 2. – С. 45–48.
9. Ефименко, А. А. Формализация задачи выбора способа электрического монтажа по критерию стоимости / А. А. Ефименко, Г. К. Яхонтов // Техника средств связи. Сер. Техника проводной связи. – 1988. – Вып. 5. – С. 102–106.
10. Ефименко, А. А. Выбор оптимального вида межблочного электромонтажа аппаратуры передачи и обработки информации / А. А. Ефименко, А. Н. Бузин // Средства связи. – 1990. – Вып. 2. – С. 61–65.
11. Ефименко, А. А. Формализация задач проектирования межблочных электрических соединений ЭС / А. А. Ефименко, И. Н. Маринов, А. М. Козаревич // Тр. 11-й Междунар. науч.-практич. конф. «СИЭТ-2010». Т. II. – Одесса, 2010. – С. 68.
12. Ефименко, А. А. Система показателей качества конструкций межблочных электрических соединений / А. А. Ефименко, А. В. Голов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1998. – № 3–4. – С. 16–18.

13. Фролов, В. А. Анализ и оптимизация в прикладных задачах конструирования РЭС: учеб. пособие / В. А. Фролов. – К. : Вища шк., 1991. – 310 с.
14. Ефименко, А. А. Оптимальный выбор стандартных несущих конструкций для электронных средств / А. А. Ефименко, А. И. Вильчинский // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2010. – № 2. – С. 22–27.

Надійшла 04.11.2010

Ефименко А. А.

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕЖБЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Предложены модели и алгоритмы выбора конструкций электрических соединений по критериям стоимости и трудоемкости, показателям качества и эффективности, кото-

рые позволяют оптимизировать процесс разработки электронных средств.

**Ключевые слова:** электрические соединения, межконтактные соединения, оптимизация стоимости, электронные устройства.

Efimenko A. A.

## CHOICE OF OPTIMAL INTERBLOCK ELECTRIC CONNECTONS DESIGN FOR ELECTRONIC MEANS

Models and algorithms are proposed for choosing a design of electric contacts by the criteria of cost and labor expenditures as well as quality and efficiency indices, which permit to optimize the electronic means engineering process.

**Key words:** electric connections, intercontact connections, cost optimization, electronic devices.

УДК 621.314.63

Остренко В. С.

Канд. техн. наук, доцент Запорізької державної інженерної академії

## АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПОНЕНТ, ЩО АПРОКСИМУЮТЬ ПЕРЕХІДНИЙ ТЕПЛОВИЙ ОПІР ОХОЛОДЖУВАЧА

Запропоновано алгоритм визначення параметрів експонент, що апроксимують графік залежності перехідного теплового опору охолоджувача в часі. Це дає можливість включити охолоджувач у систему розрахунку температури напівпровідникової структури силових напівпровідникових приладів.

**Ключові слова:** напівпровідниковий прилад, охолоджувач, температура напівпровідникової структури, тепловий опір, параметри експонент, режими охолодження.

Надійність роботи силових напівпровідникових приладів в значній мірі залежить від температури їх напівпровідникової структури. Тому процесам нагріву та охолодження таких приладів завжди приділяється належна увага. Особливо це стосується нестационарних режимів навантаження приладів. Температура структури залежить від втрати потужності в приладі та від теплового опору системи «прилад – охолоджувач». Перехідний тепловий опір системи «прилад – охолоджувач» на момент часу  $t$  можна визначити за формулою

$$Z_{\text{thj}}(t) = Z_{\text{thjC}}(t) + R_{\text{thCH}} + Z_{\text{thH}}(t), \quad (1)$$

де  $Z_{\text{thjC}}(t)$  – перехідний тепловий опір «структурка – корпус приладу»;  $R_{\text{thCH}}$  – тепловий опір «корпус приладу – контактна поверхня охолоджувача»;  $Z_{\text{thH}}(t)$  – перехідний тепловий опір охолоджувача.

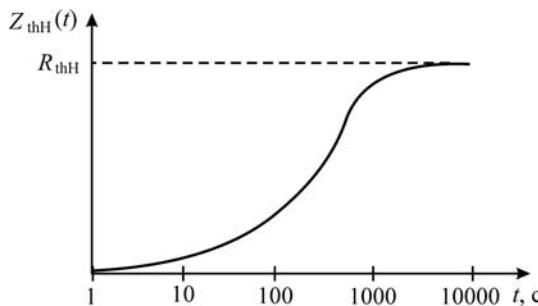
Характеристики  $Z_{\text{thjC}}(t)$  та параметри  $R_{\text{thCH}}$  надаються більшістю великих виробників напівпровідникових приладів в інформаційних матеріалах, причому характеристики  $Z_{\text{thjC}}(t)$  надаються як у графічно-

му, так і в аналітичному вигляді. В цей же час, характеристики охолоджувачів  $Z_{\text{thH}}(t)$  надаються виробниками охолоджувачів у інформаційних матеріалах тільки у графічній формі [1]. Відсутність аналітичної форми представлення перехідного теплового опору охолоджувача значно ускладнює виконання розрахунків теплових режимів роботи напівпровідникових приладів. Тому розробка алгоритму визначення параметрів експонент, що апроксимують графік залежності перехідного теплового опору охолоджувача в часі, є актуальню.

Рекомендується такий алгоритм визначення параметрів експонент, що апроксимують графік залежності перехідного теплового опору охолоджувача та/або силового напівпровідникового приладу.

### 1. ВИЗНАЧЕННЯ ПОЧАТКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ

Залежність теплового опору в часі у напівлогарифмічному масштабі показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Залежність перехідного теплового опору в часі

Графік, показаний на рис. 1, можна апроксимувати як суму експонент:

$$Z_{\text{thH}}(t) = \sum_{i=1}^n R_i [1 - \exp(-t / \tau_i)], \quad (2)$$

де  $Z_{\text{thH}}(t)$  – перехідний тепловий опір охолоджувача;  $R_i$ ,  $\tau_i$  – параметри експонент, що апроксимують криву перехідного теплового опору, причому сума усіх  $R_i$  дорівнює значенню постійного теплового опору, тобто кінцевому значенню  $Z_{\text{thH}}(t)$ ;  $n$  – кількість експонент, сума яких апроксимує перехідний тепловий опір.

Необхідно визначити: параметри експонент  $R_i$ ,  $\tau_i$  на основі графіку рис. 1 та кількість експонент  $n$ , яка апроксимує перехідний тепловий опір.

На основі експериментально визначеного графіка залежності перехідного теплового опору в часі, рис. 1, вибираємо точки, що найбільш повно характеризують цю залежність, причому на кожній ділянці часу, кратній 10, повинно бути 2–4 точки, а остання точка повинна бути на ділянці сталого теплового опору  $R_{\text{thH}}$ .

Координати вибраних точок заносимо у таблицю початкових даних (табл. 1), де  $k = 1, 2, 3, \dots, K$  – порядковий номер точок апроксимації;  $t_{K-1}$  – передостання точка в ряду  $t_k$ ;  $t_K$  – остання точка в ряду  $t_k$ ;  $Z_{\text{thH}}(t_k)$  – перехідний тепловий опір для моменту часу  $t_k$ .

Задаємо похибку апроксимації  $\delta, \%$ .

**Таблиця 1.** Початкові дані

$k$	1	2	3	...	$K-1$	$K$
$t_k$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	...	$t_{(K-1)}$	$t_K$
$Z_{\text{thH}}(t_k)$	$Z_{\text{thH}}(t_1)$	$Z_{\text{thH}}(t_2)$	$Z_{\text{thH}}(t_3)$	...	$Z_{\text{thH}}(t_{(K-1)})$	$R_{\text{thH}}$

**Таблиця 2.** Різниця значень теплового опору та перехідного теплового опору

$k$	1	2	3	...	$K-2$	$K-1$	$K$
$t_k$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	...	$t_{(K-2)}$	$t_{(K-1)}$	$t_K$
$Z'_{\text{thH}}(t_k)$	$Z'_{\text{thH}}(t_1)$	$Z'_{\text{thH}}(t_2)$	$Z'_{\text{thH}}(t_3)$	...	$Z'_{\text{thH}}(t_{(K-2)})$	$Z'_{\text{thH}}(t_{(K-1)})$	0

## 2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ

2.1. Визначення параметрів експонент, що апроксимують графік перехідного теплового опору, починаємо із заміни графіка нагріву на графік охолодження, як пропонується в роботі [2]. Для цього визначаємо різницю значень теплового опору та перехідного теплового опору

$$Z'_{\text{thH}}(t_k) = R_{\text{thH}} - Z_{\text{thH}}(t_k) \quad (3)$$

та заносимо дані в табл. 2.

2.2. Визначення параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір, слід починати з моменту часу передостанньої точки ( $K-1$ ) табл. 2 з координатами  $t_k = t_{(K-1)}$ ;  $Z'_{\text{th}}(t_k) = Z'_{\text{thH}}(t_{(K-1)})$ , яка стає першою точкою відліку, рис. 2. Другою точкою апроксимації є точка ( $K-2$ ), яка, згідно з табл. 2, має такі координати:  $t_k = t_{(K-2)}$ ;  $Z'_{\text{thH}}(t_k) = Z'_{\text{thH}}(t_{(K-2)})$ .

2.3. Котангенс кута нахилу прямої, що з'єднує точки ( $K-1$ ) – ( $K-2$ ), до осі абсцис визначаємо за формулою

$$\operatorname{ctg}\psi_1 = \tau_1 = \frac{t_{(K-1)} - t_{(K-2)}}{\ln Z'_{\text{thH}}(t_{(K-2)}) - \ln Z'_{\text{thH}}(t_{(K-1)})}, \quad (4)$$

де  $\tau_1$  – перша стала часу першої експоненти у формулі (2).

2.4. Логарифм ординати точки перетину лінії ( $K-1$ ) – ( $K-2$ ) з віссю ординат визначаємо за формулою

$$\ln R_1 = \ln Z'_{\text{thH}}(t_{(K-1)}) + (t_{(K-1)}) / \tau_1, \quad (5)$$

де  $R_1$  – максимальне значення першої експоненти у формулі (1).

2.5. Значення ординати точки перетину лінії ( $K-1$ ) – ( $K-2$ ) з віссю ординат визначаємо потенціюванням  $\ln R_1$  за формулою

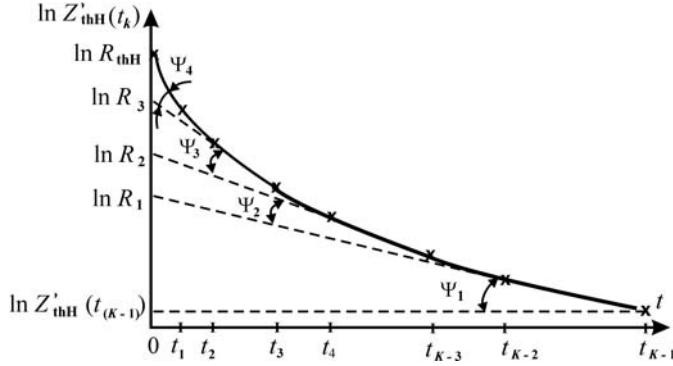
$$R_1 = \exp(\ln R_1). \quad (6)$$

Таким чином визначається другий параметр першої експоненти для формулі (2).

2.6. Далі перевіряємо, чи належить наступна точка ( $K-3$ ) лінії ( $K-1$ ) – ( $K-2$ ), рис. 2.

Логарифм ординати для моменту часу  $t_{(K-3)}$  при  $\tau_1$  визначаємо за формулою

$$\ln Z''_{\text{thH}}(t_{(K-3)}) = \ln Z'_{\text{thH}}(t_{(K-2)}) + (t_{(K-2)} - t_{(K-3)}) / \tau_1. \quad (7)$$



**Рис. 2.** Залежність логарифму  $Z'_{thH}(t)$  в часі  
(процес визначення параметрів експонент)

2.7. Значення ординати для моменту часу  $t_{(K-3)}$  при  $\tau_1$ , тобто на лінії  $(K-1)-(K-2)$ , визначаємо потенціюванням  $\ln Z''_{thH}(t_{(K-3)})$ :

$$\ln Z''_{thH}(t_{(K-3)}) = \exp(\ln Z'_{thH}(t_{(K-3)})). \quad (8)$$

2.8. Визначаємо різницю значення  $Z''_{thH}(t_{(K-3)})$  відносно значення  $Z'_{thH}(t_{(K-3)})$  за формулою

$$\delta'' = \left( \frac{Z'_{thH}(t_{(K-3)}) - Z''_{thH}(t_{(K-3)})}{Z'_{thH}(t_{(K-3)})} \right) \cdot 100\%. \quad (9)$$

2.9. Якщо значення  $\delta'' < 0$ , тобто воно негативне, це означає, що значення  $Z'_{thH}(t_{(K-3)})$  є хибним, бо не може прилад в режимі охолодження (при відсутності втрат потужності) підвищити свою температуру. В цьому випадку приймаємо, що  $Z'_{thH}(t_{(K-3)}) = Z''_{thH}(t_{(K-3)})$ , тобто точка  $(K-3)$  належить експоненті, параметри якої визначені перед цим. Подальший розрахунок слід продовжувати з точки  $(K-4)$ .

Якщо значення  $0 \leq \delta'' \leq \delta$ , де  $\delta$  – задана точність апроксимації, то це означає, що точка  $(K-3)$  належить експоненті, параметри якої визначені перед цим, і подальший розрахунок слід продовжувати з точки  $(K-4)$ .

Якщо значення  $\delta'' > \delta$ , це означає, що точка  $(K-3)$  не належить експоненті, параметри якої визначені перед цим, і подальший розрахунок слід продовжувати з цієї точки  $(K-3)$ .

2.10. Визначаємо різницю між значеннями  $Z'_{thH}(t_k)$  (табл. 2) для точок, починаючи з  $(k=1)$  до точки, з якої слід продовжувати розрахунок, яка визначена пунктом 2.9 та значеннями експоненти з параметрами  $(R_i, \tau_i)$ , що визначені перед цим, за формулою

$$Z'_{thH(i+1)}(t_k) = Z'_{thH}(t_k) - R_i \exp(-t_k/\tau_i), \quad (10)$$

де  $i = 1, 2, \dots$  – порядковий номер експонент, у яких ще не визначені параметри  $R_i, \tau_i$ ;  $k = 1, 2, \dots, K'$  –

індекс часу для точок частини кривої (рис. 2), яка не належить експонентам, у яких вже визначені параметри  $R_i, \tau_i$ ;  $K'$  – індекс часу для останньої точки частини кривої (рис. 2), яка не належить експонентам, у яких вже визначені параметри  $R_i, \tau_i$  (визначається у пункті 2.9 як точка, з якої слід продовжити розрахунок).

2.11. Наступною точкою відліку призначаємо точку, визначену пунктом 2.9, та продовжуємо розрахунки для визначення параметрів наступної експоненти, повторюючи пункти 2.2–2.10 поки не будуть виконані розрахунками точок 2–1.

2.12. Якщо кількість точок значень переходного теплового опору така, що після виконання розрахунків зі значеннями точок 3–2 не урахованім залишається значення точки  $(k=1)$  і вона не належить попередній експоненті, то параметри останньої експоненти слід визначати таким чином.

Визначаємо різницю між значенням  $Z'_{thH(n-1)}(t_1)$  та значенням експоненти з визначеними параметрами  $(R_{(n-1)}, \tau_{(n-1)})$  за формулою

$$Z'_{thHn}(t_1) = Z'_{thH(n-1)}(t_1) - R_{(n-1)} \exp(-t_1/\tau_{(n-1)}). \quad (11)$$

2.13. Визначаємо параметри останньої експоненти, до якої належить точка  $(k=1)$ . Оскільки це остання точка, приймаємо її за точку відліку, а за другу точку апроксимації приймаємо значення  $R_n$  (значення ординати вище лінії 3–2 при  $t_0 = 0$ ), яке визначається за формулою

$$R_n = R_{thH} - (R_1 + R_2 + \dots + R_{(n-1)}). \quad (12)$$

2.14. Котангенс кута нахилу лінії 1–0 (прямої, що з'єднує точку 1 та значення  $\ln R_n$ ) до лінії 3–2 визначаємо за формулою

$$\operatorname{ctg} \psi_n = \tau_n = \frac{t_1 - 0}{\ln R_n - \ln Z'_{thHn}(t_1)}. \quad (13)$$

Таким чином завершується визначення параметрів останньої експоненти. Визначено кількість експонент, які апроксимують криву, що зображена на рис. 2;  $n$  – кількість експонент, якими апроксимується переходний тепловий опір та яка визначається внаслідок проведення розрахунків.

2.15. Результатом виконаних розрахунків є параметри експонент, які апроксимують переходний тепловий опір, які заносяться у табл. 3.

**Таблиця 3.** Результати розрахунків «назва приладу, охолоджувача, умов охолодження»

$i$	1	2	3	...	$n$
$R_i$ , К/Вт	$R_1$	$R_2$	$R_3$	...	$R_n$
$\tau_i$ , с	$\tau_1$	$\tau_2$	$\tau_3$	...	$\tau_n$

2.16. Для визначення похибок у наданні початкових даних та похибок апроксимації необхідно виконати такі розрахунки.

#### 2.16.1. Визначити значення

$$Z_{\text{th Po3}}(t_k) = \sum_{i=1}^n R_i [1 - \exp(-t_k / \tau_i)], \quad (14)$$

де  $Z_{\text{th Po3}}(t_k)$  – розрахункове значення переходного теплового опору для моментів часу  $t_k$  з табл. 1 (пачаткові дані) зі значеннями  $R_i$ ,  $\tau_i$  за результатами розрахунку, табл. 3.

#### 2.16.2. Визначити абсолютну похибку.

$$\text{Абсолютна похибка} = Z_{\text{th Po3}}(t_k) - Z_{\text{thH}}(t_k), \quad (15)$$

де  $Z_{\text{th Po3}}(t_k)$  – значення, визначені у пункті 2.16.1;  $Z_{\text{thH}}(t_k)$  – значення з табл. 1.

#### 2.16.3. Визначити відносну похибку.

$$\begin{aligned} &\text{Відносна похибка} = \\ &= [(\text{Абсолютна похибка}) / Z_{\text{thH}}(t_k)] \cdot 100 \%. \quad (16) \end{aligned}$$

Результати розрахунків звести у таблицю з такими стовпчиками:  $t_k$ ;  $Z_{\text{thH}}(t_k)$ ;  $Z_{\text{th Po3}}(t_k)$ ; Абсолютна похибка; Відносна похибка.

2.17. Назву варіанту, початкові дані, результати розрахунків слід вивести на друк.

**Таблиця 4.** Значення переходного теплового опору охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_k$ , с	2	4	10	40	100	400	1000	2000
$Z_{\text{thH}}(t_k)$ , К/Вт	0,004	0,0087	0,0161	0,037	0,0485	0,08	0,0928	0,0975

**Таблиця 5.** Різниця значень теплового опору та переходного теплового опору охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8
$t_k$ , с	2	4	10	40	100	400	1000	2000
$Z'_{\text{thH}}(t_k)$ , К/Вт	0,0935	0,0888	0,0814	0,0605	0,049	0,0175	0,0047	0

### 3. ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКУ

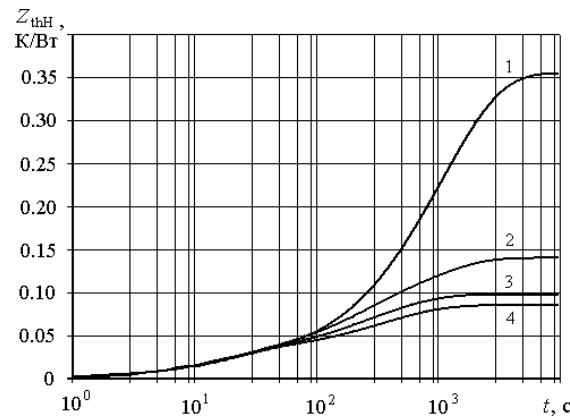
Визначимо параметри експонент, що апроксимують переходний тепловий опір охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с, який представлено кривою 3 на рис. 3 [3].

*Примітка.* 0 м/с означає природну конвекцію охолоджуючого повітря, при якій в залежності від розсіюваної потужності швидкість потоку повітря знаходиться в діапазоні значень (0,3–1,2) м/с.

На кривій 3 рис. 3 вибираємо точки, що найбільш повно характеризують залежність переходного теплового опору в часі при швидкості потоку охолоджуючого повітря 6 м/с, причому за першу точку ( $k = 1$ ) приймаємо точку для моменту часу  $t_1 = 2$  с, що найбільш точно характеризує початок кривої 3. Параметри вибраних точок заносимо у табл. 4.

Як видно з рис. 3 та з табл. 4, сталим значенням переходного теплового опору стає у точці ( $k = 8$ ); значення  $Z_{\text{thH}}(2000) = 0,0975$  К/Вт відповідає сталому режиму роботи охолоджувача, тобто  $R_{\text{thH}} = 0,0975$  К/Вт. Задаємо, що похибка апроксимації не перевищує  $\delta = 0,5 \%$ .

Визначаємо різницю значень теплового опору та переходного теплового опору згідно з формулою (3) та заносимо дані в табл. 5.



**Рис. 3.** Переходний тепловий опір охолоджувача О253 при різних режимах охолодження:

1 – при 0 м/с; 2 – при 3 м/с; 3 – при 6 м/с; 4 – при 12 м/с

За першу точку відліку приймаємо точку ( $k = 7$ ), яка, згідно з табл. 5, має такі координати:  $t_7 = 1000$  с;  $Z'_{\text{thH}}(t_7) = 0,0047$  К/Вт. Другою точкою апроксимації є точка ( $k = 6$ ), яка, згідно з табл. 5, має такі координати:  $t_6 = 400$  с;  $Z'_{\text{thH}}(t_6) = 0,0175$  К/Вт.

Котангенс кута нахилу прямої, що з'єднує точки 7 – 6, до осі абсцис визначаємо за формулою (4):

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg}\psi_1 = \tau_1 &= \frac{t_7 - t_6}{\ln Z'_{\text{thH}}(t_6) - \ln Z'_{\text{thH}}(t_7)} = \\ &= \frac{1000 - 400}{\ln 0,0175 - \ln 0,0047} = \\ &= 600 / (-4,045554 + 5,360193) = 456,4. \end{aligned}$$

Логарифм ординати точки перетину лінії 7 – 6 з віссю ординат визначаємо за формулою (5):

$$\begin{aligned} \ln R_1 &= \ln Z'_{\text{thH}}(t_7) + t_7 / \tau_1 = \ln 0,0047 + \\ &+ (1000 / 456,4) = -5,360193 + 2,191 = -3,1692. \end{aligned}$$

Значення ординати точки перетину лінії 7 – 6 з віссю ординат визначаємо потенціюванням  $\ln R_1$  за формулою (6):

$$R_1 = \exp(\ln R_1) = \exp(-3,1692) = 0,0421 \text{ К/Вт.}$$

Далі перевіряємо, чи належить наступна точка ( $k = 5$ ) лінії 7 – 6.

Логарифм ординати для моменту часу  $t_5 = 100$  с при  $\tau_1 = 456,4$  визначаємо за формулою (7):

$$\begin{aligned} \ln Z''_{\text{thH}}(t_5) &= \ln Z'_{\text{thH}}(t_6) + (t_6 - t_5) / \tau_1 = \\ &= \ln 0,0175 + (400 - 100) / 456,4 = \\ &= -4,045554 + 0,657318 = -3,388236. \end{aligned}$$

Значення ординати для моменту часу  $t_5 = 100$  с при  $\tau_1 = 456,4$  (тобто на лінії 7 – 6) визначаємо потенціюванням  $\ln Z''_{\text{thH}}(t_5)$  за формулою (6):

$$\begin{aligned} Z''_{\text{thH}}(t_5) &= \exp(\ln Z''_{\text{thH}}(t_5)) = \\ &= \exp(-3,388236) = 0,03377 \text{ К/Вт.} \end{aligned}$$

Визначаємо відносну різницю значення  $Z''_{\text{thH}}(t_5)$  та значення  $Z'_{\text{thH}}(t_5)$  за формулою (9):

$$\begin{aligned} \delta'' &= \left( \frac{Z'_{\text{thH}}(t_5) - Z''_{\text{thH}}(t_5)}{Z'_{\text{thH}}(t_5)} \right) \cdot 100 \% = \\ &= [(0,049 - 0,03377) / 0,049] \cdot 100 \% = \\ &= 31 \% > \delta = 0,5 \ %. \end{aligned}$$

Це означає, що точка  $Z'_{\text{thH}}(t_5)$  не належить до цієї експоненти.

Визначаємо різницю між значеннями  $Z'_{\text{thH}}(t_k)$  (табл. 5) та значеннями експоненти з визначеними параметрами ( $R_1, \tau_1$ ) за формулою (10):

$$Z'_{\text{thH}2}(t_k) = Z'_{\text{thH}}(t_k) - R_1 \exp(-t_k / \tau_1);$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH}2}(t_1) &= Z'_{\text{thH}}(t_1) - R_1 \exp(-t_1 / \tau_1) = \\ &= 0,0935 - 0,0421 \cdot \exp(-2 / 456,4) = \\ &= 0,051584 \text{ К/Вт;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH}2}(t_2) &= Z'_{\text{thH}}(t_2) - R_1 \exp(-t_2 / \tau_1) = \\ &= 0,0888 - 0,0421 \cdot \exp(-4 / 456,4) = \\ &= 0,04707 \text{ К/Вт;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH}2}(t_3) &= Z'_{\text{thH}}(t_3) - R_1 \exp(-t_3 / \tau_1) = \\ &= 0,0814 - 0,0421 \cdot \exp(-10 / 456,4) = \\ &= 0,0402 \text{ К/Вт;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH}2}(t_4) &= Z'_{\text{thH}}(t_4) - R_1 \exp(-t_4 / \tau_1) = \\ &= 0,0605 - 0,0421 \cdot \exp(-40 / 456,4) = \\ &= 0,02193 \text{ К/Вт;} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH}2}(t_5) &= Z'_{\text{thH}}(t_5) - R_1 \exp(-t_5 / \tau_1) = \\ &= 0,049 - 0,0421 \cdot \exp(-100 / 456,4) = \\ &= 0,01518 \text{ К/Вт.} \end{aligned}$$

Визначаємо параметри другої експоненти, до якої належать точки ( $k = 5$ ) та ( $k = 4$ ):

Тобто, за першу точку відліку приймаємо точку ( $k = 5$ ), яка має такі координати:  $t_5 = 100$  с;  $Z'_{\text{thH}2}(t_5) = 0,01518$  К/Вт. Другою точкою цієї апроксимації є точка ( $k = 4$ ), яка має такі координати:  $t_4 = 40$  с;  $Z'_{\text{thH}2}(t_4) = 0,02193$  К/Вт.

Котангенс кута нахилу прямої, що з'єднує точки 5 – 4, до лінії 7 – 6 визначаємо за формулою (4):

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg}\psi_2 = \tau_2 &= \frac{t_5 - t_4}{\ln Z'_{\text{thH}2}(t_4) - \ln Z'_{\text{thH}2}(t_5)} = \\ &= \frac{100 - 40}{\ln 0,02193 - \ln 0,01518} = 163,1. \end{aligned}$$

Логарифм ординати точки перетину лінії 5 – 4 з віссю ординат визначаємо за формулою (5):

$$\begin{aligned} \ln R_2 &= \ln Z'_{\text{thH}2}(t_5) + t_5 / \tau_2 = \\ &= \ln 0,01518 + (100 / 163,1) = \\ &= -4,1877765 + 0,613121 = -3,5746555. \end{aligned}$$

Значення ординати точки перетину лінії 5 – 4 з віссю ординат визначаємо потенціюванням  $\ln R_2$  за формулою (6):

$$R_2 = \exp(\ln R_2) = \exp(-3,5746555) = 0,0280 \text{ К/Вт.}$$

Далі перевіряємо, чи належить наступна точка ( $k = 3$ ) лінії 5 – 4.

Логарифм ординати для моменту часу  $t_3 = 10$  с при  $\tau_2 = 163,1$  визначаємо за формулою (7):

$$\begin{aligned} \ln Z''_{\text{thH}2}(t_3) &= \ln Z'_{\text{thH}2}(t_4) + (t_4 - t_3) / \tau_2 = \\ &= \ln 0,02193 + (40 - 10) / 163,1 = \\ &= -3,8198997 + 0,183994 = -3,635963. \end{aligned}$$

Значення ординати для моменту часу  $t_3 = 10$  с при  $\tau_2 = 163,1$  визначаємо потенціюванням  $\ln Z''_{\text{thH2}}(t_3)$  за формулою (8):

$$\begin{aligned} Z''_{\text{thH2}}(t_3) &= \exp(\ln Z''_{\text{thH2}}(t_3)) = \\ &= \exp(-3,635963) = 0,02636 \text{ К/Вт}. \end{aligned}$$

Визначаємо відносну різницю значення  $Z''_{\text{thH2}}(t_3)$  та значення  $Z'_{\text{thH2}}(t_3)$  за формулою (9):

$$\begin{aligned} \delta'' &= \left( \frac{Z'_{\text{thH2}}(t_3) - Z''_{\text{thH2}}(t_3)}{Z'_{\text{thH2}}(t_3)} \right) \cdot 100\% = \\ &= [(0,0402 - 0,02636) / 0,0402] \cdot 100\% = \\ &= 34,4\% > \delta = 0,5\%. \end{aligned}$$

Це означає, що точка  $Z'_{\text{thH2}}(t_3)$  не належить до другої експоненти, а належить до третьої експоненти.

Визначаємо різницю між значеннями  $Z'_{\text{thH2}}(t_k)$  та значеннями експоненти з визначеними параметрами ( $R_2, \tau_2$ ) за формулою (10):

$$Z'_{\text{thH3}}(t_k) = Z'_{\text{thH2}}(t_k) - R_2 \exp(-t_k/\tau_2);$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH3}}(t_1) &= Z'_{\text{thH2}}(t_1) - R_2 \exp(-t_1/\tau_2) = \\ &= 0,051584 - 0,028 \cdot \exp(-2/163,1) = \\ &= 0,02393 \text{ К/Вт}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH3}}(t_2) &= Z'_{\text{thH2}}(t_2) - R_2 \exp(-t_2/\tau_2) = \\ &= 0,04707 - 0,028 \cdot \exp(-4/163,1) = \\ &= 0,01975 \text{ К/Вт}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH3}}(t_3) &= Z'_{\text{thH2}}(t_3) - R_2 \exp(-t_3/\tau_2) = \\ &= 0,0402 - 0,028 \cdot \exp(-10/163,1) = \\ &= 0,01386 \text{ К/Вт}. \end{aligned}$$

Визначаємо параметри третьої експоненти, до якої належать точки ( $k = 3$ ) та ( $k = 2$ ).

Тобто, за першу точку відліку приймаємо точку ( $k = 3$ ), яка має такі координати:  $t_3 = 10$  с;  $Z'_{\text{thH3}}(t_3) = 0,01386$  К/Вт. Другою точкою цієї апроксимації є точка ( $k = 2$ ), яка має такі координати:  $t_2 = 4$  с;  $Z'_{\text{thH3}}(t_2) = 0,01975$  К/Вт.

Котангенс кута нахилу прямої, що з'єднує точки 3 – 2, до лінії 5 – 4 визначаємо за формулою (4):

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \psi_3 &= \tau_3 = \frac{t_3 - t_2}{\ln Z'_{\text{thH3}}(t_2) - \ln Z'_{\text{thH3}}(t_3)} = \\ &= \frac{10 - 4}{\ln 0,01975 - \ln 0,01386} = 16,942. \end{aligned}$$

Логарифм ординати точки перетину лінії 3 – 2 з віссю ординат визначаємо за формулою (5):

$$\begin{aligned} \ln R_3 &= \ln Z'_{\text{thH3}}(t_3) + t_3/\tau_3 = \\ &= \ln 0,01386 + (10/16,942) = \\ &= -4,2787483 + 0,59025 = -3,6884983. \end{aligned}$$

Значення ординати точки перетину лінії 3 – 2 з віссю ординат визначаємо потенціюванням  $\ln R_3$  за формулою (6):

$$R_3 = \exp(\ln R_3) = \exp(-3,6884983) = 0,025 \text{ К/Вт}.$$

Далі перевіряємо, чи належить наступна точка ( $k = 1$ ) до лінії 3 – 2.

Логарифм ординати для моменту часу  $t_1 = 2$  с при  $\tau_3 = 16,942$  визначаємо за формулою (7):

$$\begin{aligned} \ln Z''_{\text{thH3}}(t_1) &= \ln Z'_{\text{thH3}}(t_2) + (t_2 - t_1)/\tau_3 = \\ &= \ln 0,01975 + (4 - 2)/16,942 = -3,80655. \end{aligned}$$

Значення ординати для моменту часу  $t_1 = 2$  с при  $\tau_3 = 16,942$  визначаємо потенціюванням  $\ln Z''_{\text{thH3}}(t_1)$  за формулою (8):

$$\begin{aligned} Z''_{\text{thH3}}(t_1) &= \exp(\ln Z''_{\text{thH3}}(t_1)) = \\ &= \exp(-3,80655) = 0,02222 \text{ К/Вт}. \end{aligned}$$

Визначаємо відносну різницю значення  $Z''_{\text{thH3}}(t_1)$  та значення  $Z'_{\text{thH3}}(t_1)$  за формулою (9):

$$\begin{aligned} \delta'' &= \left( \frac{Z'_{\text{thH3}}(t_1) - Z''_{\text{thH3}}(t_1)}{Z'_{\text{thH3}}(t_1)} \right) \cdot 100\% = \\ &= [(0,02393 - 0,02222) / 0,02393] \cdot 100\% = \\ &= 7,1\% > \delta = 0,5\%. \end{aligned}$$

Це означає, що точка  $Z'_{\text{thH3}}(t_1)$  не належить до третьої експоненти, а належить до четвертої експоненти.

Визначаємо різницю між значенням  $Z'_{\text{thH3}}(t_1)$  та значенням експоненти з визначеними параметрами ( $R_3, \tau_3$ ) за формулою (11):

$$Z'_{\text{thH4}}(t_1) = Z'_{\text{thH3}}(t_1) - R_3 \exp(-t_1/\tau_3);$$

$$\begin{aligned} Z'_{\text{thH4}}(t_1) &= Z'_{\text{thH3}}(t_1) - R_3 \exp(-t_1/\tau_3) = \\ &= 0,02393 - 0,025 \cdot \exp(-2/16,942) = \\ &= 0,001714 \text{ К/Вт}. \end{aligned}$$

Визначаємо параметри четвертої експоненти, до якої належить точка ( $k = 1$ ). Оскільки це остання точка, приймаємо її за точку відліку, а за другу точку апроксимації приймаємо значення  $R_4$  (значення ординати вище лінії 3 – 2 при  $t_0 = 0$ ), яке визначається за формулою (12):

$$\begin{aligned} R_4 &= R_{\text{thH}} - (R_1 + R_2 + R_3) = \\ &= 0,0975 - (0,0421 + 0,028 + 0,025) = \\ &= 0,0024 \text{ К/Вт}. \end{aligned}$$

Котангенс кута нахилу лінії 1 – 0 (прямої, що з'єднує точку ( $k = 1$ ) та значення  $\ln R_4$ ) до лінії 3 – 2 визначаємо за формулою (13):

$$\begin{aligned} \operatorname{ctg} \psi_4 &= \tau_4 = \frac{t_1 - 0}{\ln R_4 - \ln Z'_{\text{thH4}}(t_1)} = \\ &= \frac{2 - 0}{\ln 0,0024 - \ln 0,001714} = 5,941. \end{aligned}$$

Результатом виконаних розрахунків є параметри чотирьох експонент ( $n = 4$ ), що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с, які наведені у табл. 6.

**Таблиця 6.** Результати виконаних розрахунків

$i$	1	2	3	4
$R_i$ , К/Вт	0,0421	0,028	0,025	0,0024
$\tau_i$ , с	456,4	163,1	16,9	5,94

Визначимо похибки апроксимації перехідного теплового опору охолоджувача типу О253 при швидкості охолоджуючого повітря 6 м/с згідно з формулами (14), (15), (16) та наведемо їх у табл. 7.

**Таблиця 7.** Результати розрахунків похибок апроксимації

$t_k$ , с	$Z_{\text{thH}}(t_k)$ , К/Вт	$Z_{\text{th Po3}}(t_k)$ , К/Вт	Абсолютна похибка, К/Вт	Відносна похибка, %
2	0,004	0,004	0	0
4	0,0087	0,0075	-0,0012	-13,8
10	0,0161	0,0157	-0,0004	-2,48
40	0,037	0,0347	-0,0023	-6,2
100	0,0485	0,0484	-0,0001	-0,2
400	0,08	0,0776	-0,0024	-3
1000	0,0928	0,0927	-0,0001	-0,1
2000	0,0975	0,0975	0	0

Значні похибки апроксимації можна пояснити недостатньою точністю відліку значень з рис. 3. Для зменшення похибок апроксимації необхідно скорегувати початкові дані у відповідності до табл. 7 та повторити розрахунок.

**Таблиця 8.** Результати розрахунків параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача О253

Природна конвекція охолоджуючого повітря при потужності розсіювання 220 Вт					
$i$	1	2	3	4	5
$R_i$ , К/Вт	0,2328	0,05165	0,0491	0,0187	0,00275
$\tau_i$ , с	1248,4	1326,4	356,5	13,55	21
Швидкість охолоджуючого повітря 3 м/с					
$i$	1	2	3	4	
$R_i$ , К/Вт	0,0635	0,05216	0,0219	0,00244	
$\tau_i$ , с	865,6	178,6	16,17	6	
Швидкість охолоджуючого повітря 6 м/с					
$i$	1	2	3	4	
$R_i$ , К/Вт	0,0421	0,028	0,025	0,0024	
$\tau_i$ , с	456,4	163,1	16,9	5,94	
Швидкість охолоджуючого повітря 12 м/с					
$i$	1	2	3	4	
$R_i$ , К/Вт	0,0345	0,0195	0,0286	0,0024	
$\tau_i$ , с	496,6	212,4	18,17	5,8	

Результати розрахунків параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір охолоджувача О253 для режимів охолодження, представлених його виробником (рис. 3), наведені в табл. 8.

## ВИСНОВОК

Запропонований алгоритм виконання розрахунків для визначення параметрів експонент, що апроксимують перехідний тепловий опір, дозволяє включити охолоджувач в комп’ютерну систему розрахунку температури напівпровідникової структури приладів, що працюють в режимі змінного навантаження.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Охладители воздушного охлаждения для приборов таблеточного исполнения [Электронный ресурс] : параметры охладителей / ОАО Электровыпрямитель. – Электрон. дані (1 файл). – Саранск : Электровыпрямитель, 2007. – Режим доступу: [http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/ohladiteli/vozd\\_tabl.php](http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/ohladiteli/vozd_tabl.php) (вільний). – Назва з екрана.
2. Давидов, П. Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов / Павел Давидович Давидов. – М. : Энергия, 1967. – 144 с.
3. Охладители воздушного охлаждения для приборов таблеточного исполнения типов О343, О253, О353 [Электронный ресурс] : размеры, параметры и характеристики охладителей / ОАО Электровыпрямитель. – Электрон. дані (1 файл). – Саранск : Электровыпрямитель, 2007. – Режим доступу: <http://www.elvpr.ru/poluprovodnikprib/ohladiteli/O343%20O253%20O353.pdf> (вільний). – Назва з екрана.

Надійшла 08.11.2010

Остренко В. С.

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПОНЕНТ, КОТОРЫЕ АППРОКСИМИРУЮТ ПЕРЕХОДНОЕ ТЕПЛОВОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ОХЛАДИТЕЛЯ

Предложен алгоритм определения параметров экспонент, аппроксимирующих график зависимости переходного теплового сопротивления охладителя во времени. Это дает возможность включить охладитель в систему расчета температуры полупроводниковой структуры силовых полупроводниковых приборов.

**Ключевые слова:** полупроводниковый прибор, охладитель, температура полупроводниковой структуры, тепловое сопротивление, параметры экспонент, режимы охлаждения.

Ostrenko V. S.

ALGORITHM FOR DETERMINATION OF EXPONENTS PARAMETERS WHICH APPROXIMATE HEAT SINK TRANSIENT HEAT RESISTANCE

The algorithm is proposed for determination of exponents parameters which approximate heat sink transient heat resistance as a function of time. It permits to include the heat sink into the system for calculation of power semiconductor structure temperature.

**Key words:** semiconductor device, heat sink, semiconductor structure temperature, heat resistance, exponents parameters, cooling modes.

УДК 681.32

Тімовський А. К.<sup>1</sup>, Голдобін О. О.<sup>2</sup><sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету<sup>2</sup>Асистент Запорізького національного технічного університету

## ФУНКЦІОНАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ САР ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМИ МАЕС-П

Показано можливість використання програм аналізу електронних схем для функціонально-го моделювання систем автоматичного регулювання.

**Ключові слова:** функціональне моделювання, МАЕС-П, система автоматичного регулювання, еквівалентна електрична схема.

### ВСТУП

Необхідно відзначити, що об'єкти різної фізичної природи описуються системами звичайних диференційних рівнянь (ЗДР). Це механічні, гідралічні, теплові системи. Існує аналогія між цими системами, наприклад, аналогами електричної напруги є тиск, температура, швидкість; електричного струму – сили і потоки рідини, газу, теплоти. Існують і аналоги закону Кірхгофа I і II. Це свідчить про те, що інструментарій аналізу електричних схем може бути з успіхом застосований для аналізу систем іншої фізичної природи, особливо на функціональному рівні [1, 2].

Характерним прикладом задач, для функціонального моделювання яких з успіхом можна використовувати програму МАЕС-П [3], є дослідження поведінки систем автоматичного регулювання (САР) або АСУТП, функціональні схеми яких складаються з типових функціональних блоків: диференційних, інтегруючих, нелінійних, підсумовуючих і т. д.

Очевидно, що перетворення функціональних блоків об'єкта регулювання в еквівалентну електричну схему принципових труднощів не викликає. Труднощі виникають при створенні відповідної моделі регулятора. Як правило, регулятор – це складна програма, що реалізує закони управління і регулювання. І бажано, щоб ця програма без змін входила до його моделі на тій мові програмування, на якій написана, тому що відпрацювання цієї програми і є однією із задач моделювання САР.

Тому метою цієї роботи є теоретичне відпрацювання і практична демонстрація можливості використання програми схемотехнічного моделювання МАЕС-П для функціонального моделювання САР за рахунок розробки моделі регулятора у вигляді відповідної нелінійної функції.

### МОДЕЛІ ТИПОВИХ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ БЛОКІВ САР

Будь який блок (ланку) САР у МАЕС-П можна представити моделлю у вигляді відповідного набору керованих джерел струму, опорів і ємностей, які показують залежність між вихідними і вхідними сигналами цих блоків.

Розглянемо побудову електричних моделей функціональних блоків на прикладі аперіодичного блока.

$$\text{Рівняння блока: } y = \frac{k}{Tp + 1} \cdot x.$$

Модель аперіодичного блока у вигляді еквівалентної електричної схеми наведена на рис. 1.

Джерело струму вищезгадованої схеми  $J_x$  відображає вхідний сигнал  $x$  з масштабом  $M_x = J_x/x$ , а напруга на ємності  $C$  – вихідний сигнал  $y$  з масштабом  $M_y = J_y/y$ .

Рівняння цього кола:  $U_y = \frac{R}{RCp + 1} \cdot J_x$ . Підставимо  $U_y = M_y \cdot y$ ,  $J_x = M_x \cdot x$  в рівняння моделі і отримаємо  $y = \frac{M_x}{M_y} \cdot \frac{R}{RCp + 1} \cdot x$ .

Із порівняння цього рівняння з рівнянням аперіодичного блока очевидно, що при  $M_x = M_y = 1$   $R = k$ ,  $R \cdot C = T$ , а  $C = T/R$ . Значення вхідних і вихідних сигналів моделі і блока будуть одинаковими.

Аналогічно розраховуються параметри моделей і інших функціональних блоків, наведених в табл. 1.

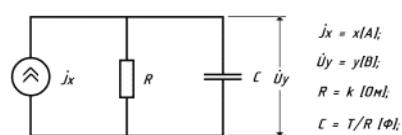
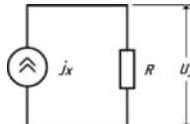
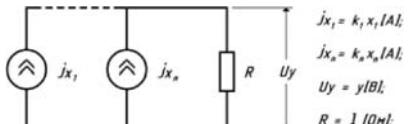
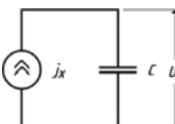
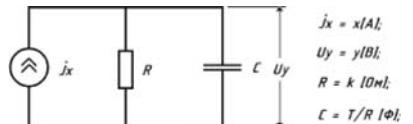
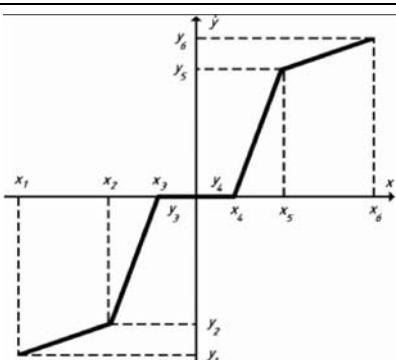
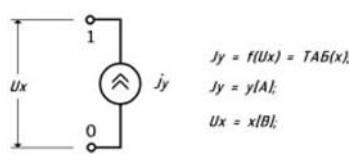


Рис. 1. Еквівалентна електрична схема аперіодичного блока

Таблиця 1. Еквівалентні електричні схеми типових блоків САР

Тип блока	Рівняння блока	Еквівалентна електрична схема
Підсилювач	$y(t) = k \cdot x(t)$	 $\begin{aligned} jx &= x/A_i; \\ Uy &= y/B_i; \\ R &= k [0\Omega]; \end{aligned}$
Суматор	$y(t) = k_1 \cdot x_1(t) + \dots + k_n \cdot x_n(t)$	 $\begin{aligned} jx_1 &= k_1 x_1 / A_i; \\ jx_s &= k_s x_s / A_i; \\ Uy &= y / B_i; \\ R &= 1 [0\Omega]; \end{aligned}$
Інтегратор	$T \frac{dy(t)}{dt} = x(t); y(t) = \int_0^t \frac{1}{T} x(t) dt; y = \frac{1}{P T} x$	
Аперіодичний	$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \cdot X(t);$ $y = \frac{k}{Tp + 1} x$	 $\begin{aligned} jx &= x/A_i; \\ Uy &= y/B_i; \\ R &= k [0\Omega]; \\ C &= T/R [0\Phi]; \end{aligned}$
Нелінійний		 $\begin{aligned} jy &= f(Ux) = TAB(x); \\ jy &= y/A_i; \\ Ux &= x/B_i; \end{aligned}$ <p>ЭЛЕМЕНТЫ: JY,0-1 = F3(0,0, ТАБХ#U1); ТАБХ: ТАБХ = x1, y1, x2, y2, x3, y3, x4, y4, x5, y5, x6, y6;</p>

## ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ РЕАЛЬНОЇ САР

Розглянемо функціональну модель типової САР на прикладі САР палива парового котла АСУ ТП ТЕЦ (рис. 2).

Ця САР підтримує тиск пари в барабані котла та в магістралі на заданому рівні, регулюючи подачу палива. Вона складається з виконавчого органа, об'єкта регулювання (барабана котла та магістралі), датчиків тиску пари в барабані і в магістралі; аналого-цифрових перетворювачів АЦП і регулятора, де  $UP$  – подача палива;  $PR$  – ознака вмикання/вимикання двигуна ( $PR = 1$  – включення двигуна на збільшення подачі палива,  $PR = -1$  – на зменшення подачі палива,  $PR = 0$  – двигун виключений);  $P_b$ ,  $P_h$ ,  $P_m$  – тиск пари в барабані, відбір пари споживачем, тиск пари в магістралі,  $I_{pb}$ ,  $I_{pm}$  – струм датчика тиску пари в барабані, струм датчика тиску пари в магістралі;  $\Delta$  – ціна одного розряду АЦП;  $P_b^u$ ,  $P_m^u$  – коди поточного і заданого тиску пари в барабані;  $P_m^u$ ,  $P_{m3}^u$  – коди по-

точного і заданого тиску пари в магістралі;  $PR = f(P_b^u, P_m^u)$  – функція регулятора.

Перетворимо функціональну схему САР відповідно до табл. 1 в її еквівалентну електричну схему (рис. 3), яка може бути описана вхідною мовою будь-якої з програм моделювання електронних схем, зокрема вхідною мовою програми МАЕС-П.

Виконавчим органом є клапан подачі палива з електроприводом. Робоча характеристика виконавчого органа відповідає інтегрующему блоку з обмеженням. Рівняння виконавчого органа в еквівалентній електричній схемі САР (рис. 3) моделює інтегруючий блок в складі джерела  $J1$  і ємності  $C1$ , де  $J1 = f(E2, E3)$  – джерело струму, що моделює функцію регулятора. Напруга  $UC1$  відображає подачу палива  $UP$ . Обмеження напруги на ємності  $C1$ , що відображає обмеження подачі палива, може бути реалізоване за допомогою іншого джерела струму  $Jk = f(UC1)$ , яке включено паралельно до джерела  $J1$  і компенсує його дію при досягненні обмеження.

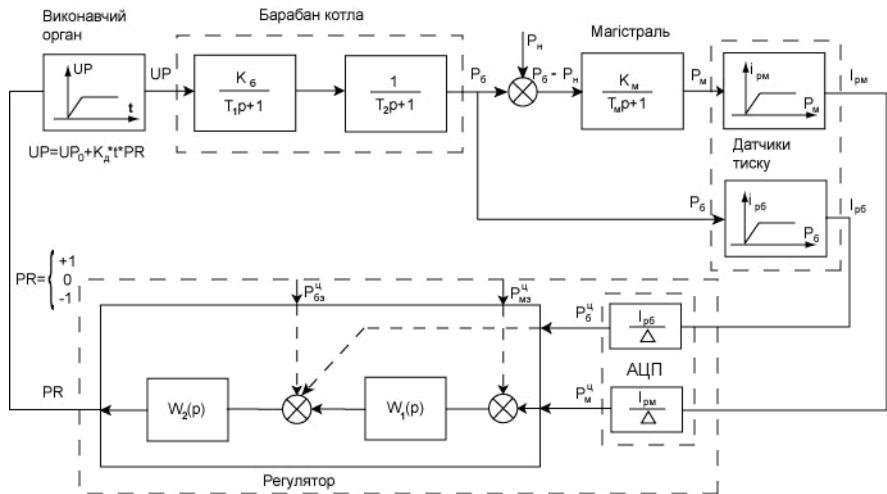


Рис. 2. Функціональна схема САР палива

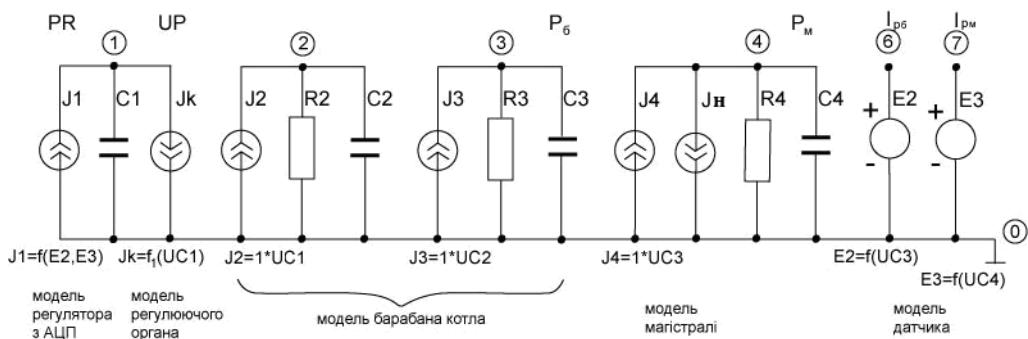


Рис. 3. Еквівалентна електрична схема функціональної моделі САР

Модель барабана котла – це два аперіодичні блоки. На рис. 3 вони відображені елементами  $J2, R2, C2$  і  $J3, R3, C3$ , де джерело струму  $J2 = 1 \cdot UC1$  повторює вхідний сигнал  $UP$ , джерело струму  $J3=1 \cdot UC2$  повторює величину  $UC2$ , а напруга  $UC3$  відображає тиск пари  $P_b$  в барабані.

Модель магістралі – це аперіодичний блок, у якого вхідний сигнал має дві складові: сигнал  $P_b$  та навантаження  $P_h$ . Навантаження  $P_h$  (зміна тиску пари за рахунок відбору пари споживачами) задається табличею  $P_h=f(t)$ . На еквівалентній схемі САР (рис. 3) це відповідні джерела струму  $J4 = 1 \cdot UC3$  і  $J_h$ , а також конденсатор  $C4$ , напруга на якому відображає тиск пари  $P_m$  в магістралі.

Моделі датчиків тиску  $P_b$  і  $P_m$  – це підсилюючі блоки з обмеженнями, які на рис. 3 зображені джерелами напруги  $E2 = f(UC3)$  і  $E3 = f(UC4)$ , що відображають відповідні характеристики датчиків тиску  $I_{pb}=f(P_b)$ ,  $I_{pm}=f(P_m)$ .

Модель регулятора представлена на рис. 3 нелінійним джерелом струму  $J1 = f(E2, E3)$ , що описується спеціальною нелінійною функцією, в яку входять програма контролера ( $PR = f(P_b^u, P_m^u)$ ) і моделі АЦП, що перетворюють аналогові сигнали  $P_b$  та  $P_m$  в цифрову форму для контролера-регулятора.

## МОДЕЛЬ РЕГУЛЯТОРА

Програма МАЕС-П має спеціальний механізм введення нових нелінійних функцій самим користувачем, чого не мають інші аналогічні програми. Це дозволяє ввести програму регулятора як нелінійну функцію в МАЕС-П. Якщо контролер регулятора сумісний з IBM PC, то його програма переноситься в нелінійну функцію без змін.

Програма МАЕС-П написана мовою FORTRAN-77 і, якщо програма контролера написана іншою мовою, наприклад С, то нелінійна функція повинна складатися з оболонки, яка написана на FORTRAN-77, для об'єднання програми МАЕС-П з програмою контролера на мові С без змін у вигляді підпрограми.

В оболонці реалізовано також модель аналого-цифрового перетворювача (АЦП), алгоритм циклічної видачі управлюючих імпульсів з заданим робочим тактом і узгодження з ним змінного кроку інтегрування, особливо в разі його відкидання при незбіжності ітерацій Ньютона. Цю нелінійну функцію F59 розроблено відповідно до правил розробки нових нелінійних функцій для програми МАЕС-П.

Блок-схема алгоритму нелінійної функції регулятора з АЦП наведена на рис. 4.

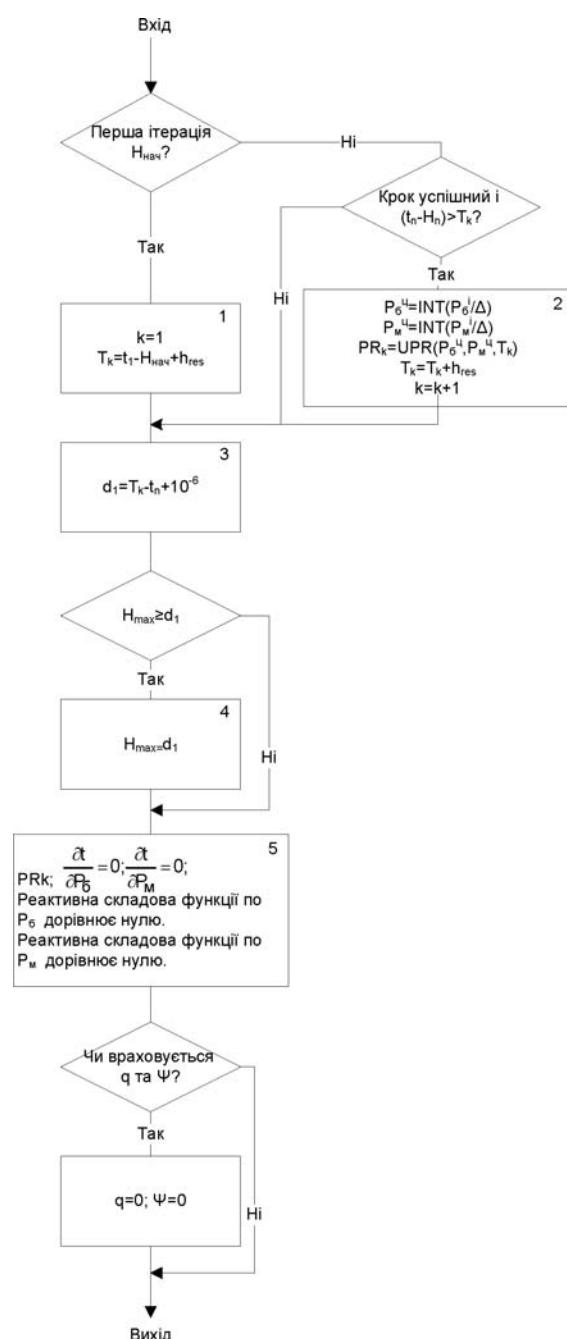


Рис. 4. Блок-схема алгоритму нелінійної функції регулятора з АЦП

На вхід нелінійної функції як аргументи надходять напруги джерел  $E_2$  і  $E_3$ , що відповідають показанням датчиків тиску  $I_{\text{pb}} = f(P_6)$  і  $I_{\text{pm}} = f(P_m)$ . В оболонці нелінійної функції вони перетворюються з аналогових величин в цифрові  $P_6^u$ ,  $P_m^u$  і надходять до підпрограми регулятора  $UPR$  ( $P_6^u$ ,  $P_m^u$ ,  $h_{\text{res}}$ ), де порівнюються з заданими значеннями і формується управлюючий сигнал  $PR$ . Глобальними змінними є  $t_n$  – поточний час інтегрування,  $h_n$  – поточний крок інтегрування, параметри  $h_{\text{res}}$  – крок управління,  $T_k = k \cdot h_{\text{res}}$  – кінцевий час  $k$ -го кроку управління.

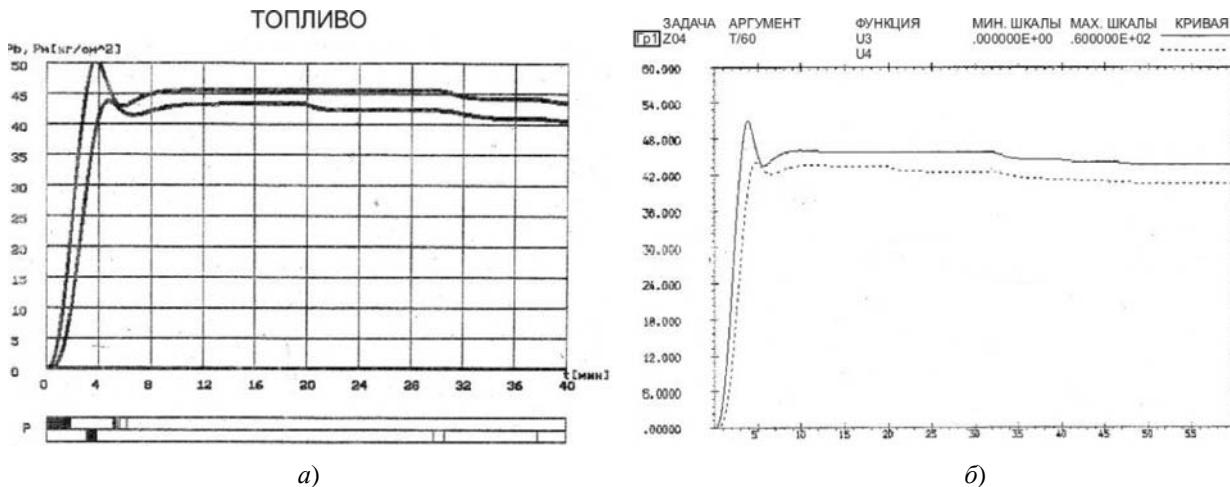
Виходом функції є значення всіх складових нелінійної функції, які беруть участь у формуванні матриці провідностей і правої частини: повне і безреактивне значення функції і частинні похідні вихідної змінної (реактивні і безреактивні) по кожному з аргументів функції. Ale оскільки виходом функції є імпульсний сигнал без будь-яких затримок, то всі ці складові дорівнюють нулю, за винятком, безумовно, значення самої функції, яке виробляє підпрограма регулятора  $UPR$ .

Якщо розрахунок тільки починається, тобто виконується перша ітерація початкового кроку інтегрування  $h_n = h_{\text{нач}}$ ,  $t_n = t_{\text{нач}}$ , то, щоб розрахувати кінцевий час першого кроку управління  $T_1$ , необхідно повернутися в точку  $t = 0$ , тобто  $T_1 = (t_n - h_{\text{нач}}) + h_{\text{res}}$ .

На цьому кроці управління блок 2 з моделями АЦП і підпрограмою регулятора не підключається, тому що  $PR = 0$  (початкове значення), процес інтегрування йде з кроком  $h_n$ , що автоматично вибирається і обмежується блоком 4 до значення  $d_1$ , що дорівнює відрізку часу від точки  $t = t_n$  до точки  $t = T_1$ , для того, щоб останній успішний крок інтегрування попав в точку  $t = T_1 + D$  ( $D = 0,000001$  для гарантії, що точку  $T_1$  пройдено).

На наступних кроцях управління, якщо останній був успішним на  $k$ -му кроці управління, крок інтегрування  $h_{n-1}$  попав в точку  $t = T_k + 0,000001$  і вибрано новий крок  $h_n$ , тобто  $t_{n-1} + h_n > T_k$ , то в точці  $t = t_n - h_n = T_k + 0,000001$  підключається блок 2 з моделями АЦП і підпрограмою регулятора, який виробляє черговий імпульс управління  $PR_k$  і встановлює черговий крок управління, кінцевий час якого  $T_k = T_k + h_{\text{res}}$ .

Вихідний імпульс  $PR$  залишається незмінним на протязі всього кроку управління, поки процес інтегрування не дійде кінця цього кроку, і тоді знову підключається підпрограма регулятора і формується новий управлюючий імпульс, і так далі.



**Рис. 5.** Переходний процес встановлення тиску в барабані котла  $P_6$  та в магістралі  $P_m$ :  
а – копія екрана спеціалізованої програми АСУТП; б – результати функціонального моделювання

## РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

Авторами було проведено моделювання переходного процесу встановлення тиску пари в котлі реальної САР палива в АСУТП Коровинецького цукрового заводу на спеціалізованій програмі функціонального моделювання САР (рис. 5, а) і на програмі МАЕС-П (рис. 5, б).

Результати моделювання повністю співпадають.

## ВИСНОВКИ

В статті наведені електричні схеми моделей типових функціональних блоків регулювання і розроблена еквівалентна електронна схема функціональної моделі реальної САР. Показана особливість настроювання і керування роботою регулятора у складі функціональної моделі САР. Наведений приклад доказує адекватність такого підходу до функціонального моделювання.

Набір даних, що був отриманий під час роботи спеціальної програми САР палива, характеризує переходний процес встановлення тиску в барабані котла. Ці дані співпадають з результатами, які дає сеанс функціонального моделювання за допомогою програми МАЕС-П.

Період часу функціонального моделювання значно менший за час спрацьовування регулятора реальної АСУТП. Це підтверджує практичну цінність виконаної роботи. Випереджаючий характер функціонального моделювання може значно спростити процес прийняття рішення з попереднім передбаченням наслідків.

Таким чином, показано можливість використання програми МАЕС-П для функціонального моделювання САР. Це дозволяє при наявності програми схемотехнічного моделювання відмовитись від придбання спеціалізованої програми функціонального моделювання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Норенков, И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем / И. П. Норенков. – М. : Высш. школа, 1986. – 304 с.
- Петренко, А. И. Автоматизация схемотехнического проектирования в машиностроении / Петренко А. И., Ладогубец В. В., Чкалов В. В. – Киев : УМК ВО, 1988. – 180 с.
- Піза, Д. М. Моделювання радіоелектронних пристрій : навчальний посібник / Піза Д. М., Тімовський А. К., Лугін А. І. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2003. – 258 с.

Надійшла 13.05.2010  
Після доробки 19.11.2010

Тимовский А. К., Голдобин А. А.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САР С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ МАЕС-П

Показана возможность использования программ анализа электронных схем для функционального моделирования систем автоматического регулирования.

**Ключевые слова:** функциональное моделирование, МАЕС-П, система автоматического регулирования, эквивалентная электрическая схема.

Timovsky A. K., Goldobin A. A.

FUNCTIONAL MODELING OF ACS USING THE MAEC-P PROGRAM

Functional modeling of automatic control systems using the programs of electronic circuits analysis.

**Key words:** functional modeling, MAEC-П, automatic control system, equivalent electric circuit.

# МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 004.056.53

Коломыцев М. В.<sup>1</sup>, Носок С. А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»

#### УЯЗВИМОСТИ ПРИЛОЖЕНИЙ К НЕКОРРЕКТНЫМ ВХОДНЫМ ДАННЫМ

В данной статье рассматриваются различного рода уязвимости, присущие приложениям без достаточного контроля входных данных. Приводятся характерные признаки таких уязвимостей и даются рекомендации по их устранению.

**Ключевые слова:** уязвимость, приложения, корректные данные, некорректные данные.

#### ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных причин уязвимостей программного обеспечения является неполная проверка входных данных либо ее полное отсутствие. Входные данные могут поступать от пользователей, из хранилища данных, сетевых сокетов и других источников. Любые данные, поступающие в приложение извне, перед их использованием должны проверяться для определения их корректности. Под корректностью данных в этом случае понимается их соответствие требованиям приложения – к формату, диапазону допустимых значений и т. п.

В процессе контроля приложение должно проверять, относятся ли данные к заведомо корректным, и отвергать их, если убедится, что это не так. Нельзя строить контроль входных данных на проверке того, относятся ли полученные данные к заведомо некорректным или потенциально опасным, поскольку атакующий может использовать различные приемы для того, чтобы обойти процедуру такой про-

верки. Он может по-иному представить фрагменты входных данных, либо использовать структуры данных, отсутствующие в образцах потенциально опасных.

Тот факт, что обрабатываться будут только заведомо корректные данные, может означать, что часть поступившей корректной информации будет отвергнута, как не прошедшая проверку, однако только так можно существенно снизить вероятность обработки некорректных данных.

Таким образом, разработчик обязан заложить в приложение проверку всех поступивших данных, как пользовательского ввода, так и данных, поступивших из других источников.

Анализу уязвимостей приложений вообще и рассматриваемого класса уязвимостей в частности посвящено много работ и информационных источников [1, 2].

Рассмотрим основные виды уязвимостей и способы их устранения.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Безопасность приложения предполагает, что данные, обрабатываемые, передаваемые и хранимые с помощью приложения, защищены от неавторизованного доступа. Угроза неавторизованного доступа возникает, если в приложении присутствуют определенные уязвимости. В данной статье ставится задача определения перечня уязвимостей приложений, обусловленных недостаточно полной проверкой данных, поступивших в приложение извне. Определяются характерные признаки, свидетельствующие о наличии таких уязвимостей, и предлагаются меры, направленные на их устранение.

## ВНЕДРЕНИЕ КОДА В SQL ЗАПРОСЫ (SQL INJECTION)

Данная уязвимость позволяет модифицировать запросы к базе данных, с тем, чтобы получить несанкционированный доступ к данным. Данная уязвимость эксплуатируется через недостаточную проверку входных данных.

Следующие особенности кода приложения свидетельствуют о потенциальной возможности SQL injection:

- вводимые пользователем данные без проверки используются для построения запросов или как параметры хранимых процедур;
- при построении запросов используется конкатенация строк;
- при построении запросов используется замена строк;
- для выполнения запроса используется функция exec (в случае использования СУБД Microsoft SQL Server).

Основным методом обнаружения данной уязвимости является анализ (ревизия) исходных текстов программного обеспечения. Принципиально важно, чтобы все приложения, работающие с базами данных, были проанализированы на предмет наличия данной уязвимости.

Чтобы минимизировать вероятность возникновения данной уязвимости, следует придерживаться следующих правил:

- для проверки текстов программ использовать инструментальные средства анализа, обладающие низкой вероятностью ошибок 2-го рода для SQL injection (т. е. низкой вероятностью пропуска уязвимости в исходных кодах приложения). Существует широкий набор инструментальных средств для анализа исходного кода [3]. Например, Ounce Labs, Parasoft's Jtest & C++test, Klocwork Insight, Fortify Source Code

Analyzer (SCA), GrammaTech CodeSonar, Coverity Prevent;

- проверять все данные, введенные пользователем, разрешая только заранее известные корректные данные;
- использовать параметризованные запросы;
- не использовать конкатенацию или замену строк при построении кода запроса в тексте приложения;
- не использовать учетную запись администратора для подключения к БД;
- для доступа к данным использовать представления, непосредственный доступ к таблицам должен быть запрещен;
- для выполнения динамически созданного запроса использовать команду sp\_executesql вместо exec (для СУБД Microsoft SQL Server);
- для проверки параметров хранимых процедур использовать функцию quotename (для СУБД Microsoft SQL Server).

## УЯЗВИМОСТЬ ЦЕЛОЧИСЛЕННОГО ПЕРЕПОЛНЕНИЯ

Уязвимость целочисленного переполнения возникает как результат некорректных операций над данными целого типа [4]. Последствия целочисленного переполнения могут быть самыми разными – от некорректного результата до краха приложения. Данная уязвимость может быть использована для изменения значения критически важных данных – изменения размера буфера, значения индекса массива. При этом возникает возможность переполнения буфера. К возникновению данной уязвимости могут привести следующие операции:

- совместное оперирование знаковыми и беззнаковыми целыми (например, сравнение знакового целого и беззнакового);
- усечение целых (например, усечение 32-битового целого до 16-битового);
- потеря значимости и переполнение (например, в результате суммирования двух целых может быть получено число большее, чем максимально возможное для целого типа данных).

Следующие особенности кода приложения свидетельствуют о потенциальной возможности уязвимости:

- смешивание знаковых и беззнаковых целых в операциях вычисления и сравнения;
- смешивание данных различных типов в операциях вычисления и сравнения;
- сравнение переменных и литералов;
- отсутствие проверки входных данных;
- использование результата вычисления без его проверки.

Основним методом обнаружения данной уязвимости является ревизия исходных текстов программного обеспечения. Важно, чтобы все случаи динамически выделяемой памяти и индексных массивов, использующих целочисленную арифметику, были проанализированы на предмет корректности. В процессе такой проверки необходимо тестировать следующие ситуации:

- ввод отрицательных значений при запросе на ввод целых чисел;
- ввод целых, соответствующих граничным значениям хранения данных в одном байте, двух байтах и т. д. – т. е. чисел 0, 7, 8, 254, 255, 16353, 16354;
- ввод очень длинных строк (более 64 К);
- ввод строк, длина которых равна типичным граничным значениям (32К, 32К-1, 64К-1, 64К);
- ввод случайных, непредусмотренных или неверных данных – так называемый Fuzz testing. Fuzz testing – это техника тестирования, состоящая в подаче на вход приложения случайных и направленно сформированных наборов данных с целью генерации ошибок в приложении или его аварийного завершения. Процентный показатель сбоев и крахов приложения является показателем уязвимости.

Чтобы минимизировать вероятность возникновения данной уязвимости, следует придерживаться следующих правил:

- для проверки текстов программ использовать инструментальные средства анализа, обладающие низкой вероятностью ошибок 2-го рода для уязвимостей данного типа;
- везде, где возможно, использовать беззнаковые целые;
- при выделении памяти использовать только беззнаковые целые;
- при построении индексированных массивов использовать только беззнаковые целые;
- проверять введенные пользователем числовые данные, разрешая только заведомо корректные данные;
- при компиляции приложения устанавливать максимально подробный уровень сообщений компилятора.

## УЯЗВИМОСТИ СТРОК ФОРМАТИРОВАНИЯ (FORMAT STRING)

Наличие данной уязвимости позволяет передать в качестве входного параметра функции ввода/вывода специальным образом сконструированную строку, что позволяет атакующему получить информацию об управлении приложением и даже изменить ход выполнения приложения [4]. Многие функции ввода/вывода позволяют нужным образом отформатировать

строку, переданную им в качестве входного параметра. Это означает, что входные параметры функции могут содержать специальные символы, определяющие формат преобразования. Специальным образом подобранные символы форматирования позволяют прочесть содержимое областей памяти, организовать переполнение буфера. В худшем случае эксплуатация уязвимости позволяет атакующему выполнить произвольный код в системе. Первопричиной такой уязвимости является недостаточная проверка входных данных.

Основным методом обнаружения уязвимости строк форматирования является анализ исходных текстов программ. Следует очень осторожно использовать такой спецификатор форматирования, как %р (указатель) и избегать спецификатора %n (количество символов, записанных по адресу, указанному в качестве второго аргумента).

При тестировании приложения следует вставлять спецификаторы форматирования во вводимые данные во всех точках ввода строковых данных и анализировать полученный результат. Количество и вид спецификаторов существенно варьируется в зависимости от используемого языка программирования. При тестировании, кроме спецификаторов, определенных в используемом языке, следует обязательно проверять спецификаторы, определенные в языках C/C++.

Чтобы минимизировать вероятность появления данной уязвимости, необходимо придерживаться следующих правил:

- для проверки текстов программ использовать инструментальные средства анализа, обладающие низкой вероятностью ошибок 2-го рода для уязвимостей данного типа;
- проверять все полученные извне данные перед обработкой, разрешая только заведомо корректные данные;
- функции форматирования строк, используемые в приложении, должны быть доступны только привилегированным пользователям;
- если исходный код приложения написан на языке C++, нужно использовать операторы управления потоком (stream operators) вместо функций семейства printf;
- если используется компилятор GCC, необходимо устанавливать режимы -Wformat, -Wformat-security для обнаружения ошибок использования функций форматирования строк;
- предпочтение следует отдавать компилятору Microsoft Visual C++ 2005 или более позднему для обнаружения ошибок использования функций форматирования строк в процессе выполнения.

## УЯЗВИМОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ КОМАНД (COMMAND INJECTION)

При эксплуатации данной уязвимости в приложение могут быть переданы данные, приводящие к тому, что у атакующего появляется возможность манипулировать командной оболочкой (shell) операционной системы. В результате могут быть выполнены команды с административными полномочиями.

Потенциально, уязвимость возникает, если в приложении используются команды порождения процессов, параметры которых не проверяются должным образом. Список таких команд для разных языков программирования приведен в табл. 1.

**Таблица 1.** Команды порождения процессов для разных языков программирования

Язык программирования	Потенциально опасные функции
C/C++	system (), popen (), execlp (), execvp (), ShellExecute (), ShellExecuteEx (), _wsystem ()
Perl	system, exec, ` , open,  , eval, /e
Python	exec, eval, os.system, os.popen, execfile, input, compile
Java	Class.forName (), Class.newInstance (), Runtime.exec ()

В дополнение к ревизии исходных текстов программ необходимо провести тестирование приложения на предмет обнаружения уязвимости внедрения команд. В процессе тестирования необходимо:

- идентифицировать все интерпретаторы и компиляторы, используемые для создания и функционирования приложения;
- идентифицировать все потенциально опасные символьные последовательности, которые могут изменить характер действий интерпретатора;
- сформировать входные данные, содержащие такие потенциально опасные наборы символов и проанализировать видимые последствия обработки таких данных.

## УЯЗВИМОСТЬ К МЕЖСАЙТОВОМУ СКРИПТИНГУ (CROSS SITE SCRIPTING – XSS)

Уязвимость XSS возникает, когда входные данные, получаемые Web-сервером от одного клиента, могут быть пересланы другому клиентскому браузеру через Web страницу [5]. Эти данные могут содержать

программный код, например на JavaScript, который будет выполнен браузером клиента. Поскольку система безопасности клиента считает, что код получен от Web-сервера, то злоумышленный код может получить доступ к данным, доступ к которым имеет Web-сервер (например, файлам cookie), либо изменить Web страницу, манипулируя ссылками на ней и т. п. Эксплуатируя данную уязвимость, атакующий может получить доступ к персональным данным пользователя либо перенаправить пользователя на нужный атакующему сайт.

Если пользовательский ввод возвращается в браузер, то приложение потенциально уязвимо для XSS атак.

В дополнение к ревизии исходных текстов программ необходимо провести тестирование приложения на предмет обнаружения уязвимости к XSS атакам. В процессе тестирования необходимо:

- выполнять запрос к приложению, помещая в пользовательский ввод заведомо неправильные данные;
- проанализировать ответный HTML код с целью обнаружения в нем отправленных данных. Причем необходимо учитывать, что отправленные данные могут быть возвращены не сразу, а в ответ на последующие запросы.

Для минимизации вероятности возникновения XSS уязвимости следует:

- для проверки текстов программ использовать инструментальные средства анализа, обладающие низкой вероятностью ошибок 2-го рода для уязвимостей данного типа;
- контролировать все входные данные, разрешая только заведомо правильные данные;
- если во входных данных необходимо использовать специальные символы HTML-кода, необходимо удалять все HTML-теги, кроме разрешенных;
- устанавливать для Web страниц определенную кодовую страницу, чтобы избежать ввода непредусмотренных данных.

## УЯЗВИМОСТЬ К ПЕРЕПОЛНЕНИЮ БУФЕРА (BUFFER OVERFLOW)

Данная уязвимость возникает, если существует возможность записи в буфер информации больше, чем позволяет область памяти, выделенная под буфер. Существует несколько вариантов переполнения буфера [4], все они потенциально опасны для приложения и могут привести к аварийному завершению приложения либо к выполнению злоумышленного

кода в атакуемой системе. Если приложение выполняется от имени привилегированной учетной записи, такой как system или root, последствия для атакуемой системы могут быть катастрофическими. Эксплуатация данной уязвимости в основном осуществляется при недостаточной проверке входных данных.

Следующие особенности приложения могут свидетельствовать о наличии уязвимости переполнения буфера:

- входные данные не проверяются перед тем, как будут скопированы в буфер;
- некорректное использование небезопасных функций;
- некорректное определение необходимых размеров буфера;
- некорректное вычисление размера индексных массивов.

Основным методом обнаружения уязвимости является анализ исходных текстов программ и fuzz testing. Чтобы минимизировать вероятность возникновения данной уязвимости, следует придерживаться следующих правил:

- для проверки текстов программ использовать инструментальные средства анализа, обладающие низкой вероятностью ошибок 2-го рода для уязвимостей данного типа;
- проверять все полученные извне данные перед обработкой, разрешая только заведомо корректные данные;
- не использовать заведомо небезопасные функции (такие как strcpy, strcat, lstrcat, sprintf, fprintf и другие), заменяя их безопасными;
- тщательно проверить все алгоритмы вычисления размера буфера;
- при компиляции использовать опции компилятора для контроля переполнения буфера. Например, в компиляторе Visual C++ 2005 Service Pack 1 и более поздних следует использовать опции /GS, /SAFESEH, /NXCOMPAT и /DYNAMICBASE. В компиляторе gcc 4.1.2-25 и более поздних используйте опцию -stack-protector.

## ВЫВОДЫ

Широкое распространение распределенных информационных систем, Internet-технологий существенно увеличило множество точек доступа к при-

ложению и, как следствие, расширило возможности злоумышленников атаковать информационные системы. Большинство таких атак становится возможным в силу наличия уязвимостей в приложениях, обрабатывающих данные из внешних источников. К сожалению, традиционные методы защиты периметра (firewalls, email filters и пр.) не способны полностью решить задачу защиты от внешних атак. Разработчики приложений должны знать характерные признаки уязвимостей и уметь таким образом строить код приложения, чтобы исключить возможность атак, эксплуатирующих такие уязвимости. В статье рассматриваются популярные виды уязвимостей, описываются их признаки и даются рекомендации по устранению уязвимостей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. National Vulnerability Database [Электронный ресурс] / National Institute of Standards and Technology. – Режим доступа: <http://nvd.nist.gov/>, свободный. – Загл. с экрана.
2. List of Common Vulnerabilities and Exposures [Электронный ресурс] / The MITRE Corporation. – Режим доступа: <http://cve.mitre.org/>, свободный. – Загл. с экрана.
3. Поиск уязвимостей в программах с помощью анализаторов кода [Электронный ресурс] / Елена Харитонова. – Режим доступа: <http://www.codenet.ru/progr/other/code-analysers.php>, свободный. – Загл. с экрана.
4. Thompson, H. H. The Software Vulnerability Guide (Programming Series) / Herbert H. Thompson, Scott G. Chase. – Pontypridd, UK, United Kingdom : Charles River Media, 2005. – 354 р.
5. Хогланд, Г. Взлом программного обеспечения: анализ и использование кода / Грег Хогланд, Гари Мак-Гроу. – М. : Вильямс, 2005. – 389 с. : ил.

Надійшла 4.11.2010

Коломицев М. В., Носок С. О.

ВРАЗЛИВОСТІ ДО ДАДАТКІВ ДО НЕКОРЕКТНИХ ВХІДНИХ ДАНИХ

У даній статті розглядаються різного роду вразливості, властиві додаткам без достатнього контролю вхідних даних. Наводяться характерні ознаки таких вразливостей і даються рекомендації з їхнього усунення.

**Ключові слова:** вразливість, додатки, коректні дані, некоректні дані.

Kolomytsev M., Nosok S.

APPLICATIONS VULNERABILITIES CAUSED BY INCORRECT INPUT DATA

Different kinds of vulnerabilities typical for applications without sufficient input data control are discussed in this article. Typical characteristics of such vulnerabilities are given and elimination recommendations are proposed.

**Key words:** vulnerability, applications, correct data, incorrect data.

УДК 519.816

Колпакова Т. А.

*Магістр Запорізького національного техніческого університета*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЕТЕНТНОСТИ ЭКСПЕРТОВ ПРИ ПРИНЯТИИ ГРУППОВЫХ РЕШЕНИЙ

Рассматривается проблема учета компетентности экспертов при принятии групповых решений. Предложен метод расчета коэффициента доверия к мнению эксперта при проведении опроса с помощью метода анализа иерархий.

**Ключевые слова:** экспертная комиссия, принятие групповых решений, метод анализа иерархий, компетентность эксперта.

### ВВЕДЕНИЕ

Для повышения степени объективности и качества процедуры принятия решений целесообразно учитывать мнения нескольких экспертов. С этой целью проводится групповая экспертиза, в процессе которой каждый из участников может иметь свое видение решения поставленной задачи или оценку возникшей проблемы [1].

Непосредственно для получения оценок экспертов могут использоваться различные опросы [2]. Одним из способов выявить предпочтения и представить их в количественном виде является метод анализа иерархий (МАИ).

Метод анализа иерархий [3] предполагает декомпозицию проблемы на все более простые составляющие части и обработку суждений лица, принимающего решение. В результате определяется относительная значимость исследуемых альтернатив для всех критериев, находящихся в иерархии.

Относительная значимость выражается численно в виде векторов приоритетов. Полученные таким образом значения векторов являются оценками в шкале отношений и соответствуют так называемым жестким оценкам.

После того как получены оценки от каждого эксперта, их необходимо агрегировать и рассчитать суммарную оценку, которая и будет считаться окончательной.

Поскольку компетентность экспертов в проблеме экспертизы может иметь разную степень, то следует считать мнение более компетентных экспертов более значимым [4]. Для этого используется коэффициент доверия к мнению эксперта.

Коэффициент доверия – это число, которое означает вероятность или степень уверенности, с которой

можно считать эксперта компетентным в решаемой проблеме.

### 1. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ДОВЕРИЯ К МНЕНИЮ ЭКСПЕРТА

Сравнение элементов иерархии осуществляется методом попарных сравнений, сущность которого состоит в том, что путем сравнения каждого объекта со всеми другими из данного множества определяются элементы матрицы  $A$  размерности  $n \times n$ , где элемент  $a_{ij}$  есть соответствующее действительное число, которое определяет результат сравнения объекта  $i$  с объектом  $j$  относительно некоторого общего критерия.

Этап сравнения следует проводить для всех уровней иерархии. В результате будут сформированы матрицы попарных сравнений (МПС) критериев одного уровня иерархии между собой и альтернатив относительно критериев.

Главным недостатком МАИ является то, что процесс заполнения МПС довольно длительный. При наличии  $m$  критериев и  $n$  альтернатив общее количество сравнений  $S$ , которое необходимо выполнить, составляет

$$S = m \cdot (m + n^2). \quad (1)$$

Для сокращения количества сравнений следует учесть особенности МПС. Все элементы матрицы  $A$  положительны:  $a_{ij} > 0$  для всех  $i, j = 1, \dots, n$ , диагональные элементы  $a_{ii}$  должны быть равны единице, так как они выражают оценку критерия относительно самих себя. Поскольку элементы матрицы  $A$  являются обратносимметричными  $a_{ij} = 1/a_{ji}$  для всех  $i, j = 1, \dots, n$ , то эксперт может заполнить только часть матрицы, находящуюся над главной диагональю, а остальная часть значений будет рассчитана математически.

Исходя из этих особенностей, матрица сравнений имеет вид

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & 1/a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/a_{n1} & 1/a_{n2} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Количество сравнений составляет

$$S = \frac{m}{2} \cdot (n^2 - n + m - 1). \quad (3)$$

Для вычисления коэффициента доверия к оценке эксперта предложено добавить в последовательность попарных сравнений серию «контрольных» вопросов. Введение дополнительных вопросов увеличит количество сравнений, которое станет равным

$$S = \frac{m}{2} \cdot (n^2 - n + m + 1). \quad (4)$$

Поскольку при создании МПС часть под главной диагональю рассчитывается как обратная части, заполненной экспертом, то возможно проверить, совпадает ли мнение эксперта при сравнении случайной пары альтернатив с мнением, высказанным им при заполнении матрицы.

Для каждой  $k$ -й МПС выбирается случайная пара альтернатив  $j$  и  $i$  из части матрицы, расположенной под главной диагональю, и предлагается эксперту для сравнения.

Если значения  $a_{ij}$  и  $a_{ji}$  одновременно либо больше, либо меньше 1, то коэффициент доверия для данного вопроса  $v_k = 0$ , в противном случае коэффициент доверия для данного вопроса следует рассчитывать по формуле (5).

Пусть  $a_{ij} > 1$ , а  $a_{ji} < 1$ , тогда

$$v_k = 1 - \frac{|a_{ij} - 1/a_{ji}|}{\max(a_{ij}, 1/a_{ji})}. \quad (5)$$

Суммарный коэффициент доверия  $v_s$  к мнению  $s$ -го эксперта вычисляется как

$$v_s = \frac{\sum_{k=1}^m v_k}{m}. \quad (6)$$

Если после прохождения опроса значение  $v_s$  осталось равным 1, значит, мнению эксперта можно доверять, а если  $v_s = 0$ , то эксперт некомпетентен в данной проблеме и его мнение не следует учитывать при расчете общей оценки.

Предлагаемая процедура имеет следующий вид:

Шаг 1. Формируется МПС критериев размерностью  $m \times m$ . Часть над главной диагональю запол-

няет эксперт, часть под главной диагональю рассчитывается как обратная ей.

Шаг 2. Формируются МПС альтернатив по критериям. Шаги 2.1–2.2 повторяются для каждого критерия.

Шаг 2.1. Заполняется МПС альтернатив по текущему критерию размерностью  $n \times n$ . Часть над главной диагональю заполняет эксперт, часть под главной диагональю рассчитывается как обратная ей.

Шаг 2.2. Выбирается случайная пара альтернатив  $x$  и  $y$  из части матрицы, расположенной под главной диагональю, и предлагается эксперту для сравнения. На основе сделанной оценки рассчитывается коэффициент доверия  $v_k$  для данного вопроса.

Когда все  $m$  критериев рассмотрены, следует перейти к шагу 3.

Шаг 3. Рассчитывается суммарный коэффициент доверия  $v_s$ .

Шаг 4. Вычисляются локальные векторы приоритетов  $W$  для каждой МПС.

Шаг 5. Определяется вектор глобальных приоритетов  $GW$ .

Результатом выполнения этих шагов являются вектор глобальных приоритетов  $GW$  и коэффициент доверия к мнению эксперта  $v_s$ .

## 2. ВЫЧИСЛЕНИЕ СУММАРНОЙ ОЦЕНКИ С УЧЕТОМ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДОВЕРИЯ К МНЕНИЮ ЭКСПЕРТОВ

На этапе опроса экспертов для каждого эксперта были получены вектор глобальных приоритетов  $GW$  и коэффициент доверия к мнению эксперта  $v_s$ .

Расчет суммарной оценки  $Sum$  каждой  $i$ -й альтернативы включает суммирование оценок  $W_i^s$ , присвоенных ей каждым из  $S$  экспертов. При этом оценки следует умножать на коэффициент доверия к мнению эксперта:

$$Sum_i = \sum_{s=1}^S v_s \cdot W_i^s. \quad (7)$$

Таким образом, чем больше коэффициент доверия  $v_k$ , тем большее влияние имеет  $k$ -й эксперт на общую оценку.

После суммирования вычисляется доля  $D$  каждой  $i$ -й альтернативы в общей сумме оценок, причем  $\sum_{i=1}^n D_i = 1$ :

$$D_i = \frac{Sum_i}{\sum_{j=1}^n Sum_j}. \quad (8)$$

Альтернативы упорядочиваются по убыванию  $D_i$ . Лучшей считается альтернатива, чья доля является наибольшей.

### 3. ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦІЕНТА ДОВЕРИЯ НА СУММАРНУЮ ОЦЕНКУ ТЕНДЕРНОЇ КОМИССІЇ

Использование метода продемонстрировано на примере работы экспертной комиссии при проведении тендера.

Тендер – конкурентная форма размещения заказов на выполнение работ по заранее объявленным в документации условиям, в оговоренные сроки на принципах состязательности, справедливости и эффективности. Контракт заключается с победителем тендера – участником, подавшим предложение, соответствующее требованиям документации, в котором предложены наилучшие условия.

Для организации и проведения процедур закупок образуется тендерный комитет на принципах коллегиальности в принятии решений, отсутствия конфликта интересов членов тендерного комитета и их беспристрастности.

В данном примере экспертам было выдано техническое задание к тендеру, включающее пожелания заказчика, и предложения от четырех потенциальных подрядчиков:

- АО «Металлист СМК»;
- Атлас Ворд (Германия);
- IBT (Саудовская Аравия);

– Borga Hale.

Каждый участник комиссии прошел опрос с помощью специального программного обеспечения [5].

Результаты проведения тендера приведены на рис. 1. Каждому эксперту соответствует коэффициент доверия, рассчитанный согласно ответам на контрольные вопросы. На рис. 2 приведены подробные результаты опроса одного из экспертов и сводные матрицы сравнений с глобальными векторами приоритетов.

Как видно из результатов, мнения экспертов относительно победителя не совпадают, и конечный результат определяется оценками экспертов и коэффициентом доверия к мнению каждого эксперта.

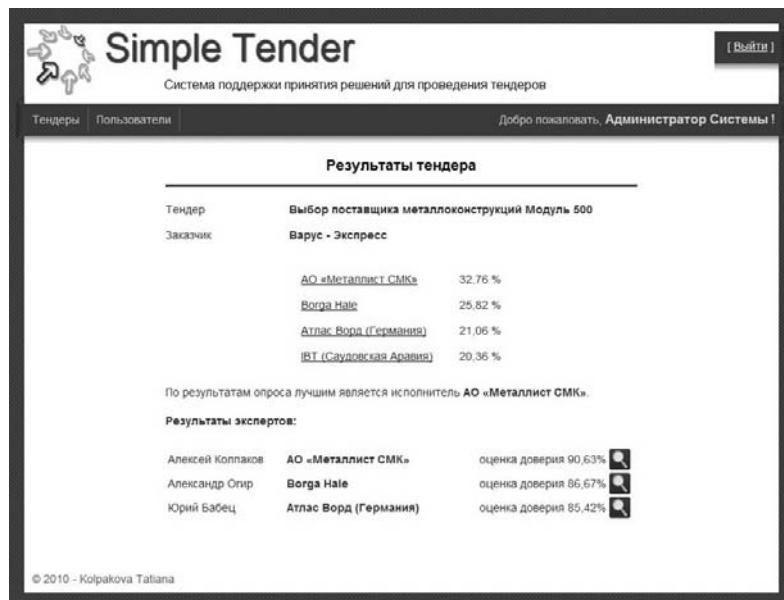
Без учета коэффициента доверия рейтинг участников имеет вид:

- |                           |          |
|---------------------------|----------|
| – АО «Металлист СМК»      | 32,10 %; |
| – Borga Hale              | 25,39 %; |
| – IBT (Саудовская Аравия) | 21,73 %; |
| – Атлас Ворд (Германия)   | 20,78 %. |

С учетом коэффициентов доверия рейтинг участников имеет вид:

- |                           |          |
|---------------------------|----------|
| – АО «Металлист СМК»      | 32,76 %; |
| – Borga Hale              | 25,82 %; |
| – Атлас Ворд (Германия)   | 21,06 %; |
| – IBT (Саудовская Аравия) | 20,36 %. |

Чем сильнее разница в коэффициентах доверия к мнению экспертов, тем большее влияние они будут иметь на конечный результат тендера.



**Рис. 1.** Результаты проведения тендера

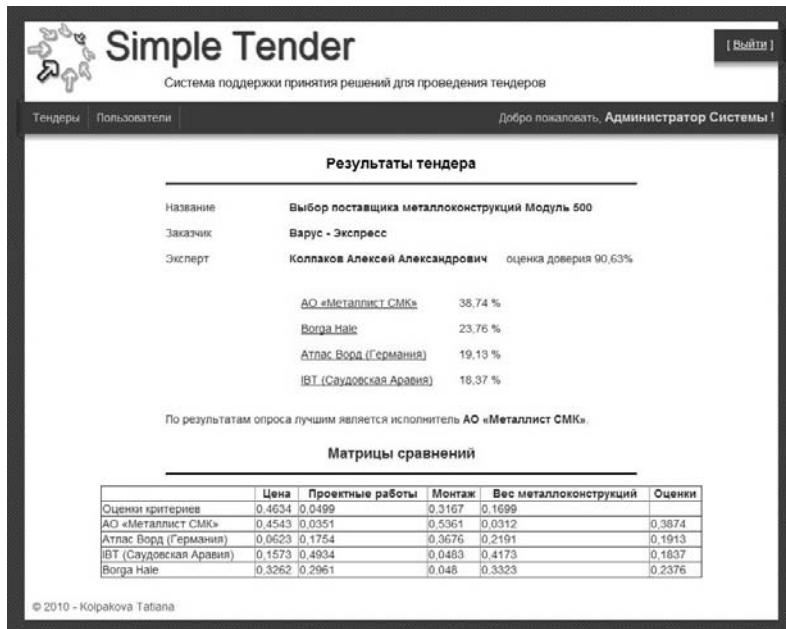


Рис. 2. Результаты опроса эксперта

## ВЫВОДЫ

Преимущества разработанного метода:

– в отличие от способов определения «веса» мнения эксперта на основе документационного метода либо методов взаимооценки экспертов [6, 7], данный метод позволяет получить количественное значение коэффициента доверия к мнению эксперта непосредственно в процессе проведения опроса;

– количество сравнений, которые необходимо выполнить для заполнения всех МПС, значительно меньше при использовании расчета части значений. К примеру, для принятия решения по тендеру средней сложности (5 критериев, 4 предложения) необходимо выполнить 105 сравнений, чтобы заполнить все матрицы. С использованием расчета значений МПС количество необходимых сравнений сократится до 40, то есть уменьшится в 2,7 раза.

Недостаток метода заключается в том, что достаточную точность коэффициента доверия к мнению эксперта возможно получить при количестве критериев  $m$  не меньше 4, но поскольку в реальных тендерах количество значимых критериев обычно больше четырех, этот недостаток можно считать незначительным.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yan, J. A model of a decision support system based on case-based reasoning for third-party logistics evaluation / Jianyuan Yan, P. E. Chaudhry, Sohail S. Chaudhry // Expert Systems. – 2003. – Vol. 20, Issue 4. – P. 196–207.
2. Литвак, Б. Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа / Б. Г. Литвак. – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.

3. Saati, T. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. – М. : Радио и связь, 1989. – 316 с.
4. Андрейчиков, А. В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
5. Колпакова, Т. А. Система поддержки принятия решений для выбора победителя строительного тендера / Т. А. Колпакова // 17-та міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика-2010» : тези доповідей. Том 2. – Харків : ХНУРЕ, 2010. – С. 170–171.
6. Кини, Р. Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р. Л. Кини, Х. Райфа. – М. : Радио и связь, 1981. – 560 с.
7. Ramezani, M. Design and implementation of a fuzzy expert decision support system for vendor selection / Maryam Ramezani, G. A. Montazer // International Conference on Enterprise Information Systems. – 2006. – Р. 243–248.

Надійшла 01.11.2010

Колпакова Т. О.

## ВІЗНАЧЕННЯ КОМПЕТЕНТНОСТІ ЕКСПЕРТІВ ПРИ ПРИЙМАННІ ГРУПОВИХ РІШЕНЬ

Розглядається проблема урахування компетентності експертів при прийнятті групових рішень. Запропоновано метод розрахунку коефіцієнта довіри до думки експерта при проведенні опитування за допомогою методу аналізу ієрархій.

**Ключові слова:** експертна комісія, прийняття групових рішень, метод аналізу ієрархій, компетентність експерта.

Kolpakova T. A.

## DETERMINATION OF EXPERTS COMPETENCE IN GROUP DECISION-MAKING

The problem of taking into account the competence of experts in group decision-making is considered. The method for calculating the coefficient of confidence in the expert's opinion in the survey using the analytic hierarchy is suggested.

**Key words:** expert committee, group decision-making, analytic hierarchy process, competence of the expert.

УДК 004.8:658

Льовкін В. М.<sup>1</sup>, Дубровін В. І.<sup>2</sup>, Оніщенко В. Ф.<sup>3</sup><sup>1</sup>Аспірант Запорізького національного технічного університету<sup>2</sup>Канд. техн. наук, професор Запорізького національного технічного університету<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорізького національного технічного університету

## ПРОГНОЗУВАННЯ ФАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЕКТУ НА СТАДІЇ ПЕРЕДПРОЕКТНОГО ПЛАНУВАННЯ

Розглянуто проблему прогнозування відхилення фактичних результатів проекту від запланованих на стадії передпроектного планування. Досліджено ефективність застосування моделей на основі нейронних мереж. Запропоновано використання нейро-еволюційного підходу для розв'язання проблеми та значення PDRI і ризику неуспішності проекту як інформативних ознак. Запропоновано критерій інформативності результатів. Представлено метод прогнозування відхилення фактичних результатів проекту від запланованих на стадії передпроектного планування.

**Ключові слова:** управління проектами, передпроектне планування, прогнозування результатів проекту, Project Definition Rating Index, ризик неуспішності проекту.

### ВСТУП

Інвестиційний проект – інвестиційна акція, що передбачає вкладання визначеного кількості ресурсів, у тому числі інтелектуальних, фінансових, матеріальних, людських, для отримання запланованого результату та досягнення встановлених цілей у визначені строки [1]. Для досягнення бажаних результатів у встановлені строки та в межах визначених витрат грошових чи інших важливих ресурсів проекти повинні досконало плануватися та якісно управлятися.

На практиці помилки у відборі проектів, аналізі ризиків та концептуальному плануванні призводять до таких наслідків: обмежені ресурси використовуються на явно неефективні операції; фінансовий, технологічний та конкурентний ризик організації збільшується до неприйнятного рівня [2]. Помилки планування та виконання проектів мають такі наслідки:

- очікуваний прибуток від комерційних контрактів обертається збитками через перевищенння початкової вартості, недотримання строків та виплати штрафів;

- затримується введення в дію основних засобів, що призводить до невиконання бізнес-цілей за лінійками продуктів, для яких передбачуються ці засоби;

- проекти за інформаційними системами виконуються з порушенням графіку та перевищеннем бюджету, що негативно впливає на управління, загальні витрати та ефективність діяльності, тощо.

Для прийняття рішення інвестор повинен мати за критерії плановані значення основних показників

проекту, представлені в документації на проект. Однак фактичні значення в результаті виконання проекту відхиляються від запланованих. Масштабні відхилення можуть привести до великих втрат або банкрутства. Тому для інвестора або підприємства, яке розглядає декілька варіантів реалізації проекту, дуже корисними для прийняття рішення є дані про прогнозовані значення ризику неуспішності проекту і відхилення розміру витрат та тривалості проекту від запланованих, отримані ще на стадії передпроектного планування, перед початком виконання проекту.

Проблема прогнозування відхилень обсягу витрат та тривалості проекту від запланованих на стадії передпроектного планування є актуальною через те, що отримані на даній стадії роботи над проектом значення відхилень, а отже і значення фактичного обсягу та тривалості реалізації, дозволяють ефективно управляти проектом на ранній стадії, не тільки зменшуючи найбільш критичні фактори, які можуть привести до відхилення, але й ефективно управляючи ресурсами. Управління проектом та ресурсами, зважаючи на отримані прогнозовані значення, дозволяє безпосередньо зменшити відхилення витрат, уникнути нарахування штрафів за невчасне виконання, простоювання чи невчасного забезпечення ресурсами, що також збільшує витрати.

Інструментарій Project Definition Rating Index (PDRI) дозволяє на єдиній основі встановити рівень завершеності визначення масштабу будівельного [3] або промислового проекту [4] перед його виконанням і допомагає передбачати фактори, які викликають ризики проекту. У роботах [5, 6] досліджується

залежність відхилення фактичних витрат та тривалості проекту від PDRI за допомогою регресійної моделі, в [7] запропоновано використання нейронних мереж для прогнозування, результати якого досліджуються порівняно з регресійною моделлю.

У попередніх роботах, де розглядалась дана проблема, авторами було досліджено ефективність застосування різних моделей на основі нейронних мереж та їх ансамблів для прогнозування успішності проектів [8], запропоновано використовувати значення PDRI та запланованих витрат проекту для прогнозування ризику неуспішності проекту, розроблено метод прогнозування ризику неуспішності проектів на стадії передпроектного планування на основі ансамблів нейронних мереж з кластеризацією.

У процесі дослідження в рамках даної роботи необхідно *розв'язати проблему підвищення ефективності прогнозування фактичних результатів проекту на стадії передпроектного планування за допомогою засобів штучного інтелекту*.

## **1. УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ВИТРАТ І ТРИВАЛОСТІ ВИКОНАННЯ ПРОЕКТУ**

З метою дослідження існуючих рішень проблеми, що розглядається, був проведений патентний пошук, у результаті якого виявлено декілька патентів, що можуть бути віднесені до даної проблеми.

Патент [9] видано на метод та систему управління проектами, що включають множинність технологічних лістингів, шаблонів робіт та зв'язків серед технологічних лістингів. За допомогою методу та системи забезпечується процес управління проектом, що охоплює побудову моделі управління проектом, яка містить сутності та зв'язки, описані текстовими та графічними даними; введення даних про управління проектом до бази даних відношень; побудову інструментарію управління проектом, що має веб-сторінки з текстовими та графічними даними, генерує гіперпосилання на веб-сторінках, ґрунтуючись на відносинах у відповідній базі даних. Також у даному патенті представлено інструментарій управління проектом, що охоплює множинність технологічних лістингів, де кожний лістинг забезпечує керівництво щодо того, як виконати діяльність; множинність шаблонів робіт, де кожний шаблон описує реакцію на ситуацію з управлінням проектом і має зв'язки у лістингах, тощо.

Систему обробки даних та метод використання даної системи для оцінки і управління ризиками запропоновано в патенті [10]. Віддається перевага втіленню методу, що включає кроки з ідентифікації множи-

ни елементів ризику, визначаючи важливість кожного виділеного елементу ризику, встановлюючи кожний підпризик, що стосується виділених елементів із множини ризиків, визначаючи одну чи більше процедур управління для кожного елементу підпризуку, встановлюючи ваги для кожної такої процедури. Винахід належить до бізнес-діяльності, а саме до апарату обробки даних та методу ідентифікації, управління та вимірювання ризиків та асоційованих управлінських процедур.

Патент [11] оформлено на винахід – систему управління ризиками проекту для обчислення того, наскільки впливає корегування технологічного плану на весь проект у той час, коли виконується управління проектом. Для визначення такого впливу запропоновано обчислювати розмір впливу корекції чи модифікації у вигляді розподілу щільності ймовірності, а інформація, в якій сформульовано метод корекції окремого процесу залежно від різноманітних факторів відхилення, називається інформацією про правило, в додаток до введення заданих обмежень, що застосовуються умовно. До складу системи управління ризиками проекту входить база даних, у яку записується визначальна інформація, що містить щонайменше одну порцію інформації, яка включає визначення часу можливого початку процесу робіт, можливого завершення та послідовності самих робіт, та база даних розподілу щільності ймовірностей, в яку записується як розподіл щільності ймовірностей щонайменше одна порція інформації, що включає величину коливань для початку процесу робіт, для закінчення робіт та строків будівництва.

У патенті [12] заявлено права на комп’ютерну систему оцінки витрат проекту будівництва, що містить в собі базу даних попередніх будівельних робіт, та засоби оцінки проекту, що включають у тому числі засоби вибору попередніх робіт, які відповідають визначенім користувачем параметрам проекту, та засоби розрахунку оцінок на основі пошуку даних про фактичний час виконання проекту в базі даних для обраних користувачем проектів і обчислення оцінок початкових витрат та тривалості оцінюваного проекту. Даний метод дозволяє вирішити проблему нестачі деталізованих знань з можливістю швидко, просто та точно отримати необхідні дані про тривалість та витрати раніше виконаних робіт, які відповідають параметрам нового проекту.

Система та метод для забезпечення оцінки витрат проекту з використанням комп’ютерної системи, що є частиною мережі, подані в патенті [13]. Винахід належить до засобів підтримки малого бізнесу, а саме до проектно-орієнтованого малого бізнесу, такого

як незалежні підрядники та субпідрядники. Модуль оцінки витрат включає оцінку матеріалів, робіт, накладних витрат тощо. Даний модуль використовує дані, доступні системі, що стосуються архітектурних планів, технічних вимог до матеріалів, вимог до робіт та робітників, для обчислення оцінки витрат, ґрунтуючись на типах та кількості матеріалів і робіт, які мають бути використані у проекті. Окрім того модуль обчислює накладні витрати, такі як фіксовані адміністративні витрати, страхування, обладнання тощо.

Метод оцінки проектних витрат представлено у патенті [14]. Витрати проекту оцінюються автоматично, використовуючи геометричні дані, отримані з плану конструкторських робіт. Протягом виконання проекту або після його завершення дані про фактичні витрати, що стосуються геометричної інформації, отримуються в електронній формі, і ці дані використовуються для оновлення комп’ютеризованого банку даних про витрати.

Винахід у патенті [15] стосується автоматизованого планування будівництва та системи оцінки витрат і програми проекту будівництва. Система оцінки витрат містить базу даних, де зберігається остання інформація про місцеві та регіональні витрати. Програма аналізує файл з вихідними даними, сформульованими користувачем, і перетворює кодові номери елементів на відповідні витрати, дані про які містяться в базі даних.

Патентний пошук дозволив встановити, що наявні розробки не дозволяють вирішити проблему управління проектами на етапі їх вибору з множини запропонованих альтернатив із можливістю не тільки обчислювати заплановані витрати та програму (тривалість) проекту, але й прогнозувати відхилення витрат та тривалості проекту від запланованих значень, виходячи з визначеності проекту на стадії передпроектного планування.

## 2. ЗАСОБИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗУВАННЯ

Традиційні методи багатовимірної оптимізації є методами локального пошуку, сильно залежать від вибору початкової точки пошуку та накладають додаткові обмеження на властивості цільової функції оптимізації [16].

Властивості нейронних мереж (НМ) у великий мірі залежать від їх архітектури. Якість розв’язання конкретної задачі може бути суттєво покращена за умов використання ансамблів НМ. В ансамбліах НМ дані паралельно обробляються декількома НМ, вихідні сигнали яких далі деяким чином комбінуються в об’єднан-

ну оцінку, що переважає за якістю результати, отримані за допомогою локальних мереж, що входять до складу ансамблю. На практиці найбільше розповсюдження отримали два підходи до об’єднання мереж в ансамблі: модульний та заснований на зваженому усередненні, і хоча змістово вони досить відрізняються один від одного, їх об’єднує те, що обидва вони використовують лінійну комбінацію вихідних сигналів своїх членів у тій чи іншій формі [17].

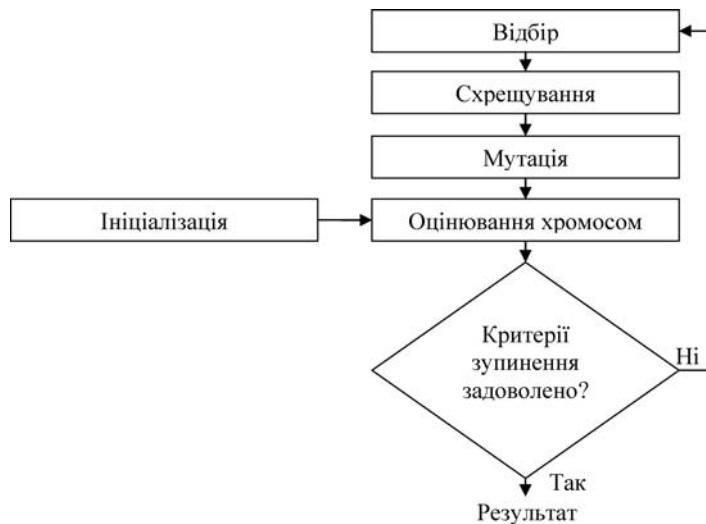
Множина алгоритмів та методів, які використовують для пошуку рішення еволюційні принципи, об’єднується під загальною назвою – еволюційні алгоритми, одним з основних видів яких є генетичний алгоритм.

З погляду штучних систем обробки інформації генетичний пошук є специфічним методом розв’язання задачі оптимізації, при цьому такий ітераційний пошук адаптується до особливостей цільової функції: нові хромосоми, що з’являються в процесі схрещування, тестиють все більш широкі області простору пошуку й переважно розташовуються в області оптимуму, а відносно рідкісні мутації перешкоджають виродженню генофонду, що рівносильне рідкісному, але безперервному пошуку оптимуму в решті областей пошукового простору [18].

Репродуктивний план Холланда [19] – канонічна модель генетичного методу. Схема роботи узагальненого генетичного методу представлена на рис. 1 [18].

Як найважливіші характеристики, що визначають властивості конкретного генетичного алгоритму, можна виділити такі:

- спосіб формування початкової популяції  $W(0)$ ;
- кількість особин у початковій популяції  $Q(0)$ , яка повинна бути достатньо великою, щоб покрити всю область можливих рішень;
- частота кросоверу, що визначає кількість хромосом у поточній популяції, що піддаються схрещуванню;
- ймовірність кросоверу для кожної з хромосом поточній популяції;
- частота мутацій, що визначається кількістю хромосом у поточній популяції, які піддаються змінам;
- частота інверсій, що визначається кількістю хромосом у поточній популяції, які піддаються циклічній перестановці генів;
- параметр зміни поколінь  $G(k)$ , що визначає частину поточної популяції  $P(k)$ , яка замінюється на кожній ітерації, при цьому  $G(k) = 1$  відповідає заміні всієї популяції у кожному поколінні;
- кількість особин у поточній популяції  $Q(k)$ ;
- стратегія селекції [18].

**Рис. 1.** Схема роботи узагальненого генетичного методу

Спільне застосування штучних НМ та еволюційних алгоритмів, так званий нейро-еволюційний підхід, дає можливість поєднати гнучкість налаштування НМ та адаптивність еволюційних алгоритмів.

### 3. ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ФАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЕКТУ

Для прогнозування фактичного обсягу витрат та тривалості проекту залежно від рівня PDRI були використані моделі на основі НМ зворотного поширення помилки (НМЗП), каскадних НМ прямого поширення сигналу та зворотного поширення помилки (КНМ), радіально-базисних НМ (РБНМ), рекурентних НМ (РНМ), узагальнених регресійних НМ (УРНМ) та НМ Елмана (НМЕ).

Для навчання досліджуваних моделей кожний раз випадковим чином із загальної вибірки в 78 проектів обирались 50 проектів, а інші проекти формували тестову вибірку. Прогнозування обсягу витрат за тривалості проекту відбувалось окремо.

Похибка результатів прогнозування оцінювалась за допомогою відносного відхилення:

$$\text{ПР} = \frac{|\text{Прогнозований результат} - \text{Фактичний результат}|}{\text{Фактичний результат}}. \quad (1)$$

Результати застосування моделей на основі НМ та регресійних моделей представлені в табл. 1.

У таблиці наведено результати прогнозування для двох прикладів тестових вибірок та середній результат усіх проведених тестувань. НМЗП з 40 нейронами на першому шарі та 10 на прихованому в першому прикладі продемонструвала найкращий результат серед НМЗП, а в другому випадку – найгірший результат,

**Таблиця 1.** Результати застосування НМ різної архітектури та регресійних моделей

Модель	Тестова вибірка 1	Тестова вибірка 2	Середній результат
Лінійна регресія	62.7020	31.3653	49.0234
Нелінійна регресія	61.6836	31.0025	48.2398
НМЗП [4 2]	74.6228	29.3755	51.2522
НМЗП [10 4]	52.4915	34.8495	43.3218
НМЗП [40 10]	52.1564	60.6491	51.2139
НМЗП [9 3]	56.4677	32.9217	47.0575
НМЗП [8 4]	54.8676	34.5618	47.5376
НМЗП [16 11]	53.5482	45.3177	44.7576
РБНМ	194.8620	32.2059	162.6385
УРНМ	47.3495	30.3659	39.9692
КНМ [4 2]	54.9039	28.3906	44.6617
КНМ [8 4]	51.3613	40.0109	46.8438
КНМ [16 11]	48.5466	43.8835	44.8284
КНМ [40 10]	36.9270	73.9839	50.4928
НМЕ [4 2]	80.5134	53.9108	71.2971
НМЕ [8 4]	79.3931	77.8812	79.1426
НМЕ [16 11]	79.1779	89.8738	83.2219
НМЕ [40 10]	80.8879	99.4334	84.1553
РНМ [4 2]	72.9384	53.8602	60.1055
РНМ [8 4]	60.0677	27.5416	48.5106
РНМ [16 11]	58.5380	29.9436	47.8124
РНМ [40 10]	58.8528	28.1331	47.5710

який перевищив результат найкращої архітектури в даному випадку більш ніж в 2 рази. Така ж тенденція залежності точності результатів прогнозування від навчальної вибірки зберігається для НМ різних архітектур. Зважаючи на дану тенденцію, середній результат застосування моделей на основі лінійної та нелінійної регресії виявився досить ефективним порівняно з моделями на основі НМ.

Результати прогнозування РБНМ та НМЕ виявилися досить неточними порівняно з результатами застосування інших підходів.

Однією з задач нейро-еволюційного підходу є еволюційне налаштування структури НМ, при цьому в хромосомі кодується архітектура мережі [20]. В такому випадку для навчання можуть використовуватись градієнтні алгоритми. Пристосованість кожної особини, яка представляє структуру мережі, оцінюється в залежності від результатів навчання. До того ж, нейро-еволюційний підхід в даному випадку дозволяє автоматизувати процес вибору архітектури НМ з можливістю розгляду нерегулярних архітектур, що може привести до отримання кращого результату.

При цьому під час пошуку найефективнішої архітектури для оцінки пристосованості конкретної особини можна проводити навчання мереж відповідної архітектури на основі стандартних методів, а для зменшення впливу випадкових факторів на оцінку структури НМ (адже результати навчання НМ чуттєві до початкових умов та значень параметрів алгоритму навчання) проводити декілька незалежних операцій навчання, а вже найкращий (або усереднений) результат використовувати як оцінку топології НМ – пристосованості особини.

На подальшому етапі, після вибору архітектури НМ для конкретного випадку, з метою розв'язання проблеми обчислення ваг зв'язків НМ вирішено було використати нейро-еволюційний підхід. В даному випадку оптимізуються ваги мереж, значення яких кодуються в хромосомах [20]. Для представлення ваг НМ був обраний дійсний спосіб кодування, тобто хромосома кожної особини була представлена вектором дійсних параметрів.

Однак, у процесі використання нейро-еволюційного підходу для пошуку ваг НМ було виявлено, що в багатьох випадках результати прогнозування НМЗП знаходились майже на одній прямій, а в деяких випадках взагалі вироджувались у пряму  $y = b$ , де  $b$  – константа (рис. 2).

Звичайно, що такі результати прогнозування, які оптимізують середнє відхилення прогнозованих значень від фактично отриманих результатів проекту, є абсолютно неінформативними для осіб, які приймають рішення щодо проекту. Перед авторами посталася задача знаходження критерію інформативності, який би дозволив, окрім відхилення значень прогнозованих результатів від фактичних, оцінити ще й інформативність отриманих даних.

Результати проекту можна розглядати у вигляді ламаної лінії (рис. 2), де абсцисі відповідає номер проекту. Відхилення фактичного результату  $i$ -го проекту відносно  $(i-1)$ -го можна обчислити таким чином:

$$B_{\phi} = P_{\phi}^i - P_{\phi}^{i-1}, \quad (2)$$

$$B_{\pi} = P_{\pi}^i - P_{\pi}^{i-1}, \quad (3)$$

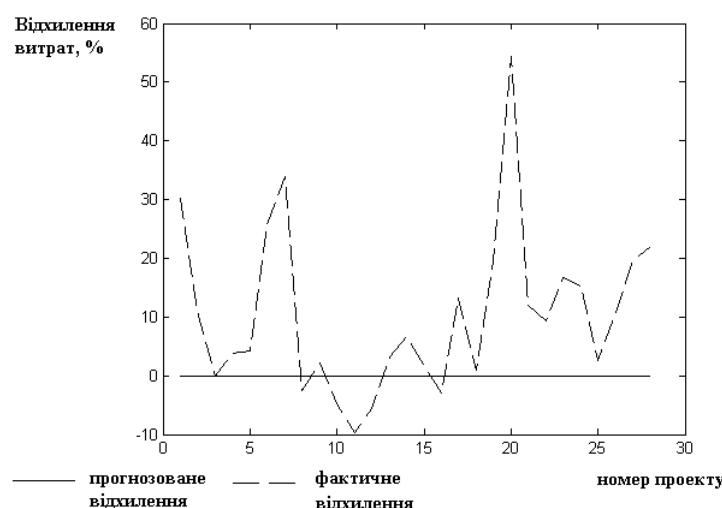


Рис. 2. Приклад прогнозування витрат проекту на основі нейро-еволюційного підходу

де  $P_{\phi}^i$  – фактичний результат  $i$ -го проекту;  $P_n^i$  – прогнозований результат  $i$ -го проекту,  $P_n^{i-1}$  – прогнозований результат  $(i-1)$ -го проекту.

Для розв'язання сформульованої проблеми запропоновано критерій інформативності, який розраховується таким чином:

$$k_{\text{інф}} = \sum_{i=2}^n k_{\text{інф}}^i, \quad (4)$$

де

$$k_{\text{інф}}^i = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \text{sign}(B_{\phi}) \neq \text{sign}(B_n); \\ \frac{B_{\phi}}{B_n}, & \text{якщо } \text{sign}(B_{\phi}) = \text{sign}(B_n) \text{ і } B_{\phi} < B_n; \\ \frac{B_n}{B_{\phi}}, & \text{якщо } \text{sign}(B_{\phi}) = \text{sign}(B_n) \text{ і } B_{\phi} \geq B_n. \end{cases} \quad (5)$$

Даний критерій дозволяє оцінити за допомогою тангенса кута нахилу те, наскільки відрізняється прогнозований результат  $i$ -го проекту відносно  $(i-1)$ -го порівняно з тим, наскільки відрізняється фактичний результат  $i$ -го проекту відносно прогнозованого результату  $(i-1)$ -го проекту. При цьому, якщо знак тангенса кута нахилу прогнозованого відхилення не відповідає тангенсу кута нахилу фактичного відхилення, то результат їх співвідношення не враховується, що дозволяє оцінити не оптимізоване значення результату, а його інформативність для особи, що приймає рішення.

#### 4. МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДХИЛЕННЯ ФАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЕКТУ ВІД ЗАПЛАНОВАНИХ НА СТАДІЇ ПЕРЕДПРОЕКТНОГО ПЛАНУВАННЯ

Грунтуючись на результатах дослідження застосування НМ та нейро-еволюційного підходу для прогнозування фактичного обсягу та тривалості проекту, запропоновано метод прогнозування відхилення фактичних результатів проекту від запланованих на стадії передпроектного планування на основі такої процедури:

Крок 1. Сформувати навчальну та тестові вибірки у вигляді  $(\{x_i^1, x_i^2\}, y_i)$ , де  $x_i^1$  – значення показника PDRI  $i$ -го проекту,  $x_i^2$  – ризик неуспішності  $i$ -го проекту (розрахований на основі методу прогнозування ризику неуспішності проектів на стадії передпроектного планування на основі ансамблів НМ з класифікацією),  $y_i$  – відхилення фактичного обсягу витрат (тривалості)  $i$ -го проекту від запланованого, %.

Крок 2. Виділити кластери на основі всіх наявних даних за допомогою карт самоорганізації Кохонена відповідно до двох параметрів: показника PDRI та ризику неуспішності проекту, сформувавши  $K$  кластерів.

Крок 3. Для кожного кластеру  $k = 1 \dots K$  виконати кроки 4–6.

Крок 4. Виділити з навчальної вибірки  $k$ -ту навчальну підвибірку, в яку входять проекти, що належать до  $k$ -го кластеру.

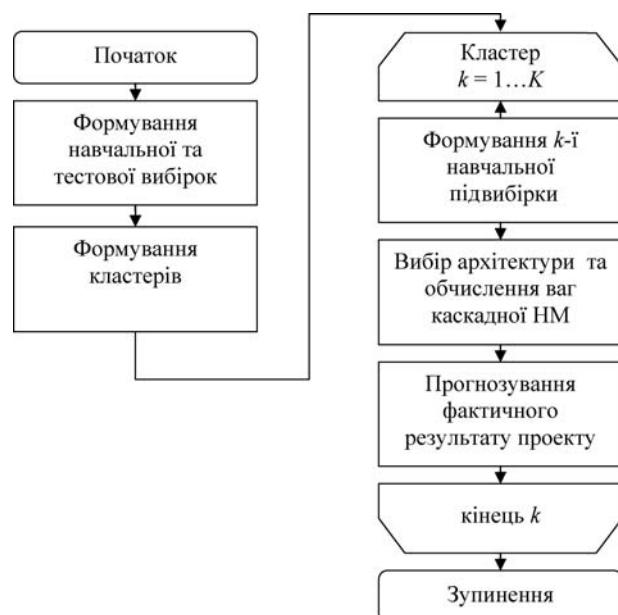
Крок 5. На основі  $k$ -ї навчальної підвибірки за допомогою генетичного алгоритму вибрати оптимальну архітектуру та обчислити ваги зв'язків каскадної НМ.

Крок 6. Використовуючи каскадну НМ, сформовану на кроці 5, для кожного проекту з тестової вибірки, що належить до кластеру  $k$ , визначити прогнозований обсяг фактичних витрат (тривалості) проекту.

Крок 7. Зупинення.

Необхідно зазначити, що крок 5 методу може бути реалізований одночасним підбором архітектури та налаштування ваг зв'язків каскадної НМ або в два кроки: обрати архітектуру за допомогою генетичного алгоритму на основі градієнтних методів навчання, а потім для обраної архітектури налаштувати за допомогою генетичного алгоритму ваги зв'язків НМ.

Схематично запропонований метод представлено на рис. 3.



**Рис. 3.** Метод прогнозування відхилення фактичних результатів проекту від запланованих на стадії передпроектного планування

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ПРОГНОЗУВАННЯ ФАКТИЧНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЕКТУ НА СТАДІЇ ПЕРЕДПРОЕКТНОГО ПЛАНУВАННЯ

У табл. 2 представлено результати застосування запропонованого методу порівняно з іншими підходами.

**Таблиця 2.** Результати прогнозування

Підхід	Відносне відхилення	Критерій інформативності
Лінійна регресія	49.0234	6.8006
Нелінійна регресія	48.2398	6.8007
УРНМ	39.9692	7.0352
Нейро-еволюційний підхід на основі НМЗП	25.6915	0.0387
Нейро-еволюційний підхід на основі КНМ	23.065	7.3268
Нейро-еволюційний підхід на основі КНМ з двома інформативними ознаками	21.2372	7.7523
Метод прогнозування відхилення фактичних результатів проекту від запланованих на стадії передпроектного планування	17.6827	8.0205

КНМ продемонстрували кращі результати порівняно з НМЗП за відносним відхиленням (формула (1)), інші моделі на основі НМ (з використанням нейро-еволюційного підходу) виявили гірші результати відносно НМЗП. Запропонований для налаштування архітектури та ваг зв'язків НМ нейро-еволюційний підхід дозволив отримати результат прогнозування, відносне відхилення якого від фактичного перевищує майже в 2 рази відповідний результат на основі звичайних НМ для НМЗП, а для КНМ більш ніж в 2 рази. При цьому результати застосування нейро-еволюційного підходу для НМЗП виявились надто низькими за критерієм інформативності, що вказує на неефективність використання НМЗП для даного підходу. КНМ дозволяють моделювати більш складні зв'язки порівняно з НМЗП через наявність зв'язків не тільки між суміжними шарами. Тому для прогнозування результатів на основі нейро-еволюційного підходу необхідно застосовувати КНМ.

Застосування двох інформативних ознак (значення показника PDRI проекту та його ризику неуспішності) дозволило ще покращити результати прогнозування. Таким чином, запропонований у роботі метод дозволив покращити результати прогнозування на основі автоматизованого налаштування архітектури, ваг зв'язків НМ, використання двох

інформативних ознак та кластерів для спеціалізації НМ більш ніж у 2,5 рази порівняно з підходами до розв'язання проблеми, що вже існують [5–7].

## ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто проблему прогнозування фактичних результатів проекту (витрат і тривалості) на стадії передпроектного планування. Досліджено ефективність застосування моделей на основі нейронних мереж різної архітектури.

Запропоновано використання нейро-еволюційного підходу для вибору архітектури та ваг зв'язків нейронної мережі для прогнозування на основі наявної навчальної вибірки. Це дозволило не тільки автоматизувати даний процес, але й досягти значного покращення середніх результатів моделей на основі НМ, а порівняно з регресійними моделями – у 2 рази. Застосування замість однієї інформативної ознаки двох (значення показника PDRI та ризику неуспішності проекту) і спеціалізації НМ за рахунок кластеризації також дозволило покращити результати.

Запропоновано критерій інформативності, на основі якого оцінено інформативність результатів прогнозування різних підходів.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що в роботі запропоновано метод прогнозування відхилення фактичних результатів проекту від запланованих на стадії передпроектного планування, який дозволив підвищити точність результатів прогнозування порівняно з існуючими підходами.

У процесі подальшого дослідження необхідно розробити програмний комплекс для управління інвестиційними проектами на стадії передпроектного планування.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Мазур, И. И. Управление проектами : учебное пособие / И. И. Мазур, В. Д. Шапиро, Н. Г. Ольдерогге ; под общ. ред. И. И. Мазура. – 5-е изд., перераб. – М. : Омега-Л., 2009. – 960 с.*
2. *Арчибалд, Р. Управление высокотехнологичными программами и проектами / Рассел Д. Арчибалд ; пер. с англ. Мамонтова Е. В. ; под ред. Баженова А. Д., Арефьева А. О. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Компания Айт, 2004. – 472 с., ил.*
3. *Cho, C.-S. Building Project Scope Definition Using Project Definition Rating Index / Chung-Suk Cho, G. Edward Gibson Jr. // Journal of Architectural Engineering. – 2001. – Vol. 7, No. 4. – Pp. 115–125.*
4. *Gibson, G. E. Project Definition Rating Index (PDRI) : Construction Industry Institute Research Report / G. E. Gibson, P. R. Dumont. – Austin : UTA, 1996. – 95 p.*
5. *Wang, Y.-R. Applying The PDRI in Project Risk Management : Ph.D. Thesis / Yu-Ren Wang. – Austin, TX, 2002. – 268 p.*
6. *Ubach de Fuentes, P.-A. Validation of the Project Definition Rating Index (PDRI) for MIT Building Projects :*

- M.S. Thesis / Pere-Andreu Ubach de Fuentes. – Massachusetts Institute of Technology, 2004. – 95 p.
7. Wang, Y.-R. A Study of Preproject Planning and Project Success Using ANN and Regression Models / Yu-Ren Wang, G. Edward Gibson Jr. // The 25<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction. – Vilnius : Gediminas Technical University, 2008. – Pp. 688–695.
8. Дубровін, В. І. Використання апарату нейронних мереж для прогнозування успішності проектів / В. І. Дубровін, В. М. Льовкін // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції (22–24 вересня 2010 р., м. Запоріжжя). – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010. – С. 163–165.
9. Pat. 7788118 United States, IPS : G06F 17/50 Project management method and system [Електронний ресурс] / Gerard Vahee, David M. Harris, Jan Heisterberg-Andersen. – Appl. No. : 09/660,852. – Assignee: International Business Machines Corporation ; published : 31.08.2010 ; filed : 13.09.2000. – Режим доступу : <http://patimg1.uspto.gov/piw?Docid=7788118>.
10. Pat. 7603283 United States, IPC : G06F 17/50 Method and system for managing risk [Електронний ресурс] / Craig Spielmann, Maria Hutter, Joel Klein, Naresh Singhani. – Appl. No. : 11/783831. – Assignee: JPMorgan Chase Bank, N.A. ; published : 13.10.2009 ; filed : 12.04.2007. – Режим доступу : <http://patimg1.uspto.gov/piw?Docid=7603283>.
11. Pat. 7318039 United States, IPC : G06F 9/44 Project risk management system utilizing probability distributions [Електронний ресурс] / Takeshi Yokota, Hisanori Nonaka, Kenji Araki et al. – Appl. No. : 10/246,690. – Assignee: Hitachi Plant Technologies, Ltd. ; published : 8.01.2008 ; filed : 19.09.2002. – Режим доступу : <http://patimg1.uspto.gov/piw?Docid=7318039>.
12. Pat. 5918219 United States, IPC : G06Q 10/00 System and method for estimating construction project costs and schedules based on historical data [Електронний ресурс] / John Philip Isherwood. – Appl. No. : 08/357417. – published : 29.06.1999 ; filed : 14.12.1994. – Режим доступу : <http://patimg1.uspto.gov/piw?Docid=5918219>.
13. Pat. WO/2001/067335, IPC : G06Q 10/00 System and method of providing project cost evaluation [Електронний ресурс] / Arvin Weiss. – Appl. No. : PCT/US2000/042339. – Applicant: FAIRFAX EXPRESS CORP. ; published : 13.09.2001 ; filed : 29.11.2000. – Режим доступу : <http://www.wipo.int/pctdb/en/index.jsp>.
14. Pat. WO/2006/034541, IPC : G06F 17/50 Method and system for estimating project costs [Електронний ресурс] / Mark Kefford, Simon Lovegrove, Jason Anderssen. – Appl. No. : PCT/AU2005/001484. – Applicants : EXACTAL PTY LTD (All Except US), Mark Kefford, Simon Lovegrove, Jason Anderssen (US Only) ; published : 06.04.2006 ; filed : 27.09.2005. – Режим доступу : <http://www.wipo.int/pctdb/en/index.jsp>.
15. Pat. WO/2001/067372, IPC : G06Q 10/00 Computer-implemented automated building design and modeling and project cost estimation and scheduling system [Електронний ресурс] / Robert Bruce Wakelam, Henry C. Beck, Bradley Paul Phillips et al. – Appl. No. : PCT/US2001/001451. – Applicants : BECK TECHNOLOGY (All Except US), Robert Bruce Wakelam, Henry C. Beck et al. (US Only) ; published : 13.09.2001 ; filed : 16.01.2001. – Режим доступу : <http://www.wipo.int/pctdb/en/index.jsp>.
16. Дубровін, В. І. Методи оптимізації та їх застосування в задачах навчання нейронних мереж : навчальний посібник / В. І. Дубровін, С. О. Субботін. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2003. – 136 с.
17. Бодянський, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко // Харків : ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 369 с. : ил.
18. Субботін, С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечітко логічних і нейромережних моделей : монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.
19. Holland, J. H. Adaptation in natural and artificial systems / J. H. Holland. – Ann Arbor : The University of Michigan Press, 1975. – 97 р.
20. Цой, Ю. Р. Эволюционный подход к настройке и обучению искусственных нейронных сетей / Ю. Р. Цой, В. Г. Спицын // Нейроинформатика. – 2006. – Том 1, № 1. – С. 34–61.

Надійшла 04.10.2010

Лёвкин В. Н., Дубровин В. И., Онищенко В. Ф.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ФАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОЕКТА НА СТАДИИ ПРЕДПРОЕКТНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Рассмотрена проблема прогнозирования отклонения фактических результатов проекта от запланированных на стадии предпроектного планирования. Исследована эффективность применения моделей на основе нейронных сетей. Предложено использовать нейро-эволюционный подход для решения проблемы и значение PDRI и риска неудачи проекта в качестве информативных признаков. Предложен критерий информативности результатов. Представлен метод прогнозирования отклонения фактических результатов проекта от запланированных на стадии предпроектного планирования.

**Ключевые слова:** управление проектами, предпроектное планирование, прогнозирование результатов проекта, Project Definition Rating Index, риск неудачи проекта.

Lyovkin V., Dubrovin V., Onyshchenko V.

## PREDICTION OF PROJECT ACTUAL RESULTS AT PRE-PROJECT PLANNING STAGE

The problem of predicting project actual results deviation from the results expected at the pre-project planning stage is considered. The efficiency of neural network-based models is analyzed. It is proposed to use the neural-evolution approach for problem solving and to use PDRI and project failure risk values as informative criterions. The criterion of results informativity is proposed. The method of predicting actual project results deviation from the results expected at the pre-project planning stage is presented.

**Key words:** project management, pre-project planning process, project results prediction, Project Definition Rating Index, project failure risk.

УДК 003.26:004.057.4

Неласа Г. В.<sup>1</sup>, Дозоренко І. С.<sup>2</sup><sup>1</sup>Доцент Запорізького національного технічного університету<sup>2</sup>Магістрант Запорізького національного технічного університету

## ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯННЯ СХЕМ ЦИФРОВИХ МУЛЬТИПІДПИСІВ

Розглянуто декілька відомих схем цифрових мультипідписів із груповою перевіркою чинності, які використовують лише одну замість кількох перевірок, та недоліки цих схем. Властивості схем порівняно за кількома критеріями.

**Ключові слова:** цифровий підпис, мультипідпис, групова перевірка, RSA, DSA.

### ВСТУП

Цифровий підпис – це назва схожого на традиційний підпис методу, що використовується в криптографії. При використанні традиційного підпису людина пише своє власне ім'я на папері. Ніхто не може підробити інший підпис, тому що важко імітувати чужий почерк. Для впровадження цифрового підпису використовують крипtosистеми з відкритим ключем. Кожний підпис має пару ключів: секретний ключ і відкритий ключ. Секретний ключ зберігається у таємниці, у той час як відкритий ключ оприлюднений. Відправник може підписати електронний документ за допомогою цифрового підпису з використанням свого секретного ключа, а одержувач може перевірити цифровий підпис з використанням відкритого ключа відправника. Ніхто не може підробити чужий цифровий підпис, тому що закритий ключ зберігається у таємниці.

Існує багато модифікацій стандартної схеми цифрового підпису, одна з яких, мультипідпис, дозволяє зменшити час верифікації для багатьох підписів. Метою даної роботи є огляд схем цифрових мультипідписів із груповою перевіркою чинності та порівняння їх властивостей.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Традиційно, якщо Аліса хоче відправити повідомлення  $m$ , де  $m \neq p$ , Бобу,  $m$  повинні бути розділені на  $t$  копій  $m_1, m_2, \dots, m_t$ . Тоді Аліса підписує ці повідомлення  $t$  разів для створення кількох цифрових підписів і відсилає ці повідомлення із цифровими підписами до Боба. Після отримання Боб повинен  $t$  разів провести перевірку чинності цих цифрових підписів. Як можна бачити, це потребує багатьох обчислень ступеня за модулем. У випадку використання хеш-функції довжина повідомлення не має значення, але перевірка може займати багато часу че-

рез велику кількість повідомлень, що були відправлені.

Для вирішення цієї проблеми Naccache та ін. у 1994 році запропонували схему цифрового мультипідпису із груповою перевіркою [1]. Верифікатор може перевірити цей цифровий мультипідпис за допомогою відкритого ключа, при цьому потрібна тільки одна замість кількох перевірок. Однак, Lim і Lee зазначили [2], що в цій схемі цифровий мультипідпис може бути легко підроблений, для того щоб пройти групову перевірку чинності. У 1998 році Harn запропонував два методи групової перевірки чинності цифрового мультипідпису [3, 4]. Разом з тим, Hwang та ін. зазначили, що ці схеми також не є безпечними [5, 6]. Зловмисник може підробити цифровий мультипідпис для того, щоб пройти групову перевірку чинності. Тому вони запропонували два удосконалення [7]. У 2001 році Shao також запропонував поліпшення для схеми Harn'a [8].

Можна побачити, що якщо цифровий мультипідпис підроблений зловмисником, то має бути перевірений кожний з цифрових підписів. Це означає повернення до вихідної схеми цифрового підпису, яка потребує  $t$  перевірок. У 2002 році Changchien і Hwang запропонували алгоритм ефективного виявлення підроблених цифрових мультипідписів [9].

### 2. СХЕМА NACCACHE ТА ЇЇ НЕДОЛІКИ

Схема мультипідпису Naccache отримана за допомогою модифікації схеми DSA, в якій рівняння перевірки підпису має такий вигляд:

$$r = (g^{ms^{-1}}y^{rs^{-1}} \bmod p) \bmod q, \quad (1)$$

де  $r = g^k \bmod p$ ,  $s = k^{-1}(m + xr) \bmod q$ ;  $m$  – повідомлення;  $y = g^x \bmod p$  – відкритий ключ особи, що підписує документ;  $x$  – секретний ключ особи, що підписує документ;  $p$  – велике просте число;  $q$  – великий простий дільник  $p - 1$ ;  $g$  – елемент з  $Z_p$  порядку  $q$ .

Для прискорення перевірки кількох цифрових підписів Naccache та ін. у 1994 році запропонували схему для групової перевірки цифрового мультипідпису. Верифікатор може перевіряти кілька цифрових підписів із використанням відкритого ключа відправника, якому потрібна тільки одна замість  $t$  перевірок. Схема виглядає таким чином:

1) Припустимо, що Аліса хоче відправити Бобу  $t$  повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  та цифровий мультипідпис  $(r_1, s_1), (r_2, s_2), \dots, (r_t, s_t)$ . Цифровий мультипідпис був створений за алгоритмом цифрового підпису DSA.

2) Після отримання  $t$  повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  та мультипідпису  $(r_1, s_1), (r_2, s_2), \dots, (r_t, s_t)$  Боб може перевірити чинність мультипідпису для повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  з використанням відкритого ключа Аліси за допомогою рівняння

$$\prod_{i=1}^t r_i \bmod p \equiv g^{\sum_{i=1}^t -m_i s_i^{-1} \bmod q} y^{\sum_{i=1}^t r_i s_i^{-1} \bmod q} \bmod p. \quad (2)$$

3) Якщо рівняння виконується, то Боб може стверджувати, що цифровий мультипідпис  $(r_1, s_1), (r_2, s_2), \dots, (r_t, s_t)$  був створений Алісою.

Очевидно, що Боб може зробити групову перевірку цифрового мультипідпису, для чого потрібне тільки одне рівняння (2). Таким чином, схема Naccache та ін. є більш доцільною для групової перевірки кількох цифрових підписів.

Однак Lim i Lee показали, що схема Naccache не є безпечною. Вона має вразливість, завдяки якій зловмисник може підробити цифровий мультипідпис так, щоб рівняння групової перевірки 1.2 виконувалось. Нижче описано спосіб атаки.

1) Зловмисник вибирає довільні числа  $(u_i, v_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$  і обчислює  $r_i = g^{u_i} y^{v_i} \bmod p$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ .

2) Обчислює  $s_b^{-1} \bmod q$ , що задовольняє  $v_b = r_b s_b^{-1} \bmod q$ ,  $b = 1, 2, \dots, t$ .

3) Зловмисник може отримати  $s_{t-1}$  та  $s_t$  з рівнянь:

$$\sum_{i=1}^t u_i = \sum_{i=1}^t m_i s_i^{-1} \bmod q,$$

$$\sum_{i=1}^t v_i = \sum_{i=1}^t r_i s_i^{-1}.$$

Звідси видно, що зловмисник може підробити  $t$  повідомлень  $m_1, m_2, \dots, m_t$  та цифровий мультипідпис  $(r_1, s_1), (r_2, s_2), \dots, (r_t, s_t)$  для того, щоб рівняння групової перевірки (2) виконувалось. Однак жоден з цих підроблених підписів окремо не проходить перевірку в рівнянні (1).

### 3. СХЕМА ЦИФРОВОГО RSA МУЛЬТИПІДПИСУ HARN'A ТА ЇЇ НЕДОЛІКИ

Схема мультипідпису заснована на алгоритмі RSA, в якій рівняння перевірки підпису має такий вигляд:

$$h(m_i) = S_i^e \bmod n, \quad (3)$$

де  $n = p \times q$ ;  $e \times d \bmod (p-1)(q-1) \equiv 1$ ;  $p, q$  – великі прості числа.

Тепер припустимо, що Аліса бажає відправити Бобу  $t$  повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  та цифровий мультипідпис  $S_1, S_2, \dots, S_t$ . Цифровий мультипідпис був створений за алгоритмом RSA, поданим вище. Отже, Аліса відсилає Бобу  $(m_i, S_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ .

Після отримання  $t$  повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  та мультипідпису  $S_1, S_2, \dots, S_t$  Боб може перевірити чинність мультипідпису для повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  із використанням відкритого ключа Аліси  $e$  за допомогою рівняння

$$\left( \prod_{i=1}^t S_i \right)^e = \prod_{i=1}^t h(m_i) \bmod n. \quad (4)$$

Якщо рівняння виконується, то Боб може стверджувати, що цифровий мультипідпис  $S_1, S_2, \dots, S_t$  належить Алісі. Очевидно, що Боб може зробити групову перевірку цифрового мультипідпису, для чого потрібне тільки одне рівняння (4). Таким чином, схема Harn'a є більш доцільною для групової перевірки кількох цифрових підписів.

Hwang та ін. запропонували дві атаки для схеми Harn'a. Вони довели, що особа, яка підписує документ, може підробити цифровий мультипідпис так, щоб рівняння групової перевірки (4) виконувалось. Після цього особа може заперечувати, що саме вона підписала ці документи, тобто не виконується умова про неможливість відмови від авторства. Нижче описані способи атаки.

*Перший спосіб атаки.* Аліса відсилає Бобу підроблені сукупності  $(m_i, S'_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ , де  $S'_i = h(m_{f(i)})^d \bmod n$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ ;  $f(\cdot)$  – бієкція, для якої  $f(i) = j$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$  та  $j = 1, 2, \dots, t$ . Якщо після отримання підроблених сукупностей  $(m_i, S'_i)$  Боб перевірить чинність мультипідпису для повідомлень із використанням рівняння групової перевірки (4), то він може стверджувати, що цифровий мультипідпис  $S'_1, S'_2, \dots, S'_t$  належить Алісі.

*Другий спосіб атаки.* Аліса відсилає Бобу підроблені сукупності  $(m_i, S'_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ , де  $S'_i = a_i \times S_i \bmod n$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$  та  $\prod_{i=1}^t a_i = 1$ . Якщо

після отримання підроблених сукупностей  $(m_i, S'_i)$  Боб перевірить чинність мультипідпису для повідомлень із використанням рівняння групової перевірки (4), то він може стверджувати, що цифровий мультипідпис  $S'_1, S'_2, \dots, S'_t$  належить Алісі.

Встановлено, що жоден з цих підроблених підписів окремо не проходить RSA перевірку з використанням рівняння (3). Таким чином, Аліса може заперечувати, що вона підписала документи. Схема не відповідає умові про неможливість відмови від авторства.

#### 4. СХЕМА ЦИФРОВОГО DSA-TYPE МУЛЬТИПІДПИСУ HARN'A ТА ЇЇ НЕДОЛІКИ

Схема мультипідпису заснована на алгоритмі DSA-type, що є подібним до алгоритму DSA. Рівняння верифікації має такий вигляд:

$$r = (g^{sr^{-1}} y^{mr^{-1}} \bmod p) \bmod q, \quad (5)$$

де  $r = (g^k \bmod p) \bmod q$ ;  $s = rk - mx \bmod q$ ;  $m$  – повідомлення;  $y = g^x \bmod p$  – відкритий ключ особи, що підписує документ;  $x$  – секретний ключ особи, що підписує документ;  $p$  – велике просте число;  $q$  – великий простий дільник  $p - 1$ ;  $g$  – елемент з  $Z_p$  порядку  $q$ .

Для прискорення перевірки кількох цифрових підписів Harn заропонував схему для групової перевірки цифрових підписів. Схема виглядає таким чином:

1) Припустимо, що Аліса хоче відправити Бобу  $t$  повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  та цифровий мультипідпис  $(r_1, s_1), (r_2, s_2), \dots, (r_t, s_t)$ . Цифровий мультипідпис був створений за алгоритмом цифрового підпису DSA-type.

2) Після отримання  $t$  повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  та мультипідпису  $(r_1, s_1), (r_2, s_2), \dots, (r_t, s_t)$  Боб може перевірити чинність мультипідпису для повідомлень  $(m_1, m_2, \dots, m_t)$  із використанням відкритого ключа Аліси за допомогою рівняння

$$\prod_{i=1}^t r_i = \left( g^{\sum_{i=1}^t s_i r_i^{-1}} y^{\sum_{i=1}^t m_i r_i^{-1}} \bmod p \right) \bmod q. \quad (6)$$

3) Якщо рівняння виконується, то Боб може стверджувати, що цифровий мультипідпис  $(r_1, s_1), (r_2, s_2), \dots, (r_t, s_t)$  був створений Алісою.

Очевидно, що Боб може зробити групову перевірку цифрового мультипідпису, для чого потрібне тільки одне рівняння (6). Таким чином, схема Harn'a є більш доцільною для групової перевірки кількох цифрових підписів.

Hwang та ін. показали, що схема Harn'a не є безпечною. Вона має вразливість, завдяки якій особа, що підписує документ, може підробити цифровий мультипідпис так, щоб рівняння групової перевірки (6) виконувалось. Після цього особа може заперечувати, що саме вона підписала ці документи, тобто не виконується умова про неможливість відмови від авторства. Нижче описано спосіб атаки.

1) Аліса відсилає Бобу підроблені сукупності  $(m_i, r_i, s'_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ , де  $s'_i = s_i + a_i r_i \bmod q$ , і  $a_i$  – ціле число, для якого  $\sum_{i=1}^t a_i = 0$ .

2) Якщо після отримання підроблених сукупностей  $(m_i, r_i, s'_i)$  Боб перевірить чинність мультипідпису для повідомлень із використанням рівняння групової перевірки (6), то він може стверджувати, що цифровий мультипідпис  $(r_1, s'_1), (r_2, s'_2), \dots, (r_t, s'_t)$  був створений Алісою.

Встановлено, що жоден з цих підроблених підписів окремо не проходить DSA-type перевірку з використанням рівняння (5). Таким чином, Аліса може заперечувати, що вона підписала документи. Схема не відповідає умові про неможливість відмови від авторства, тому що  $r \neq (g^{s'_i r_i^{-1}} y^{m_i r_i^{-1}} \bmod p) \bmod q$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ .

#### 5. СХЕМИ ЦИФРОВОГО МУЛЬТИПІДПИСУ HWANG'A

Щоб виправити слабкі сторони схеми цифрового RSA-type мультипідпису Harn'a і схеми цифрового DSA мультипідпису Harn'a, Hwang та ін. запропонували два вдосконалення для цих схем. Перше є поліпшенням схеми цифрового RSA мультипідпису (скорочено BV-RSA). Різниця полягає в рівнянні (3):

$$\left( \prod_{i=1}^t S_i^{v_i} \right)^e = \prod_{i=1}^t h(m_i^{v_i}) \bmod n, \quad (7)$$

де  $v_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$  є невеликими довільними числами, що обираються перевірючим.

Друге є поліпшенням схеми цифрового DSA-type мультипідпису (скорочено BV-DSA). Єдина різниця полягає в рівнянні (6). Його модифіковано таким чином:

$$\prod_{i=1}^t r_i^{v_i} = \left( g^{\sum_{i=1}^t s_i r_i^{-1} v_i} y^{\sum_{i=1}^t m_i r_i^{-1} v_i} \bmod p \right) \bmod q, \quad (8)$$

де  $v_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$  є невеликими довільними числами, що обираються перевірючим.

## 6. СХЕМА ЦИФРОВОГО DSA-TYPE МУЛЬТИПІДПИСУ SHAO

У 2001 році Shao запропонував схему цифрового DSA-type мультипідпису. Вона схожа на схему Hwang'a та ін. Єдина різниця полягає в рівнянні 6. Рівняння групової перевірки виглядає таким чином:

$$\prod_{i=1}^t (e_i(s_i))^{u_i} = \prod_{i=1}^t (f_i(s_i))^{u_i} \bmod p, \quad (9)$$

де  $u_i \in (1, 2^{32})$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$  є довільними числами, що обираються перевіряючим, а  $s_i$  – цифровий мультипідпис, кожен підпис якого окремо задоволяє рівнянню  $e_i(s_i) = f_i(s_i) \bmod p$ ,  $i = 1, 2, \dots, t$ .

## 7. СХЕМА CHANGCHIEN'A ТА ІНШІ

В розділі 2 зазначено, що якщо не виконується рівняння групової перевірки, тобто  $\left(\prod_{i=1}^t S_i\right)^e \neq \prod_{i=1}^t h(m_i) \bmod n$ , отримувач, Боб, має перевірити кожен підпис із мультипідпису окремо з використанням рівняння  $h(m_i) = S_i^e \bmod n$ . Визначення підробленого підпису потребує  $t$  обчислень ступеня. У 2002 році Changchien і Hwang запропонували схему для визначення підроблених мультипідписів, що потребує лише одного обчислення ступеня та  $t$  обчислень модуля.

Changchien і Hwang перевизначили  $h()$  як просту необоротну хеш-функцію та  $\prod_{i=1}^t h(m_i) \leq n$ . Це робить довжину  $h()$  рівною  $\lfloor |n|/t \rfloor$  біт, де  $\lfloor \cdot \rfloor$  – функція найбільшого цілого, а  $|n|$  – довжина  $n$ . Для того, щоб визначити підроблений мультипідпис, Боб має виконати такі кроки:

- 1) Обчислити  $L = \left(\prod_{i=1}^t S_i\right)^e \bmod n$ .
- 2) Перевірити, чи  $L \bmod h(m_i) = 0$  для  $i = 1, 2, \dots, t$ .

## 8. ПОРІВНЯННЯ

Порівнати наведені схеми мультипідписів можна за такими критеріями:

**Таблиця 1.** Результати порівняння схем мультипідписів

Назва схеми	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	ТОЗ
Naccache та ін.	+	-	+	+	-	-	ЗДЛ
DSA Harn'a	+	-	+	+	-	-	ЗДЛ
RSA Harn'a	+	-	+	+	-	-	ЗФ
BV-DSA Hwang'a	+	+	+	+	+	-	ЗДЛ
BV-RSA Hwang'a	+	+	+	+	+	-	ЗФ
Shao	+	+	+	+	+	-	ЗДЛ
Changchien'a та ін.	+	-	+	+	-	+	ЗФ

1) Лише чинна особа може підписати електронний документ цифровим мультипідписом.

Всі схеми відповідають цій умові. Будь-яка особа, що має свій секретний ключ, може це зробити.

2) *Nixto не може підробити чужий цифровий мультипідпис.*

Серед розглянутих схем лише схеми BV-DSA та BV-RSA Hwang'a, а також схема Shao відповідають цій умові. Мультипідпис за цими схемами неможливо підробити для того, щоб пройти групову перевірку чинності.

3) *Будь-який перевіряючий може провести групову перевірку чинності цифрового мультипідпису.*

Всі схеми відповідають цій умові. Будь-який перевіряючий може провести групову перевірку цього мультипідпису за допомогою відкритого ключа, для цього потрібна тільки одна перевірка.

4) *Контроль цілісності.*

Всі схеми відповідають цій умові. Зловмисник не має змоги замінити дійсний документ фальшивим, бо він не знає секретного ключа особи, що підписала документ. Лише чинна особа може підписувати свої документи.

5) *Неможливість відмови від авторства.*

Якщо відправник може підробити цифровий підпис, що проходить групову перевірку чинності, то схема не відповідає умові, бо відправник може запречувати, що саме він відправив ці документи. Отже, лише схеми BV-DSA та BV-RSA Hwang'a, а також схема Shao відповідають цій умові.

6) *Мас бути ефективний метод виявлення фальшивих цифрових мультипідписів.*

Практично всі схеми, крім схеми Changchien'a та ін., не відповідають цій умові. В цій схемі перевіряючий може ефективно визначити факт підроблення підпису.

Результати порівняння підсумовано у табл. 1, де  $K_i$  – визначені критерії, «+» – вирішено, «-» – не вирішено, ТОЗ – тип обчислювальної задачі, ЗДЛ – задача дискретного логарифмування, ЗФ – задача факторизації.

## ВИСНОВКИ

Було розглянуто декілька схем цифрових мультипідписів, що вже існують. Ці схеми дозволяють будь-якому перевірючому проводити групову перевірку чинності цифрових підписів. Вони дозволяють заощадити багато обчислень ступеня за модулем. Тим не менш, лише схеми BV-DSA та BV-RSA Hwang'a, а також схема Shao є надійними та забезпечують умову неможливості відмови від авторства. Однак ці схеми не мають ефективного методу виявлення підроблених підписів на відміну від схеми Changchien'a. Проблема створення безпечної та ефективної схеми цифрового мультипідпису залишається відкритою та може розглядатися як напрямок подальших досліджень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Naccache, D. Can DSA be improved: Complexity trade-offs with the digital signature standard / D. Naccache, D. Mraihi, D. Rapheali, S. Vaudenay // Proceedings of Euroscrypt'94. – 1994. – Pp. 85–94.
2. Lim, C. H. Security of interactive DSA batch verification / C. H. Lim, P. J. Lee // Electronics Letters. – 1994. – Vol. 30, No. 19. – Pp. 1592–1593.
3. Harn, L. Batch verifying multiple DSA-type digital signatures // Electronics Letters. – 1998. – Vol. 34, No. 9. – Pp. 870–871.
4. Harn, L. Batch verifying multiple RSA digital signatures // Electronics Letters. – 1998. – Vol. 34, No. 12. – Pp. 1219–1220.
5. Hwang, M. S. Cryptanalysis of the batch verifying multiple RSA digital signatures / M. S. Hwang, I. C. Lin, K. F. Hwang // Informatica. – 2000. – Vol. 11, No. 1. – Pp. 15–19.
6. Hwang, M. S. Cryptanalysis of the batch verifying multiple DSA-type digital signatures / M. S. Hwang, C. C. Lee,

Eric J. L. Lu // Pakistan Journal of Applied Sciences. – 2001. – Vol. 1, No. 3. – Pp. 287–288.

7. Hwang, M. S. Two simple batch verifying multiple digital signatures / M. S. Hwang, C. C. Lee, and Y. L. Tang // The Third International Conference on Information and Communication Security (ICICS2001). – Xian, China, 2001. – Pp. 13–16.
8. Shao, Z. Batch verifying multiple DSA-type digital signatures // Computer Networks. – 2001. – Vol. 37, No. 3–4. – Pp. 383–389.
9. Changchien, S. W. A batch verifying and detecting multiple RSA digital signatures / S. W. Changchien, M. S. Hwang // International Journal of Computational and Numerical Analysis and Applications. – 2002. – Vol. 2, No. 3. – Pp. 303–307.

Надійшла 29.10.2010

Неласая А. В., Дозоренко И. С.

## ОБЗОР И СРАВНЕНИЕ СХЕМ ЦИФРОВЫХ МУЛЬТИПОДПИСЕЙ

Рассмотрены известные схемы цифровых мультиподписей с групповой проверкой, использующие только одну вместо нескольких проверок, а также недостатки этих схем. Проведено сравнение свойств схем по некоторым критериям.

**Ключевые слова:** цифровая подпись, мультиподпись, групповая проверка, RSA, DSA.

Nelasa A. V., Dozorenko I. S.

## REVIEW AND COMPARISON OF MULTIPLE DIGITAL SIGNATURES

Several batch verification multiple digital signatures are reviewed in this paper. These schemes use only one verification instead of several verifications. Weakness of these schemes is also pointed out. The schemes were compared by the defined criterions.

**Key words:** multiple digital signatures, batch verification, RSA, DSA.

УДК 681.142.2; 622.02.658.284; 621.325

Пелешко Д. Д.<sup>1</sup>, Кустра Н. О.<sup>2</sup>, Шпак З. Я.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Національного університету «Львівська політехніка»

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, старший викладач Національного університету «Львівська політехніка»

## СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НАБОРУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ДИСПЕРСІЇ КОЛЬОРУ ЗОБРАЖЕНЬ

Розроблено швидкий метод суміщення зображень в наборі однотипних зображень на основі розв'язання задачі майже факторизації простору топології зображення з подальшим звуженням цього простору через вирішення задачі пошуку кореляційного максимуму. Задача майже факторизації формулюється через введення напівметрики стосовно дисперсії кольору елементів топології зображення.

**Ключові слова:** суміщення зображень, фреймове покриття, топологія зображень, дисперсія кольору, кореляційний максимум.

## ВСТУП

Традиційно для реалізації процедури знаходження і суміщення зображень використовують кореляційну прив'язку цифрових зображень. Метод кореляційної прив'язки зображень має такі недоліки:

– взаємна кореляційна функція може мати досить розмитий максимум, що ускладнює його знаходження, оскільки не враховує просторову структуру порівнюваних зображень;

– комбінаторна складність – великий перебір ситуацій [1–4].

© Пелешко Д. Д., Кустра Н. О., Шпак З. Я., 2011

Основу запропонованого методу складають:

– запропоновані в [4] топологічні представлення та операції, зокрема звуження простору покриття зображення.

– характеристики виділених в [3] класів представлення зображень та наборів.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою даної роботи є розробка швидкого методу суміщення зображень в наборі на основі використання дисперсії значень кольору (чи інтенсивності).

Для досягнення цієї мети до розгляду потрібно ввести топологію зображення і визначити на ній задачу майже факторизації топологічного простору.

Основна ідея пропонованого методу суміщення полягає у швидкому формуванні для кожного зображення відповідних наборів «підозрілих» на подібність фреймів (задача звуження простору топологічного покриття зображення через вирішення задачі майже факторизації) з подальшим їх звуженням математичною кореляцією із заданим фрагментом (задача звуження простору топологічного покриття зображення через вирішення задачі пошуку кореляційного максимуму на топологічному покритті зображення).

## 2. ТОПОЛОГІЇ ДЛЯ ЗАДАЧІ СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НАБОРУ

Нехай задано набір  $\mathbf{P}$  однотипних рисунків з координатною  $\mathfrak{I}_{\mathbf{P}} = \mathfrak{I}_{\mathbf{X}^{2,+d}}$  та колірною топологіями  $\mathfrak{U}_{\mathbf{P}}$  [5]. При цьому треба пам'ятати, що  $\mathfrak{U}_{\mathbf{P}}$  індукується  $\mathfrak{I}_{\mathbf{P}}$ . В кожній з цих топологій визначимо скінченні покриття: фреймове  $(\chi_{\mathbf{X}^{2,+d}}|N_{\chi}) \subseteq \mathfrak{I}_{\mathbf{X}^{2,+d}}$  та індуковане фрагментне  $\vartheta_{\mathbf{P}}$  в  $\mathfrak{U}_{\mathbf{P}}$  [6].

Серед зображень набору виберемо довільне зображення, стосовно якого буде здійснюватись операція суміщення. Таке зображення будемо називати *фіксованим*. Для зручності подального викладу нехай таке зображення має індекс в наборі, рівний 1. Тобто в наборі  $\mathbf{P}$  фіксованим є зображення  $P_{\text{фікс}} = P_1$ . Тоді через  $\mathbf{P}'$  позначимо набір з решти зображень

$$\mathbf{P}' = \mathbf{P} \setminus \{P_1\} = \{P_z\}_{z=2\dots N}. \quad (1)$$

На  $(\chi_{\mathbf{X}^{2,+d}}|N_{\chi})$  визначимо фрейм

$$\mathbf{X}_{\text{fr1, зад}}^{2,+d} = \mathbf{X}_{\text{fr1, зад}}^{2,+d}(\Delta_{x, 1, \text{зад}}, \Delta_{y, 1, \text{зад}}, l_{\text{fr1, зад}}, h_{\text{fr1, зад}}), \quad (2)$$

якому на  $P_1$  відповідає індукований фрагмент зображення  $P_{1, \text{ зад}} \in \vartheta_{\mathbf{P}}$ .

Проблема вибору початкового фрейму  $\mathbf{X}_{\text{fr1, зад}}^{2,+d}$  в даній роботі детально не розглядається. Це питання детально розглядалось в [7]. Приймаємо лише

одне припущення –  $\mathbf{X}_{\text{fr1, зад}}^{2,+d}$  індукує такий фрагмент зображення  $P_1$ , який з достатньою точністю існує на усіх зображеннях набору  $\mathbf{P}'$ .

Важатимемо, що фреймове покриття  $(\chi_{\mathbf{X}^{2,+d}}|N_{\chi})$  гомеоморфне фрейму  $\mathbf{X}_{\text{fr1, зад}}^{2,+d}$  за розмірами. Тут гомеорфізм за розмірами визначає те, що усі елементи  $(\chi_{\mathbf{X}^{2,+d}}|N_{\chi})$  мають розміри  $l_{\text{fr1, зад}}$  і  $h_{\text{fr1, зад}}$ , а відрізняються лише координатами початку.

З  $(\chi_{\mathbf{X}^{2,+d}}|N_{\chi})$  при заданій  $\mathfrak{I}_{\mathbf{P}}$  сформуємо фреймове покриття набору  $\mathbf{P}'$  за правилом

$$\chi_{\mathbf{P}'} = \{\chi_z\}_{z=2\dots N}, \quad (\chi_z|N_{\chi}) \in \mathfrak{I}_{\mathbf{P}}, \quad (3)$$

де

$$\forall z, z \in [2\dots N]: \chi_{z_1} = \chi_{z_2}; \quad \chi_{z_1}, \chi_{z_2} \in \chi'_{\mathbf{P}}. \quad (4)$$

Формули (3) і (4) означають, що фреймове покриття  $\chi_{\mathbf{P}'}$  набору  $\mathbf{P}'$  складається з  $N-1$  топологічно еквівалентних покриттів  $(\mathbf{X}^{2,+d}, \mathfrak{I}_{\mathbf{X}^{2,+d}})$ , елементи яких ще й рівні за розмірами. При цьому важливо відзначити, що розмірність кожного  $\chi_z$  рівна  $N_{\chi}$ . Тоді має місце

$$\dim \chi_{\mathbf{P}'} = (N-1)N_{\chi}, \quad (5)$$

і до розгляду треба приймати топологічний простір  $(\chi_{\mathbf{P}'}|(N-1)N_{\chi})$ .

Фреймове покриття (3) засобом неперервного відображення  $\mathbf{C}$  [6] індукує фрагментне покриття  $\vartheta_{\mathbf{P}'} \subseteq \vartheta_{\mathbf{P}}$ , яке належить топології  $\mathfrak{U}_{\mathbf{P}'} \subseteq \mathfrak{U}_{\mathbf{P}}$  набору  $\mathbf{P}'$ , за правилом

$$\begin{aligned} \mathfrak{U}_{\mathbf{P}'} &= \mathfrak{U}_{\mathbf{P}} \setminus \{\mathfrak{U}_1\} = \{\mathfrak{U}_z\}_{z=2\dots N}; \\ \vartheta_{\mathbf{P}'} &= \vartheta_{\mathbf{P}} \setminus \{\vartheta_1\} = \{\vartheta_z\}_{z=2\dots N}; \\ \vartheta_{\mathbf{P}'} &\subseteq \mathfrak{U}_{\mathbf{P}'} \subseteq \mathfrak{U}_{\mathbf{P}} \end{aligned} \quad (6)$$

Фактично  $\chi_{\mathbf{P}'}$  і  $\vartheta_{\mathbf{P}'}$  виступають звуженнями  $\chi_{\mathbf{P}}$  і  $\vartheta_{\mathbf{P}}$  відповідно.

Оскільки  $\vartheta_{\mathbf{P}}$  є індуковане неперервним відображення  $\mathbf{C}$  [6], то визначений для  $(\chi_{\mathbf{X}^{2,+d}}|N_{\chi})$  гомеорфізм (за розмірами) до фрейму  $\mathbf{X}_{\text{fr1, зад}}^{2,+d}$  має місце для елементів просторів  $\vartheta_{\mathbf{P}}$  і  $\vartheta_{\mathbf{P}'}$  до фрагмента  $P_{1, \text{ зад}}$ . При цьому для елементів  $\vartheta_{\mathbf{P}}$  і  $\vartheta_{\mathbf{P}'}$  не існує топологічної еквівалентності, подібної до (3). Це означає, що набір  $\mathbf{P}'$  можна подати у вигляді скінченного набору фрагментів  $P_{z, m}$  з розмірами  $l_{\text{fr1, зад}}$  і  $h_{\text{fr1, зад}}$

$$\begin{aligned} \mathbf{P}' &= \{P_z\} = \\ &= \left\{ \left\{ P_{z, m} \mid P_{z, m} = C_{z, m}(\mathbf{X}_{\text{fr}z, m}^{2,+d}) \right\}_{m=1\dots N_z} \right\}_{z=2\dots N}; \\ \forall z, m : \mathbf{X}_{\text{fr}z, m}^{2,+d} &\in \chi_z. \end{aligned} \quad (7)$$

Зазначимо, що розмірність кожного  $\vartheta_z$  складає  $N_\chi$ , тобто існує простір  $(\vartheta_z|N_\chi)$ . Тоді розмірність  $\vartheta_{P'}$  за (5) складає

$$\dim \vartheta_{P'} = (N-1)N_\chi, \quad (8)$$

і до розгляду треба приймати простір  $(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi)$ .

### 3. СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НАБОРУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ДИСПЕРСІЇ

#### 3.1. Майже факторизація просторів покриття зображень набору на основі дисперсії

Нехай задано набір  $P$ , фіксоване зображення  $P_{\text{фікс}} = P_1$ , фрейм  $\mathbf{X}_{\text{fr}1, \text{зад}}^{2,+,d}$  і фрагмент  $P_{1, \text{зад}}$ , набір  $P'$  (1), топологій  $\mathfrak{I}_P = \mathfrak{I}_{\mathbf{X}^{2,+,d}}$  та  $\mathfrak{U}_{P'} \subseteq \mathfrak{U}_P$  [4] і покриття  $(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi)$  (3) та  $(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi)$  (6).

Для кожного фрагмента  $P_{z,m}$  визначимо дисперсію  $D_{z,m}$  [1] значення кольору (чи інтенсивності)  $c_{z,m,(i,j)}^d$  кожного фрагмента. Розрахункова формула має вигляд

$$D_{z,m} = \frac{1}{s_{1, \text{зад}}} \sum_{i=x_{\text{пoch},z,m}}^{x_{\text{пoch},z,m} + l_{\text{fr}1, \text{зад}}} \sum_{j=y_{\text{пoch},z,m}}^{y_{\text{пoch},z,m} + h_{\text{fr}1, \text{зад}}} \left( c_{z,m,(i,j)}^d - M_{z,m} \right)^2; \\ m = 1 \dots N_\chi; \\ z = 2 \dots N, \quad (9)$$

де  $s_{1, \text{зад}} = l_{\text{fr}1, \text{зад}} h_{\text{fr}1, \text{зад}}$  – площа  $P_{1, \text{зад}}$ ;  $M_{z,m}$  – математичне сподівання.

Подібно до (9) обчислюється дисперсія  $D_{1, \text{зад}}$  для фрагмента  $P_{1, \text{зад}}$ .

В результаті (9) кожному фрагменту  $P_{z,m}$  однозначно поставлена у відповідність характеристика – середнє значення кольорів  $D_{z,m}$  відповідного фрагмента зображення  $P_z$

$$P_{z,m} \rightarrow D_{z,m}. \quad (10)$$

Це означає, що  $(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi)$  засобами (10) через  $(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi)$  індукує набір характеристик – дисперсій кольору

$$\chi_{P'} \xrightarrow{C} \vartheta_{P'} \xrightarrow{M} \{D_{z,m}\}, \\ z = 2 \dots N. \quad (11)$$

Для задачі майже факторизації  $(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi)$  введемо напівметрику  $d_{D, \text{fr}}(P_{z,m}, P_{1, \text{зад}})$  як відношення еквівалентності фрагменту  $P_{1, \text{зад}}$

$$\forall P_{z,m} \in \vartheta_{P'} : d_{D, \text{fr}}(P_{z,m}, P_{1, \text{зад}}) = \\ = |D_{z,m} - D_{1, \text{зад}}|, \quad (12)$$

**Твердження.** (12) є напівметрикою.

**Доведення.**

▷

Оскільки (12) є евклідовою відстанню, то звідси випливають умови метрики.

Відношення еквівалентності як умова напівметрики випливає з того, що для дисперсії (9) як інтегральної характеристики фрагмента можлива ситуація, коли

$$\exists z \in [2 \dots N], m \in [2 \dots N_\chi] : D_{z,m} = D_{1, \text{зад}}. \quad (13)$$

Це означає, що для  $P_{z,m} \neq P_{1, \text{зад}}$  має місце

$$d_{D, \text{fr}}(P_{z,m}, P_{1, \text{зад}}) = 0, \quad (14)$$

що визначає метрику (12) як напівметрику.

▷

Тоді задача майже факторизації простору  $(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi)$  полягає у побудові  $\vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon$  за допомогою нерівності

$$\forall P_{z,m} \in \vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon, \\ d_{D, \text{fr}}(P_{z,m}, P_{1, \text{зад}}) \leq \varepsilon, \quad (15)$$

де  $\varepsilon$  – точність суміщення – параметр майже факторизації.

В загальному випадку треба розглядати  $\varepsilon = \varepsilon(z)$ . Проте на практиці для зручності вибирають точність одну для усіх  $N-2$  рисунків набору  $P'$ .

Фактично  $\vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon$  треба розглядати як набір фрагментів набору  $P'$  «підозрілих» на подібність (за 15) фрагменту  $P_{1, \text{зад}}$ . Оскільки

$$\forall \vartheta_z \in \vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon : \dim \vartheta_z \leq N_\chi, \quad (16)$$

то має місце оцінка

$$\dim \vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon \leq \\ \leq \dim \vartheta_{P'} = (N-1)N_\chi. \quad (17)$$

Якщо прийняти, що  $\vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon$  відповідає майже фактор  $\chi_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon$ , такий що

$$\left( \chi_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon \middle| \vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, \text{fr}}} / \sim^\varepsilon \right) \subseteq \\ \subseteq (\chi_{P'}|(N-1)N_\chi), \quad (18)$$

то (17) означає, що через вирішення задачі майже факторизації вдалось звузити простори  $(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi)$  і  $(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi)$  відповідно.

### 3.2. Задача пошуку кореляційного максимуму на майже фактор просторі зображення

Наступним кроком є звуження просторів  $\vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}}$  і  $\chi_{(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}}$  до одноточкових

го фрейму через вирішення задачі пошуку кореляційного максимуму. Для цього введемо до розгляду метрику

$$\begin{aligned} \forall P_{z, m} \in \vartheta_{P'} : d_{r_{\max}, fr}(P_{z, m}, P_{1, \text{зад}}) = \\ = r(P_{z, m}, P_{1, \text{зад}}), \end{aligned} \quad (19)$$

де  $r(P_{z, m}, P_{1, \text{зад}})$  – кореляції [1] між значеннями кольору (чи інтенсивності) фрагменту  $P_{z, m}$  із заданим  $P_{1, \text{зад}}$ . Розрахункова формула має вигляд

$$r_{z, m}(P_{1, \text{зад}}, P_{z, m}) = \frac{\sum_{i=x_{\text{пoch}} z, m}^{x_{\text{пoch}} z, m + l_{\text{fr1, зад}}} \sum_{j=y_{\text{пoch}} z, m}^{y_{\text{пoch}} z, m + h_{\text{fr1, зад}}} (c_{1, \text{зад}, (i, j)}^d - M_{1, \text{зад}})(c_{z, m, (i, j)}^d - M_{z, m})}{\left( \sum_{i=x_{\text{пoch}} z, m}^{x_{\text{пoch}} z, m + l_{\text{fr1, зад}}} \sum_{j=y_{\text{пoch}} z, m}^{y_{\text{пoch}} z, m + h_{\text{fr1, зад}}} (c_{1, \text{зад}, (i, j)}^d - M_{1, \text{зад}})^2 \right) \left( \sum_{i=x_{\text{пoch}} z, m}^{x_{\text{пoch}} z, m + l_{\text{fr1, зад}}} \sum_{j=y_{\text{пoch}} z, m}^{y_{\text{пoch}} z, m + h_{\text{fr1, зад}}} (c_{z, m, (i, j)}^d - M_{z, m})^2 \right)}; \quad m = 1 \dots N_\chi; z = 2 \dots N, \quad (20)$$

де  $c_{1, \text{зад}, (i, j)}^d$  – значення кольору фрагменту  $P_{1, \text{зад}}$ ;  $N_\chi$  – розмірність покриттів  $\chi_z \in \chi_{(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}}$  та

$\vartheta_z \in \vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}}$ .

В результаті (20) для кожного  $\chi_{(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}}$

та  $\vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}}$  отримуємо набір значень кореляцій  $r_{z, m}(P_{1, \text{зад}}, P_{z, m})$ , які є характеристиками фрагментів  $P_{z, m} \in \vartheta_z$

$$\begin{pmatrix} \chi_z \\ \vartheta_z \end{pmatrix} \rightarrow \{r_{z, m}(P_{1, \text{зад}}, P_{z, m})\}_{m=1 \dots N_\chi}, z = 2 \dots N;$$

$$\chi_z \in \chi_{(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}} / \sim^\epsilon;$$

$$\vartheta_z \in \vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}} / \sim^\epsilon. \quad (21)$$

На наборі  $\{r_{z, m}(P_{1, \text{зад}}, P_{z, m})\}$  для кожного  $z$  вирішуємо задачу пошуку кореляційного максимуму із заданим  $P_{1, \text{зад}}$

$$I_{r, \max} = \left\{ \max_m (r_{z, m}(P_{1, \text{зад}}, P_{z, m})) \neq 0 \right\}_{z=2 \dots N}. \quad (22)$$

У випадку, якщо ненульового кореляційного максимуму при заданому  $z$  не існує, то це зображення видаляється з набору і в подальшому розв'язанні задачі суміщення не розглядається. Надалі вважатимемо, що для будь-якого  $z$  ненульова кореляція існує.

За (21) знаходимо відповідний  $P_{z, m} \in \vartheta_z \in \vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}}$  і формуємо остаточний набір фрагментів

$$\vartheta_{P' \max r} = \left\{ P_{z, m} | (P_{z, m} \rightarrow \mathbf{I}_{r, \max}) \right\}_{z=2 \dots N} \quad (23)$$

і відповідний набір фреймів

$$\chi_{P' \max r} = \left\{ \mathbf{X}_{\text{fr}z, m}^{2, +, d} | P_{z, m} = C(\mathbf{X}_{\text{fr}z, m}^{2, +, d}), P_{z, m} \in \vartheta_{P' \max r} \right\}_{z=2 \dots N}. \quad (24)$$

Оскільки розмірність набору (22) дорівнює  $N-2$ , то

$$\dim \chi_{P' \max r} = \dim \vartheta_{P' \max r} = N-2. \quad (25)$$

Очевидно, що  $\vartheta_{P' \max r} \subseteq \vartheta_{(\vartheta_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}} / \sim^\epsilon \subseteq \vartheta_{P'} \subseteq \vartheta_P$  належить топологіям  $\mathfrak{U}_{P'}$  та  $\mathfrak{U}_P$ . Аналогічно для координатної області маємо  $\chi_{P' \max r} \subseteq \chi_{(\chi_{P'}|(N-1)N_\chi), d_{D, fr}} / \sim^\epsilon \subseteq \chi_{P'} \subseteq \chi_P$ .

Фрагментний набір  $(\vartheta_{P' \max r}|N-2)$  є результатом двоетапного звуження  $\vartheta_{P'}$  до  $N-2$  фрагментів, кожен з яких відповідає окремому  $P_z$  набору  $P'$ .

Подібно до  $(\vartheta_{P' \max r}|N-2)$ , фреймовий набір  $(\chi_{P' \max r}|N-2)$  є результатом звуження  $\chi_{P'}$  і містить для кожного  $z$  по одному фрейму  $\mathbf{X}_{\text{fr}z, m}^{2, +, d}$ .

За фреймовим набором  $(\chi_{P' \max r}|N-2)$ , як зміщення між фрагментами  $P_{z, m}$  і  $P_{1, \text{зад}}$ , знаходимо зміщення по осіх  $x - \Delta_{x, (1, z)}$  та по  $y - \Delta_{y, (1, z)}$  кожного зображення набору  $P'$  відносно  $P_1$ ,

$$\begin{cases} \Delta_{x,(1,z)} = \Delta_{x,z,m} - \Delta_{x,1,\text{зад}} \\ \Delta_{y,(1,z)} = \Delta_{y,z,m} - \Delta_{y,1,\text{зад}} \end{cases}_{z=2\dots N}; \quad \mathbf{X}_{\text{fr}z,m}^{2,+d} \in \chi_{\mathbf{P}' \max r}. \quad (26)$$

Звертаємо увагу на те, що зміщення  $\Delta_{x,(1,z)}, \Delta_{y,(1,z)} \in \mathbf{N}$ , тобто можуть набувати як додатних, так і від'ємних значень.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТИ ПРАКТИЧНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ СУМІЩЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ДИСПЕРСІЇ

На основі викладених вище теоретичних результатів розроблено практичну реалізацію методу суміщення зображень набору на основі дисперсії. Зображення цих наборів є результатами горизонтальних та вертикальних зсувів деякого базового зображення. Надалі такі набори будемо називати наборами штучно-згенерованих зображень (НШЗЗ).

В практичному експерименті для зручності умову (15) замінимо на відносну похибку

$$\frac{d_{D,\text{fr}}(P_{z,m}, P_{0,\text{зад}})}{|D_{z,m}|} \leq \varepsilon. \quad (27)$$

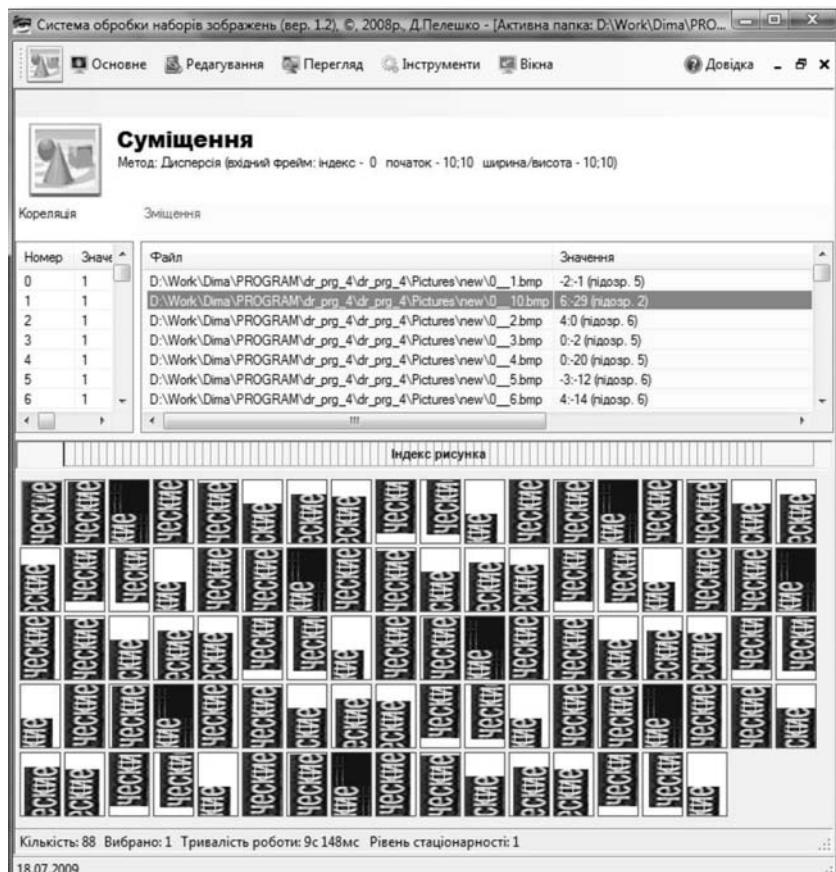


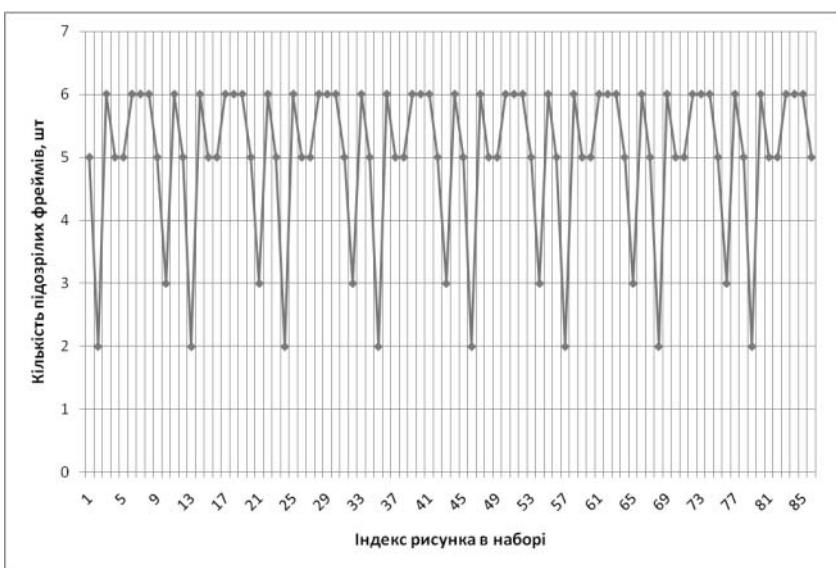
Рис. 1. Зріз екранної форми – результати суміщення на основі дисперсії НШЗЗ

На рис. 1 наведено результати суміщення зображень НШЗЗ. Характеристики НШЗЗ є такими: розмірність набору –  $N = 88$ ; зображення в градаціях сірого; розмірність кожного зображення –  $l = 34 \times h = 54$  пікселів;  $P_{\text{фікс}} = P_0$ . Параметри заданого фрейму  $\mathbf{X}_{\text{fr}z,m}^{2,+d}$ :  $\Delta_{x,0,\text{зад}} = \Delta_{y,0,\text{зад}} = 10$ ;  $l_{\text{fr}0,\text{зад}} = h_{\text{fr}0,\text{зад}} = 10$ ;  $\varepsilon = 0.001$ . Індексування зображень в наборі розпочинається з нуля, тобто  $\mathbf{P}' = \{P_1, \dots, P_{88}\}$ . Заданий фрагмент на  $P_0$  виділений червоним кольором.

На рис. 2 наведено результати побудови майже фактор простору  $\vartheta^{\left(\vartheta_{\mathbf{P}'}|(N-1)N_x\right), d_{D,\text{fr}}} / \sim^\varepsilon$ , тобто набори «підозрілих на подібність» фрагментів для кожного зображення набору  $\mathbf{P}'$ , НШЗЗ, результати суміщення якого наведені на рис. 1. Швидкість формування  $\vartheta^{\left(\vartheta_{\mathbf{P}'}|(N-1)N_x\right), d_{D,\text{fr}}} / \sim^\varepsilon$  є визначальною для пропонованого алгоритму в порівнянні з відомими методами [7]. Чисельні значення кількості «підозрілих фрэймів» для кожного  $P_z$  набору  $\mathbf{P}'$  можна побачити на рис. 1 в таблиці «Зміщення» → в колонці «значення» → в мітці «підозр. –».



**Рис. 2.** Зріз екрану – результати формування майже фактор простору  $\vartheta_{(\vartheta_{\mathbf{P}'}|(N-1)N_\chi), d_{D,fr}} / \sim^\varepsilon$  при суміщенні методом дисперсії кольору НШЗЗ  $\mathbf{P}'$



**Рис. 3.** Розподіл «підозрілих» фрагментів (простору  $\vartheta_{(\vartheta_{\mathbf{P}'}|(N-1)N_\chi), d_{D,fr}} / \sim^\varepsilon$ ) в невпорядкованому НШЗЗ  $\mathbf{P}'$  за методом суміщення на основі дисперсії

На рис. 3 наводиться розподіл розмірностей  $\chi_z$  та  $\vartheta_z$ , які належать покриттям  $\chi_{(\chi_{\mathbf{P}'}|(N-1)N_\chi), d_{D,fr}} / \sim^\varepsilon$  та  $\vartheta_{(\vartheta_{\mathbf{P}'}|(N-1)N_\chi), d_{D,fr}} / \sim^\varepsilon$  відповідно. Періодичність розподілу визначається невпорядкованістю набору  $\mathbf{P}'$  і штучним генеруванням зображень.

Чисельні значення, тобто  $\Delta_{x,(1,z)}, \Delta_{y,(1,z)}$ , для суміщення на основі дисперсії наведені на рис. 1 в таблиці «Зміщення» → в колонці «значення».

На рис. 4 наведено часові результати (тобто, фактично швидкість) роботи алгоритму суміщення НШЗЗ запропонованим методом залежно від розмірності  $\mathbf{P}'$ . Характеристики НШЗЗ є такими: розмірність набору – змінна; зображення в градаціях сірого; розмірність кожного зображення –  $l = 34 \times h =$

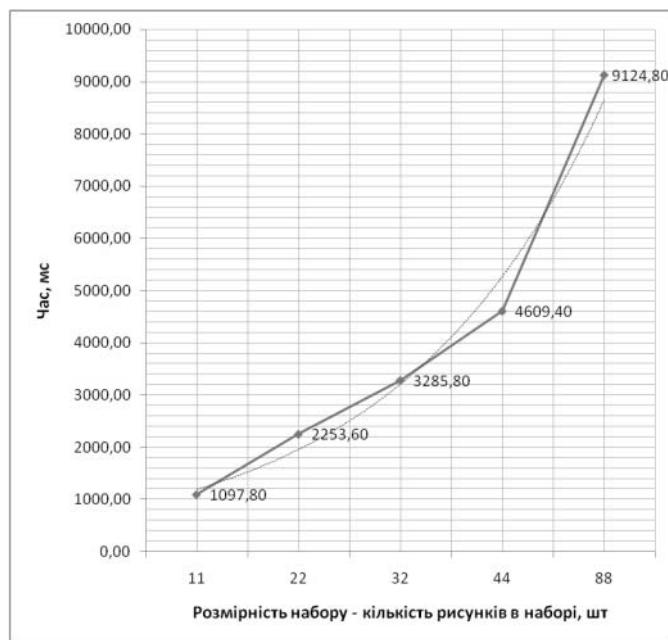
= 54 пікселів;  $P_{\text{фікс}} = P_0$ . Параметри заданого фрейму  $\mathbf{X}_{\mathbf{fr}0, \text{зад}}^{2,+,d}$ :  $\Delta_{x,0,\text{зад}} = \Delta_{y,0,\text{зад}} = 10$ ;  $l_{\mathbf{fr}0, \text{зад}} = h_{\mathbf{fr}0, \text{зад}} = 10$ ;  $\varepsilon = 0,01$ .

При суміщенні методом дисперсії результати наведено в табл. 1. При цьому середньоквадратичне відхилення результатів експерименту не перевищуває 20 мс. На основі результатів вибраних експериментів характеристикою швидкості роботи алгоритму виступало середнє значення значень часу усіх експериментів при кожній розмірності набору. Ці значення наведені на графіку рис. 4.

З рис. 4 видно, що час роботи алгоритму зростає із збільшенням розмірності набору. Таке зростання пояснюється різким збільшенням арифметичних операцій.

**Таблиця 1.** Зведена таблиця експериментальних та характеристичних даних – результатів роботи (в мс) процесу суміщення методом дисперсії при різних розмірностях НШЗЗ

Розмірність набору	Час роботи алгоритму, мс Номер експерименту					Відхилення, мс	Середнє значення, мс
	1	2	3	4	5		
11	1104	1089	1102	1096	1098	5,85	1097,80
22	2272	2248	2263	2247	2238	13,65	2253,60
32	3283	3301	3258	3293	3294	16,81	3285,80
44	4607	4624	4593	4613	4610	11,19	4609,40
88	9148	9145	9112	9107	9112	19,94	9124,80



**Рис. 4.** Часова залежність від розмірності набору  $P'$  роботи алгоритму суміщення НШЗЗ методом дисперсії

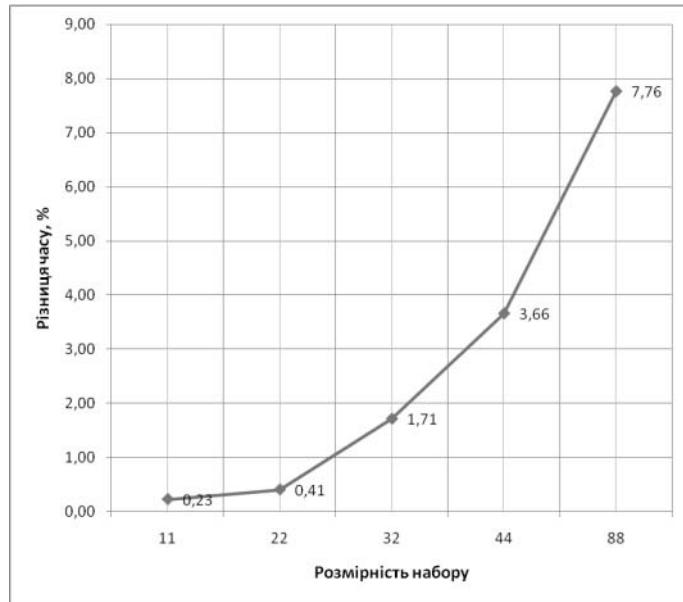
**Таблиця 2.** Порівняльні дані результатів роботи (в мс) процесу суміщення НШЗЗ методом дисперсії при різних розмірах заданого фрейма

Розмір рисунка (піксели)			
X		Y	
37			54
Розмір фрейма (піксели) X	Y	Площа фрейма / площа рисунка	Час
10	10	0,05	1097,80
15	15	0,11	1491,20
20	20	0,20	1772,40
25	25	0,31	1558,20
28	28	0,39	1222,20

В табл. 2 наведено дані залежності швидкості роботи процесу суміщення НШЗЗ від розмірів фрейма  $X_{fr0, \text{зад.}}^{2, +, d}$ . Характеристики НШЗЗ є такими, як у випадку з результатами, поданими в табл. 2.

Експерименти проводились подібно до експериментів, результати яких відображені на рис. 4 і в табл. 1. Тобто характеристикою виступало середнє значення результатів п'яти кращих експериментів при різних  $s_{0, \text{зад.}}/s_{P_0}$ . При цьому похибка відхилення також не перевищувала 20 мс. Як показали результати експериментів, найгіршим (найдовше працював алгоритм) для даного  $P'$  є співвідношення  $s_{0, \text{зад.}}/s_{P_0} = 0, 2$ , що відповідає розмірам  $l_{fr0, \text{зад.}} = h_{fr0, \text{зад.}} = 20$ .

При більших та менших розмірах заданого фрейма (в даному випадку квадратного) швидкість роботи алгоритму лише зростає.



**Рис. 5.** Порівняння часу роботи алгоритму суміщення НШЗЗ на основі методів кореляційної прив'язки і дисперсії

Наведені результати ілюструють лише характер залежності швидкості роботи алгоритму від розмірів  $X_{fr0, \text{зад}}^{2,+,d}$  (тренд поліномний). Очевидно, що тип і якісний вміст зображення та вибраного фрагмента також будуть впливати на час роботи алгоритму.

Важливим результатом експериментів є існування максимуму – найбільшого часу роботи алгоритму. Відповідно до цього можна зробити висновок, що пришвидшення роботи алгоритму є можливим через вибір за розмірами  $X_{fr0, \text{зад}}^{2,+,d}$ . Пошук найменшого значення є достатньо складним, оскільки до розгляду треба приймати двомірний розподіл часу роботи.

На рис. 5 показано порівняння часу роботи різних алгоритмів (у форматі приросту у відсотках пришвидшення роботи запропонованого методу в порівнянні з методом кореляційної прив'язки для суміщення НШЗЗ) суміщення, побудованих на методах кореляційної прив'язки та дисперсії.

## ВИСНОВКИ

Як можна побачити з результатів, наведених на рис. 5, метод суміщення, базований на майже факторизації простору  $\vartheta_{P'}$  на основі дисперсії, є суттєво швидшим від методу суміщення на основі кореляційної прив'язки. Зважаючи на дуже малі розміри зображень НШЗЗ, приріст швидкості роботи, наприклад при  $N = 88$  становить 7,76 % і зростає при зростанні розмірності  $P'$ .

Запропонований алгоритм може бути застосований для суміщення в горизонтальному та вертикальному напрямках зображень будь-якого типу.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Гусейн-Заде, С. М. Лекции по дифференциальной геометрии / Гусейн-Заде С. М. – М. : Изд-во МГУ, 2001.– 464 с.
2. Милнор, Дж. Дифференциальная топология / Дж. Милнор, А. М. Уоллес. – М. : Мир, 1972. – 279 с.
3. Класифікація моделей представлення зображень та наборів зображень як стохастичних зображень та полів: Матеріали науково-практичної конференції [«Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту ISDMCI'2009»], (Євпаторія, 18–22 травня 2009) / Херсонський морський інститут. – Херсон : Видавництво Херсонського морського інституту, 2009. – Т. 2. – С. 401–405.
4. Пелешко, Д. Д. Топології зображень та наборів зображень / Д. Пелешко // Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць. – 2009. – Вип. 19.4. – С. 236–242.
5. Александров, П. С. Введение в теорию множеств и общую топологию / Александров П. С. – М. : Наука, 1977. – 368 с.
6. Халмош, П. Конечномерные векторные пространства / Халмош П. – М. : ГИФМЛ, 1963. – 276 с.
7. Ращевич, Ю. Центрування зображень на основі методів кореляційного аналізу / Ю. Ращевич, Б. Деміда, Д. Пелешко, Н. Кустра // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. – 2005. – Вип. 29. – С. 121–128.

Надійшла 7.10.2009

Після доробки 30.03.2010

Пелешко Д. Д., Шпак З. Я., Кустра Н. Я.  
СОВМЕЩЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАБОРА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСПЕРСИИ ЦВЕТА ИЗОБРАЖЕНИЙ

Разработан ускоренный метод центрирования набора однотипных изображений на основе решения задачи почти

факторизации пространства топологии изображения с последующим сужением этого пространства с помощью задачи поиска корреляционного максимума. Задача почти факторизации формулируется введением полуметрики относительно дисперсии цвета элементов топологии изображения.

**Ключевые слова:** совмещение изображений, фреймовое покрытие, топология изображений, дисперсия цвета, корреляционный максимум.

Peleshko D. D., Kustra N. O., Shpak Z. Ya.

## COMPOSITION IMAGE REGISTRATION USING PICTURE COLOR DISPERSION

The authors have developed the method of one-type images centering based on solution of the problem of image topology space almost-factorization with further constriction of the space by solving the problem of correlation maximum search. The almost-factorization problem is solved by introduction of semi-metric relative to image topology elements color dispersion.

**Key words:** image registration, frame coverage, image topology, color dispersion, correlation maximum.

УДК 629.735

Потий А. В.<sup>1</sup>, Комин Д. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, доцент, начальник кафедры Харьковского университета Воздушных Сил

<sup>2</sup>Адъюнкт Харьковского университета Воздушных Сил

# ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЦЕНИВАНИЯ ГАРАНТИЙ В КОНТЕКСТЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Предлагается функционально-лингвистический подход к оцениванию гарантий безопасности. Приводятся методика и результаты онтологического анализа предметной области оценивания гарантий. Обосновывается актуальность применения аппарата онтологического моделирования для задач оценивания безопасности.

**Ключевые слова:** гарантии, оценивание, онтологическое моделирование, функциональное моделирование, лингвистические переменные.

## ВСТУПЛЕНИЕ

Владельцы систем и продуктов информационных технологий (ИТ) хотят быть уверенными в качестве разработки, эффективности функционирования и безопасности приобретенных ИТ-продуктов. Международные [1–4] и национальные [5–7] стандарты в области безопасности информационных технологий определяют функциональные требования безопасности и требования гарантий безопасности, удовлетворение которых позволяет предоставить различные основания для такой уверенности. В ходе активного исследования (оценивания) ИТ-продукта на соответствие требованиям гарантий и формируется уверенность потребителя в корректности реализации функциональных услуг безопасности.

Оценивание ИТ-продуктов проводится аккредитованными испытательными лабораториями на основании программ и методик проведения оценивания. Качественная разработка программы и методики оценивания является важной составляющей при подготовке к проведению оценивания. Сам процесс оценивания подвержен воздействию различных факторов, способных повлиять на итоговый результат оценива-

ния. Поэтому к процессу оценивания выдвигаются требования ширины, глубины и строгости, а к результатам оценивания – требования объективности, повторяемости, беспристрастности, воспроизводимости и сопоставимости.

Обзор научной литературы показал, что моделирование процессов оценивания гарантий безопасности с созданием инструментальных средств для поддержки работы эксперта является актуальной задачей. Однако в основном моделирование направлено на интерактивное представление требований стандарта в виде информационных инструментальных систем. Кроме того, в большинстве работ при моделировании не рассматриваются вышеупомянутые требования.

В работах авторов [8–10] предлагается функционально-лингвистический подход к оцениванию гарантий информационной безопасности, который позволяет разрабатывать программу и методику оценивания и выполнять вышеуказанные требования как к процессу оценивания, так и к результатам оценивания. В данной работе представлены результаты дальнейшего развития функционально-лингвистического подхода и детальное описание первого этапа.

© Потий А. В., Комин Д. С., 2011

## 1. КОНЦЕПЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЛІНГВІСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА

В ході аналізу області оцінювання гарантій автори висловили предложение оцінювати не сам об'єкт оцінювання, а присущі ему *свойства гарантій*. Данные свойства виявляються в ході аналізу вимог, висловлюемых до об'єкту в нормативних документах на певному рівні гарантій безпеки. Для доказування того, що конкретне властивість присутня (имається в наявності) об'єкту оцінювання (ОО), використовуються свідчівства, якими можуть виступати сам ОО, його частини, документація, результати випробувань (тестування). Таким чином, оцінювання ІТ-продукта заключається в оцінці ступеня проявлення присутніх продукту властивостей гарантій на основі аналізу (дослідження) свідчівств. Це є ключовою ідеєю, яку предлаштовано авторами підходу до оцінювання гарантій безпеки.

Структура функціонально-лингвістического підходу представлена на рис. 1. Оцінка гарантій безпеки проводиться в чотири етапи.

На першому етапі проводиться онтологічний аналіз та моделювання предметної області оцінювання. Аналіз включає в себе дослідження множества вимог гарантій ( $R = \{r_1, r_2, \dots, r_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$ ), які висловлюються до ОО, та виявлення (синтез) множества властивостей гарантій ( $P = \{p_1, p_2, \dots, p_j\}$ ,  $j = \overline{1, L}$ ), якими повинен обладнати ОО. На множестві властивостей гарантій  $P$  визначаються залежності та взаємозв'язки між властивостями. Результати аналізу представляються в формі онтологічних графів,

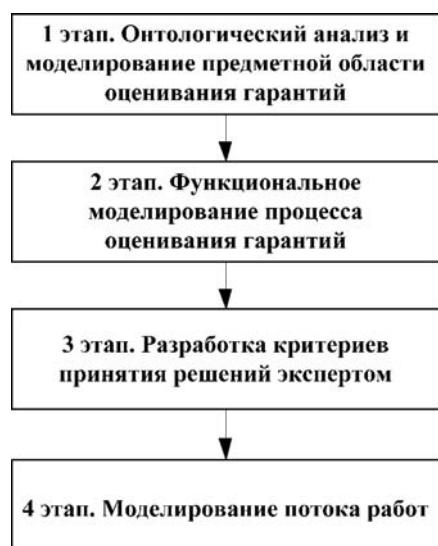


Рис. 1. Функціонально-лингвістический підхід до оцінювання гарантій

які точні та однозначно (в принятій нотації) описують предметну область (т. е. основні поняття (концепти) та відношення між ними). Повнота охвата моделюемої області оцінювання гарантій забезпечується застосуванням онтологічних графів двох видів: об'єктно-орієнтованих та процесно-орієнтованих онтологій.

На другому етапі проводиться функціональне моделювання процеса оцінювання гарантій. Целью функціонального моделювання є формалізоване представлення процеса оцінювання. В ролі мови моделювання була обрана нотація IDEF0 [8]. Нотація IDEF0 дозволяє однозначно відобразити кроки проведення оцінювання (в формі направленого графа), для кожного кроку визначити оцінюване властивість гарантій, свідчівства, необхідні для оцінювання цієї властивості гарантій, об'єктів оцінювання та нормативне основання проведення оцінювання. Якщо оцінці поділить складне (составне) властивість гарантій, то кожний крок (блок IDEF0-диаграмми) може бути декомпозиціонованим для детального опису процедури оцінки цієї властивості.

На третьому етапі для кожного властивості  $p_j$  вводиться лингвістична змінна  $\Omega p_j = \langle \beta, T(\beta), G, M \rangle$  та визначається її терм-множество  $\beta$ . Використання математичного апарату лингвістичних змінних обумовлено тим, що частіше всього ступінь проявлення властивості гарантій не може бути описано з допомогою кількісних показників. Поэтому для вирішення питання про ступінь проявлення властивості гарантій удобно використовувати математичний апарат нечіткого логічного виведення (НЛВ) на основі зараніє підготовленої бази правил [11]. Використання лингвістичних змінних та операцій нечіткого логічного виведення забезпечує виконання вимог об'єктивності та повторюваності результатів оцінювання гарантій.

На четвертому етапі будується діаграми потоків робот в нотації IDEF3. Це дозволяє однозначно встановити порядок та приоритетність виконання операцій (дій) оцінювання. Кожний блок діаграми представляє собою окрему дію експерта-оценівника. Після кожного блока слідує перехрестя, яке визначає критерій (правило) вибору наступної дії в залежності від того, яке рішення буде використане експертом залежно від ступіння проявлення оцінюваної властивості. Кількість варіантів вибору залежить від кількості значень, які можуть бути прийняті лингвістичною змінною, що описує оцінювану властивість. Діаграми

определяют точки, в которых эксперт должен принять решение и вынести вердикт относительно степени проявления того или иного свойства. Построение и применение IDEF3 диаграмм обеспечивает выполнение требования повторяемости результатов оценивания, т. к. для каждой операции оценивания определяется набор вариантов возможных вердиктов (решений) эксперта. Выбор варианта вердикта зависит от того, какие значения принимают лингвистические переменные в ходе оценивания свойств (по сути это выбор эксперта относительно степени проявления свойства).

Таким образом, реализация данного подхода позволяет обеспечить выполнение основных требований к процессу и результатам оценивания гарантій безпеки.

## 2. ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ГАРАНТИЙ

В ходе онтологического анализа требований гарантій необходимо найти консенсус (баланс) между степенью детализации оцениваемых свойств гарантій и стоимостью процесса оценивания. Чем больше глубина оценивания (выше степень детализации), тем выше точность оценки объекта оценки. Однако при этом увеличиваются стоимостные временные показатели процесса оценивания. Низкая детализация требований удешевляет процесс оценивания, однако может привести к затруднениям при принятии реше-

ний о степени проявления оцениваемых свойств и, как следствие, к неправильным выводам.

### 2.1. Задачи онтологического анализа и выбор типа онтологии

Основными задачами онтологического анализа требований гарантій являются:

- точное, ясное и однозначное описание предметной области оценивания гарантій информационной безопасности, выделение основных понятий и концептов;
- четкое определение содержания оценивания;
- определение необходимой глубины оценивания;
- преобразование набора статических требований гарантій в динамическую базу для их использования людьми из разных сфер деятельности и понимания области оценивания;
- представление знаний (требований) области оценивания гарантій в форме, которая позволяет создавать ее электронный аналог.

Анализ структуры требований гарантій [3], где ключевыми *объектами* структуры являются «класс – семейство – компонент – элемент», показал, что для моделирования требований необходимо использовать иерархические объектно-ориентированные графы (онтологии). Пример результата моделирования представлен на рис. 2.

В узлах графа находятся выделенные объекты (класс – семейство – компонент – элемент). Ребра графа показывают связь между объектами. Так, классы гарантій декомпозированы на семейства. Каждое

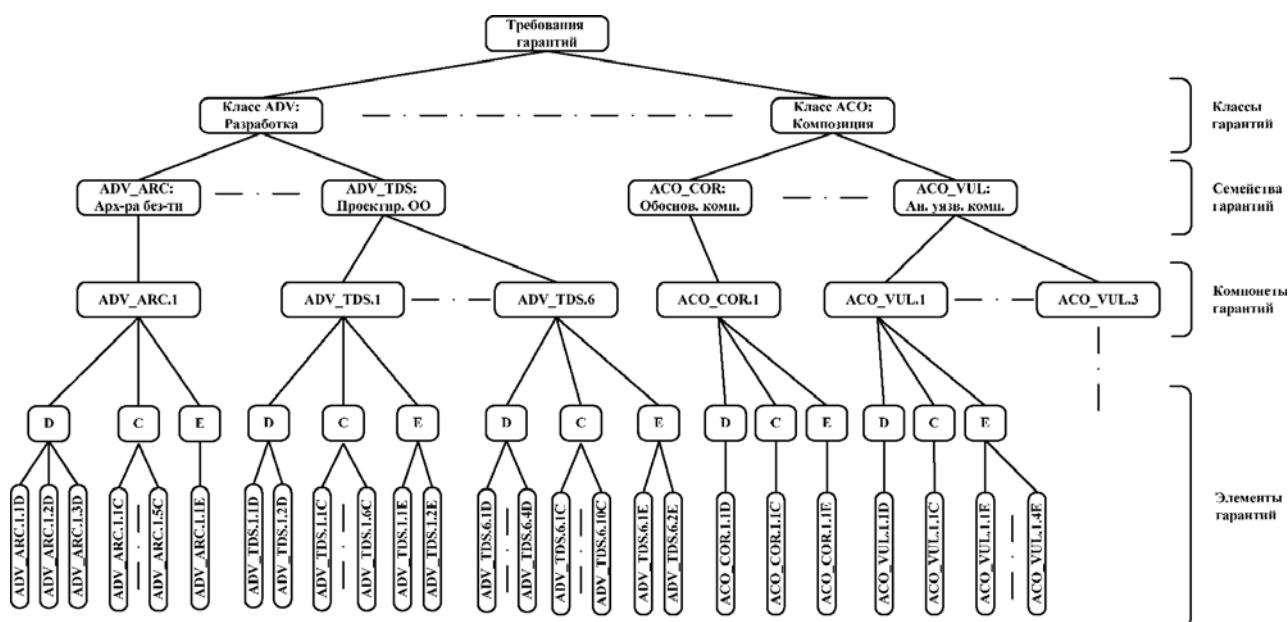


Рис. 2. Иерархическая объектно-ориентированная онтология требований гарантій

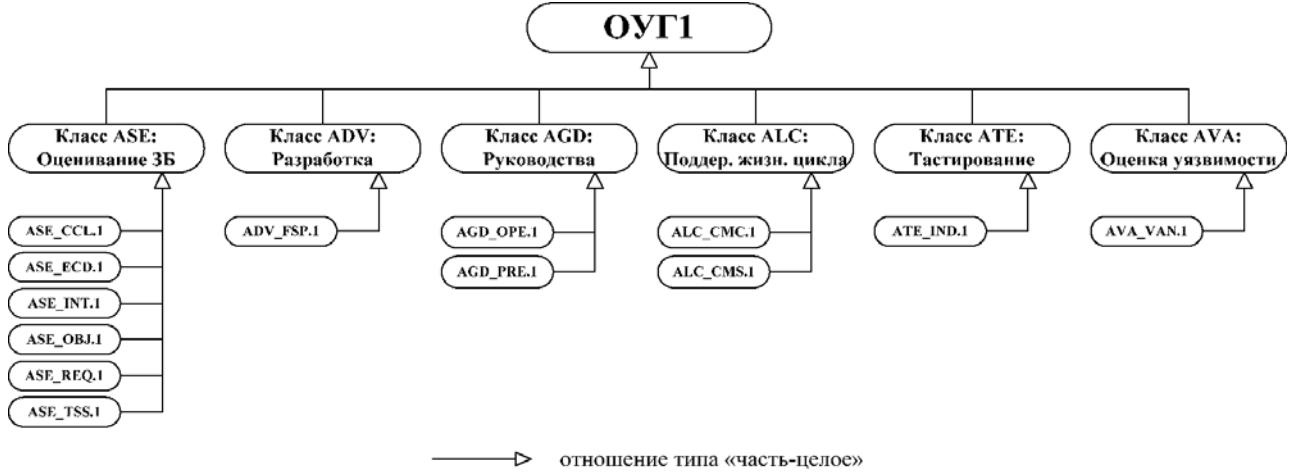


Рис. 3. Иерархическая объектно-ориентированная онтология требований гарантит по ОУГ1

семейство гарантит содержит набор атрибутов, предоставляющих информацию о характеристикике, ранжировании компонентов и особенностях применения семейства. Каждое семейство гарантит содержит множество связанных с ним компонентов. При моделировании компоненты могут быть выражены как субсемейства. На уровне компонентов возможны отношения между компонентами как внутри одного класса, так и межклассовые. Каждый компонент содержит элементы гарантит трех типов: элементы действий разработчика, элементы содержания и представления свидетельств, элементы действий оценщика.

Пример иерархической объектно-ориентированной онтологии требований гарантит по оценочному уровню гарантит 1 (ОУГ1) представлен на рис. 3.

## 2.2. Онтологическая модель области оценивания гарантит

Онтологическая модель области оценивания гарантит включает в себя *объектно-ориентированную онтологическую модель* и *процессно-ориентированную модель* оценивания гарантит информационной безопасности.

### 2.2.1. Способ построения объектно-ориентированной онтологии области оценивания гарантит

Построение объектно-ориентированной онтологии области оценивания гарантит осуществляется в 3 этапа (рис. 4).

I этап. Строится объектно-ориентированный иерархический граф требований гарантит ( $G^R$ ). Определяется степень глубины (уровень детализации) требований. Степень детализации требований определяет

мощность множества свойств гарантит объекта оценки. Выявляются отношения зависимости на множестве требований гарантит и определяется их тип (часть – целое, экзистиональная, каузальная, внутривидовая, межвидовая и т. д.). Формальная запись графа требований гарантит имеет вид

$$G^R = \langle R, Q_R \rangle, \quad (1)$$

где  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  – множество требований гарантит,  $Q_R = \{Q_f[r_i \leftrightarrow r_j]\}$ ,  $f = \overline{1, F}$  – множество отношений на множестве требований гарантит.

II этап. Строится объектно-ориентированный иерархический граф свойств гарантит ( $G^P$ ), которые необходимо оценить. Между иерархиями требований и свойств гарантит устанавливаются отношения (зависимости) ( $D[R \leftrightarrow P]$ ). На основе анализа зависимостей  $Q_R$  определяются зависимости свойств гарантит  $Q_P$ . Зависимости могут как повторяться, так и возникать новые. Определяются сложные свойства гарантит, т. е. такие свойства, для оценки которых необходимо проверить или исследовать множество субсвойств. Формальная запись графа свойств гарантит имеет вид

$$G^P = \langle P, Q_P \rangle, \quad (2)$$

где  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  – множество свойств гарантит,  $Q_P = \{Q_s[p_i \leftrightarrow p_j]\}$ ,  $s = \overline{1, S}$  – множество отношений между свойствами гарантит.

III этап. Строится иерархический граф множества свидетельств ( $G^E$ ), которые получены путем декомпозиции объекта оценки. Для каждого элементарного свойства  $p_i \in P$  определяется множество свидетельств  $E_p = \{e_1, e_2, \dots, e_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$ , которые необходимо исследовать для оценки данного свойства. За-

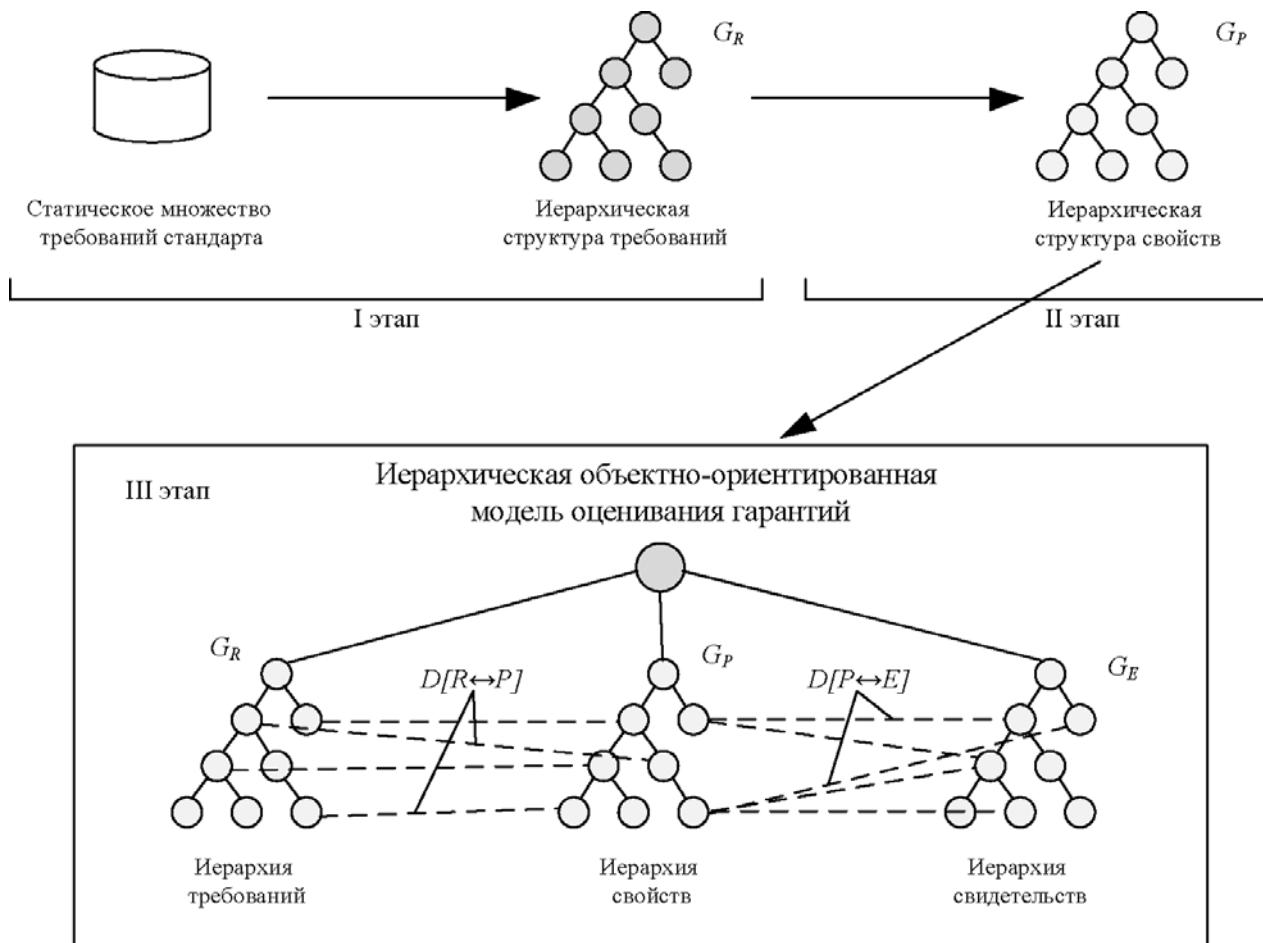


Рис. 4. Объектно-ориентированная модель области оценивания гарантий

вимости между графиками  $G^P$  и  $G^E$  показываются в виде отношений типа «свойство – свидетельство»  $D[PE]$ . Формальная запись графа свидетельств имеет вид

$$G^E = \langle E, Q_E \rangle, \quad (3)$$

где  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_z\}$ ,  $z = \overline{1, Z}$  – множество свидетельств,  $Q_E = \{Q_y[e_i \leftrightarrow e_j]\}$ ,  $y = \overline{1, Y}$  – множество отношений между свидетельствами.

Для сложных свойств соответствие между свидетельствами и свойствами может быть представлено в табличном (табл. 1) или матричном виде (4).

Таблица 1. Соответствие свидетельств и свойств

Сложное свойство, $P$			
$e_i p_j$	$p_1$	$p_2$	$p_3$
$e_1$	1	1	1
$e_2$	0	1	0
$e_3$	1	0	0

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В ячейки таблицы соответствия ставится «1» тогда, когда свидетельству  $e_i$  (строки таблицы) присуще свойство  $p_j$  (столбцы таблицы), то есть когда для оценки свойства  $p_j$ , записанного в столбце, необходимо использовать свидетельство  $e_i$ . В ячейке таблицы записывается «0», если между свидетельством и свойством нет взаимосвязи (соответствия).

Заполнение таблицы соответствия упорядочивает (систематизирует) знания об объекте оценки и позволяет уточнять характеристику оцениваемых свойств. Это в конечном итоге оказывает влияние на объективность оценки свойств гарантий.

Мощность множества требований (свойств, свидетельств), отображаемых с использованием онтологий иерархического типа, может быть определена по формуле

$$W = \sum_i \sum_h \sum_l G^i \cdot S_{h,l}, \quad (5)$$

где  $G^i$  – онтограф  $i$ -го множества,  $i = \overline{1, 3}$ ;  $S_{h,l}$  – степень вершини, равная числу исходящих из нее ребер,  $h = \overline{1, H}$  – количество уровней онтологического графа,  $l = \overline{1, L_h}$  – номер вершины на соответствующем ( $h$ -м) уровне онтологического графа.

Формально, объектно-ориентированная онтология области оценивания гарантий  $\Omega_{ASO}$  имеет вид

$$\Omega_O = \langle G^R, G^P, G^E, D \rangle, \quad (6)$$

где  $G^R$  – объектно-ориентированный онтологический граф множества требований гарантий;  $G^P$  – объектно-ориентированный онтологический граф множества свойств;  $G^E$  – объектно-ориентированный онтологический граф множества свидетельств;  $D = \{D[R \leftrightarrow P], D[P \leftrightarrow E]\}$  – множество отношений типа «требование – свойство» и «свойство – свидетельство».

Таким образом, для каждого свойства гарантий однозначно определяется требование, с которым оно связано, и свидетельство (одно или множество), необходимое для оценки данного свойства.

Пример объектно-ориентированной онтологии по оцениванию документации, которая описывает процедуры установки, генерации и запуска (ПУГЗ), представлен на рис. 5.

### 2.2.2. Способ построения процессно-ориентированной онтологии области оценивания гарантий

Процессно-ориентированная онтология оценивания гарантий строится на основе требований международного стандарта ISO/IEC 18045 [4]. Целью ее построения является определение взаимосвязи между оцениваемыми свойствами и действиями по оценке гарантий безопасности. Построение процессно-ориентированной онтологии осуществляется с учетом результатов, полученных при построении объектно-ориентированной онтологической модели. В качестве входов для выполнения процедуры построения процессно-ориентированной онтологии выступают, в частности, онтологический граф требований  $G^R$ , онтологический граф свойств гарантий  $G^P$  и множество отношений между ними  $D[R \leftrightarrow P]$ .

I этап. Строится онтологический граф действий по оценке гарантий  $G^A$ , определенных в стандарте ISO/IEC 18045 [4]. Определяется множество отношений зависимости  $Q_A$  на множестве действий  $A$ . Формальная запись графа действий имеет вид

$$G^A = \langle A, Q_A \rangle, \quad (7)$$

где  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  – множество действий по оценке гарантий,  $Q_A = \{Q_s[a_i \leftrightarrow a_j]\}$ ,  $s = \overline{1, S}$  – множество отношений между действиями по оценке гарантий.

II этап. Определяется множество зависимостей  $D[R \leftrightarrow A]$  между онтологическими графиками действий  $G^A$  и требований  $G^R$ . Взаимосвязь между структурными компонентами требований гарантий и структурой действий по стандарту ISO/IEC 18045 представлена на рис. 6.

III этап. Определяется множество зависимостей  $D[A \leftrightarrow P]$  между онтологическими графиками действий по оценке гарантий  $G^A$  и свойств гарантий  $G^P$ . Т. к. напрямую данные зависимости определить нельзя, они определяются косвенным путем, т. е. через требования гарантий (рис. 7).

IV этап. Строится онтология субъектов  $G^B$ , вовлеченных в процесс оценивания гарантий информационной безопасности. Формальная запись графа заинтересованных субъектов имеет вид

$$G^B = \langle B, Q_B \rangle, \quad (8)$$

где  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_i\}$ ,  $i = \overline{1, N}$  – множество заинтересованных субъектов,  $Q_B = \{Q_f[b_i \leftrightarrow b_j]\}$ ,  $f = \overline{1, F}$  – множество взаимосвязей между субъектами.

Онтология субъектов, которые принимают участие в процессе обеспечения и оценивания гарантий безопасности, представлена на рис. 8 [13].

Таким образом, формальная запись процессно-ориентированной онтологии оценивания гарантий безопасности  $\Omega_{ASP}$  имеет вид

$$\Omega_P = \langle G^R, G^P, G^A, D, G^B \rangle, \quad (9)$$

где  $G^R$  – онтологический граф множества требований гарантий;  $G^P$  – онтологический график множества свойств;  $G^A$  – онтологический график множества действий по оценке гарантий;  $D = \{D[R \leftrightarrow P], D[R \leftrightarrow A], D[A \leftrightarrow P]\}$  – множество отношений типа «требование – свойство», «требование – действие» и «действие – свойство»;  $G^B$  – онтологический график субъектов, вовлеченных в процесс оценивания гарантий.

Пример процессно-ориентированной онтологии по оцениванию документации, которая описывает ПУГЗ, представлен на рис. 9.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование требований гарантий с использованием аппарата онтологического моделирования дает более глубокое понимание предметной области оце-

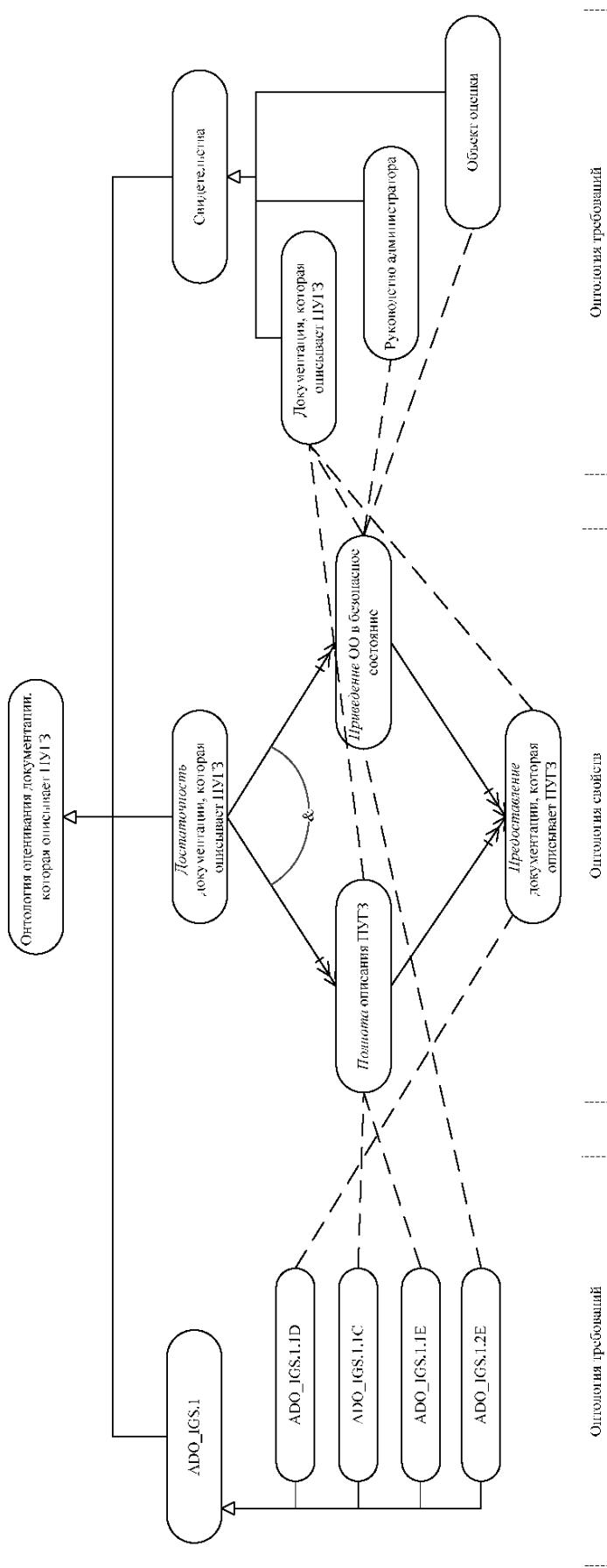


Рис. 5. Объектно-ориентированная онтология по оцениванию документации, которая описывает ПУГ3

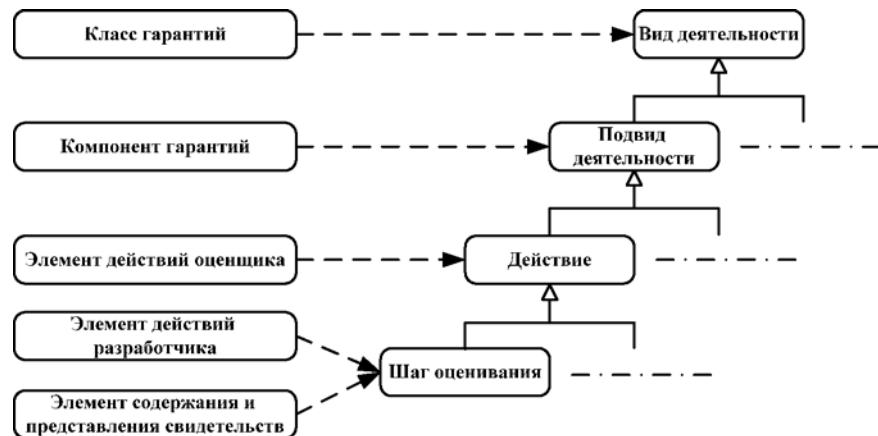


Рис. 6. Соответствие между компонентами требований гарантий и действиями по их оценке

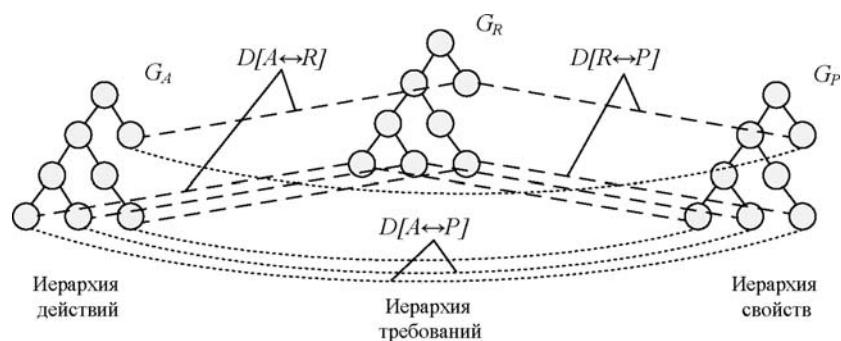


Рис. 7. Модель соответствия действий по оценке и свойств

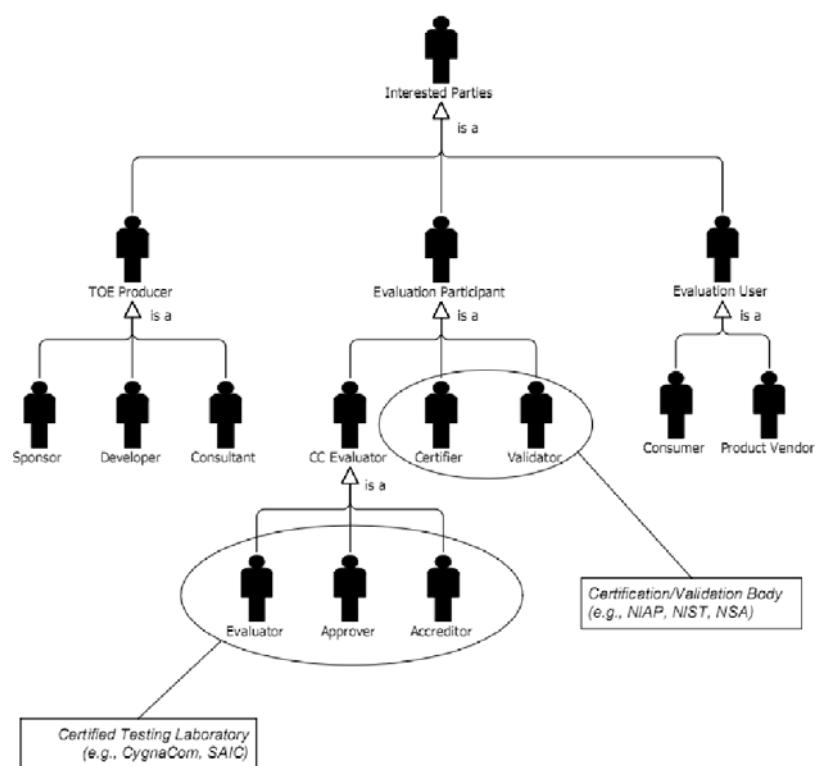


Рис. 8. Онтологія суб’єктів, вовлеченних в процес оцінювання гарантій

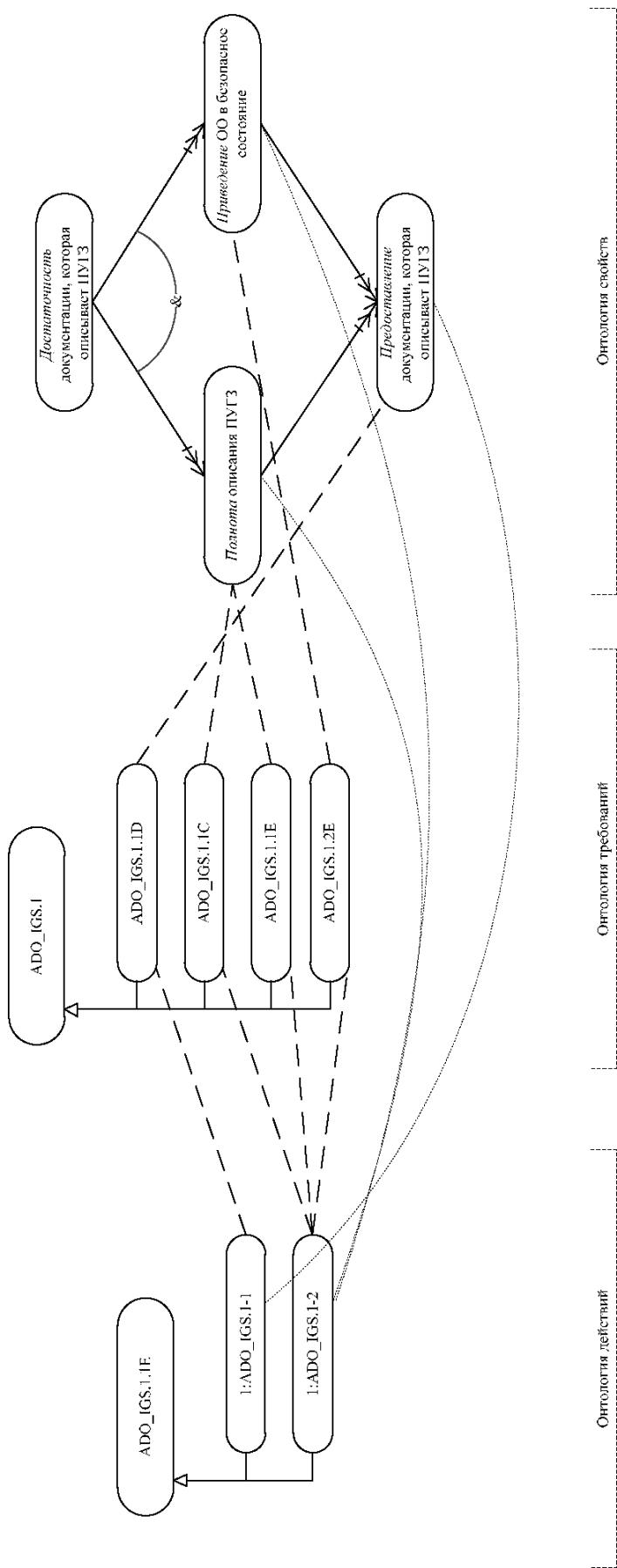


Рис. 9. Процессно-ориентированная онтология по оцениванию документации, которая описывает ПУГ3

нивания и позволяет конкретизировать основные ее понятия и концепты. Построенные онтологии отображают различные типы связей и зависимостей между концептами области (между требованиями гарантий). Построение онтологических моделей требований гарантий направлено на выполнение требований ширины и глубины оценивания гарантий. Результаты онтологического анализа служат основой для разработки программы оценивания требований гарантий.

Применение функционально-лингвистического подхода для оценивания уровня гарантий безопасности позволяет удовлетворить требования как к процессу оценивания (ширина, глубина и строгость), так и к результатам оценивания (объективность, повторяемость, сопоставимость).

Актуальным вопросом остается разработка инструментальных средств поддержки работы эксперта по проведению оценивания гарантий. Предложенный подход служит основой для проектирования таких инструментальных средств. Дальнейшие исследования могут быть направлены на углубление и уточнение этапов подхода, его развитие и практическую реализацию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ISO/IEC 15408-1:2005, Informational technology – Security techniques – Evaluation criteria for IT security – Part 1: Introduction and general model.
- ISO/IEC 15408-2:2005, Informational technology – Security techniques – Evaluation criteria for IT security – Part 2: Security functional requirements.
- ISO/IEC 15408-3:2005, Informational technology – Security techniques – Evaluation criteria for IT security – Part 3: Security assurance requirement.
- ISO/IEC 18045:2005, Informational technology – Security techniques – Methodology for IT security evaluation.
- Критерії оцінки захищеності інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу : НД ТЗІ 2.5-004-99. – [Чинний від 1999-04-22]. – К. : ДСТСЗІ СБ України, 1999. – 53 с. – (Нормативний документ системи технічного захисту інформації).
- Методичні вказівки з оцінювання функціональних послуг безпеки в засобах захисту інформації від несанкціонованого доступу : НД ТЗІ 2.7-009-09. – [Чинний від 2009-07-24]. – К. : Адміністрація держспецзв'язку, 2009. – 171 с. – (Нормативний документ системи технічного захисту інформації).
- Методичні вказівки з оцінювання рівня гарантій коректності реалізації функціональних послуг безпеки в засобах захисту інформації від несанкціонованого доступу : НД ТЗІ 2.7-010-09. – [Чинний від 2009-07-24]. – К. : Адміністрація держспецзв'язку, 2009. – 131 с. – (Нормативний документ системи технічного захисту інформації).
- Потій, А. В. IDEF моделі процесса оцінки рівня гарантій безпеки / А. В. Потій, Д. С. Комін // Труды Научно-технической конференции с международным участием «Компьютерное моделирование в научноемких технологиях» (КМНТ-2010), Харьков, 18–21 мая 2010 г. – Х. : ХНУ, 2010 – С. 284–287.

- Потій, А. В. Функціонально-лингвістичний підхід до оцінки гарантій інформаційної безпеки / А. В. Потій, Д. С. Комін // Тезиси докладів XIII Міжнародної науково-практическої конференції «Безпека інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах», Київ, 18–21 мая 2010 г. – К. : ГСССЗІ, 2010 – С. 88.
- Потій, А. В. Застосування функціонально-лингвістичного підходу для оцінювання гарантій інформаційної безпеки / А. В. Потій, Д. С. Комін // Спеціальні телекомунікаційні системи та захист інформації. – 2010. – № 1(17). – С. 24–31.
- Потій, А. В. Нечеткий логіческий вывод в задачах оценки уровня гарантій безопасности / А. В. Потій, Д. С. Комін // Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», Запоріжжя, 22–24 вересня 2010 р. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2010 – С. 121–123.
- Information Integration for Concurrent Engineering (IICE). IDEF5 Method Report [Електронний ресурс] / Knowledge Based Systems, Inc. – Електрон. дан. – Texas : Knowledge Based Systems , 1994. – Режим доступу: <http://www.idef.com/pdf/Idef5.pdf>, вільний. – Англ.
- Prieto-Diaz, R. The Common Criteria Evaluation Process. Process Explanation, Shortcomings, and Research Opportunities [Електронний ресурс] / Ruben Prieto-Diaz. – Електрон. дан. – Harrisonburg : Commonwealth Information Security Center Technical Report Series / Series Editor Samiel T. Redwine, Jr.) – Режим доступу: <https://users.cs.jmu.edu/prietorx/Public/CCevaluationProcessTR03-5.pdf>, вільний. – Англ.

Надійшла 17.11.2010

Потій О. В., Комін Д. С.

## ОНТОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОЦІНЮВАННЯ ГАРАНТІЙ В КОНТЕКСТІ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ЛІНГВІСТИЧНОГО ПІДХОДУ

Пропонується функціонально-лингвістичний підхід до оцінювання гарантій безпеки. Наводиться методика та результати онтологічного аналізу предметної області оцінювання гарантій. Обґрутовується актуальність застосування апарату онтологічного моделювання для завдань оцінювання безпеки.

**Ключові слова:** гарантії, оцінювання, онтологічне моделювання, функціональне моделювання, лінгвістичні змінні.

Potij A. V., Komin D. S.

## ONTOLOGICAL MODELING OF ASSURANCE EVALUATION IN THE CONTEXT OF FUNCTIONAL-LINGUISTIC APPROACH

The functional-linguistic approach to security assurance evaluation is proposed. The procedure and results of assurance evaluation ontological analysis are described. Ontological modeling application to security evaluation is justified.

**Key words:** assurance, evaluation, ontological modeling, functional modeling, linguistic variables.

УДК 519.832.3

Романюк В. В.

Канд. техн. наук, доцент Хмельницького національного університету

## РОЗ'ЯЗУВАННЯ НЕЧІТКОЇ АНТАГОНІСТИЧНОЇ $2 \times 2$ -ГРИ

Представлено концепцію розв'язування антагоністичної  $2 \times 2$ -гри, елементи матриці якої задаються у формі неодноелементних множин. Показано, що розв'язком такої нечіткої гри може бути спеціальний перетин розв'язків усіх звичайних  $2 \times 2$ -ігор, елементи матриць яких утворюють ці множини. Для випадків, коли такий перетин виявиться порожнім, пропонується використання нечіткого розв'язку нечіткої  $2 \times 2$ -гри. За умови неприйнятності подібного розв'язку будеться безкоаліційна метагра, розв'язок якої міститиме оптимальні поведінки обох гравців у вихідній нечіткій  $2 \times 2$ -гри.

**Ключові слова:** моделювання в умовах невизначеності, прийняття рішень в умовах невизначеності, нечітка  $2 \times 2$ -гра, безкоаліційна метагра, оптимальна поведінка.

### ВСТУП

Прийняття рішень і моделювання в умовах невизначеності [1, 2] є звичною справою, якщо ставиться задача описати і дослідити певне явище або процес з достатньою для практики точністю й адекватністю. Там, де доводиться оцінювати параметри досліджуваного об'єкта, котрі не залежать один від одного і задані у формі інтервалів ненульової міри, застосовані принципи інтервального аналізу [3, 4]. Проте у випадках, коли хоча б два параметри досліджуваного об'єкта є взаємозалежними (не у строго функціональному сенсі), треба адаптовувати методи інтервального аналізу до відповідних нестрого функціональних залежностей. Подібні проблеми виникають і в задачах оптимального керування, частинним випадком яких є ігрові антагоністичні моделі [5], параметри яких задаються нечітко (або ж, іншими словами, ці параметри не можуть бути чітко, у формі точкового значення, оцінені).

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання нечіткого моделювання і прийняття рішень в умовах повної або часткової невизначеності досить грунтовно розглядаються в [1, 2, 6, 7]. Утім, розв'язування ігрових антагоністичних моделей, у яких задані на інтервалах параметри не мають відповідних імовірнісних мір, є невирішеною задачею. Одним зі способів локалізації або точкового оцінювання таких інтервальних параметрів є застосування розв'язку відповідної антагоністичної гри, ядро якої задається на квадраті можливих пар значень параметра, де мінімізуються втрати від некоректної точкової оцінки [8, 9]. Та цей спосіб є занадто пессимістичним. Більш того, при розв'язуванні елементарних антагоністичних ігор, тобто  $2 \times 2$ -ігор, де

принаймні один з чотирьох елементів матриці гри заданий у формі інтервалу (або сегмента), варто враховувати, що розв'язок матричної гри нетривіальним чином залежить від інтервальних елементів матриці гри [5, 8, 10]. Все це стимулює до формулювання більш простих або до вироблення менш неявних принципів розв'язування матричних ігор з інтервальними (нечіткими) елементами (нечітких ігор). І слід почати, очевидно, з розв'язування нечітких антагоністичних  $2 \times 2$ -ігор.

### ФОРМУЛОВАННЯ МЕТИ ТА ЗАВДАНЬ СТАТТІ

Розв'язок  $2 \times 2$ -гри позначатимемо як  $S = \langle \mathbf{P}_{\text{opt}}, \mathbf{Q}_{\text{opt}} \rangle$  з оптимальними стратегіями первого

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_{\text{opt}} &= \left[ p_{\text{opt}} \ 1 - p_{\text{opt}} \right] \in \\ &\in \{ \mathbf{P} = [p \ 1 - p] \in \mathbb{R}^2 \mid p \in [0; 1] \} \end{aligned} \quad (1)$$

та другого

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{\text{opt}} &= \left[ q_{\text{opt}} \ 1 - q_{\text{opt}} \right] \in \\ &\in \{ \mathbf{Q} = [q \ 1 - q] \in \mathbb{R}^2 \mid q \in [0; 1] \} \end{aligned} \quad (2)$$

гравців відповідно. Вважатимемо, що порядок слідування елементів множини  $S = \langle \mathbf{P}_{\text{opt}}, \mathbf{Q}_{\text{opt}} \rangle$  міняти не можна, а усі операції над такими множинами (кортежами) мають здійснюватись окремо для кожного з двох їх елементів. В результаті проведення операцій над множинами виду  $S = \langle \mathbf{P}_{\text{opt}}, \mathbf{Q}_{\text{opt}} \rangle$  з'являтимуться двоелементні кортежі, першим елементом яких буде множина з частин оптимальних стратегій первого гравця, а другим – множина з частин оптимальних стратегій другого гравця. Поставимо за мету формалізувати випадок, коли принаймні один з чотирьох елементів матриці  $2 \times 2$ -гри заданий у формі неодноелементної множини (заданий нечітко, але не на

нечіткій множині). Слід запропонувати концепцію розв'язування таких елементарних антагоністичних ігор, де принаймні один з чотирьох елементів матриці  $2 \times 2$ -гри задається нечітко.

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

**Означення 1.** Матричну  $2 \times 2$ -гру з ядром

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

називемо нечіткою, якщо  $\exists i \in \{1, 2\}$  та  $\exists j \in \{1, 2\}$  такі, що  $a_{ij} \in A_{ij}$  при  $|A_{ij}| > 1$ .

**Зауваження 1.** Якщо усі чотири множини із  $\left\{ \{A_{ij}\}_{i=1}^2 \right\}_{j=1}^2$  є скінченими, то нечітку  $2 \times 2$ -гру

можна називати дискретно нечіткою.

**Зауваження 2.** По аналогії з визначенням цілком змішаної гри (або цілком змішаної стратегії гравця) нечітку  $2 \times 2$ -гру, у якій  $|A_{ij}| > 1$  виконується  $\forall i = \overline{1, 2}$  та  $\forall j = \overline{1, 2}$ , називатимемо цілком нечіткою.

**Зауваження 3.** У випадку, коли у системі  $\left\{ \{A_{ij}\}_{i=1}^2 \right\}_{j=1}^2$  знайдеться хоча б одна одноелемен-тна множина, відповідну нечітку  $2 \times 2$ -гру можна називати локально нечіткою. Поняття глобально нечіткої  $2 \times 2$ -гри, зрозуміло, співпадає з поняттям цілком нечіткої  $2 \times 2$ -гри.

**Зауваження 4.** Тривіальна локально нечітка  $2 \times 2$ -гра є найпростішою (елементарною) нечіткою  $2 \times 2$ -грою, де лише одна множина із  $\left\{ \{A_{ij}\}_{i=1}^2 \right\}_{j=1}^2$  містить лише два елементи, а решта множин є одноДелементними.

**Означення 2.** Якщо  $A_{ij} = [a_{ij}^{(1)}; a_{ij}^{(2)}]$  і різниця  $a_{ij}^{(2)} - a_{ij}^{(1)}$  є постійною  $\forall i = \overline{1, 2}$  та  $\forall j = \overline{1, 2}$ , то  $2 \times 2$ -гру називемо нечіткою з радіусом нечіткості  $r = \frac{a_{ij}^{(2)} - a_{ij}^{(1)}}{2}$ .

**Зауваження 5.** У випадку, коли  $2 \times 2$ -гра є дискретно нечіткою й  $A_{ij} = \{a_{ij}^{(1)}, a_{ij}^{(2)}\}$  при  $a_{ij}^{(1)} - a_{ij}^{(2)}$   $\forall i = \overline{1, 2}$  та  $\forall j = \overline{1, 2}$  з постійною різницею  $a_{ij}^{(2)} - a_{ij}^{(1)}$ , теж можна вести мову про застосування означення 2. Крім того, кожна множина  $A_{ij}$ , будучи скінченою, може містити більше двох елементів, але так, що  $\min A_{ij} = a_{ij}^{(1)}$  та  $\max A_{ij} = a_{ij}^{(2)}$ . Тоді й

тут ніщо не перешкоджатиме оперувати радіусом нечіткості  $r = \frac{a_{ij}^{(2)} - a_{ij}^{(1)}}{2}$ , причому навіть там, де потужності множин у системі  $\left\{ \{A_{ij}\}_{i=1}^2 \right\}_{j=1}^2$  будуть різними.

Тепер час означити те, що надалі вважатимемо розв'язком нечіткої  $2 \times 2$ -гри.

**Означення 3.** Якщо  $S(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22})$  є розв'язком  $2 \times 2$ -гри з матрицею (3), то розв'язком нечіткої  $2 \times 2$ -гри називемо множину (кортеж)

$$\begin{aligned} \bar{S}(A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}) &= \\ &= \bigcap_{a_{11} \in A_{11}} \bigcap_{a_{12} \in A_{12}} \bigcap_{a_{21} \in A_{21}} \bigcap_{a_{22} \in A_{22}} S(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}) = \\ &= \langle \bar{P}_{\text{opt}}, \bar{Q}_{\text{opt}} \rangle. \end{aligned} \quad (4)$$

**Зауваження 6.** Зрозуміло, що далеко не кожна нечітка  $2 \times 2$ -гра має непорожній розв'язок. Розглянемо хоча б локально нечітку гру з ядром

$$\begin{pmatrix} a_{11} & 4 \\ 3 & 5 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

у якому  $a_{11} = \{a_{11}^{(1)}, a_{11}^{(2)}\}$  (приклад гри з тривіальною нечіткістю). Тут

$$p_{\text{opt}} = \frac{5-3}{a_{11} + 5 - 3 - 4} = \frac{2}{a_{11} - 2}$$

при  $a_{11} \geq 4$ , при  $a_{11} \in (3; 4)$  імовірність  $p_{\text{opt}} = 1$ , при  $a_{11} = 3$  імовірність  $p_{\text{opt}} \in \{1, 0\}$ , а при  $a_{11} < 3$  імовірність  $p_{\text{opt}} = 0$ . Також

$$q_{\text{opt}} = \frac{5-4}{a_{11} + 5 - 3 - 4} = \frac{1}{a_{11} - 2}$$

при  $a_{11} \geq 4$ , а при  $a_{11} < 4$  імовірність  $p_{\text{opt}} = 1$ . І, очевидно, що, скажімо, для  $a_{11} \in \{3.5, 4.5\}$  розв'язок нечіткої  $2 \times 2$ -гри з матрицею (5)

$$\begin{aligned} \bigcap_{a_{11} \in \{3.5, 4.5\}} S(a_{11}, 4, 3, 5) &= \langle \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \rangle \cap \\ &\cap \langle \left[ \frac{2}{4.5-2} 1 - \frac{2}{4.5-2} \right], \left[ \frac{1}{4.5-2} 1 - \frac{1}{4.5-2} \right] \rangle = \\ &= \langle \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 5 & 5 \end{bmatrix} \rangle \cap \langle \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 5 \end{bmatrix} \rangle = \\ &= \langle \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \cap \left\{ \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 5 & 5 \end{bmatrix} \right\}, \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \cap \left\{ \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 5 \end{bmatrix} \right\} \rangle = \\ &= \langle \emptyset, \emptyset \rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

Означивши розв'язок нечіткої  $2 \times 2$ -гри, дамо твердження про необхідну умову того, щоб він був непорожнім.

**Теорема 1.** Для того, щоб розв'язок (4) нечіткої  $2 \times 2$ -гри був непорожнім, необхідно, щоб кожен розв'язок  $S(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22})$  був у чистих стратегіях.

**Доведення.** Нехай матрицею  $2 \times 2$ -гри є (3), де немає сідлових точок у чистих стратегіях, а оптимальними стратегіями першого та другого гравців є (1) і (2) відповідно, причому для визначеності вважатимемо, що оптимальна імовірність

$$p_{\text{opt}} = \frac{a_{22} - a_{21}}{a_{11} + a_{22} - a_{21} - a_{12}}$$

вибору першим гравцем його першої чистої стратегії належить інтервалу  $(0;1)$ . Власне, це означає, що оптимальна стратегія першого гравця є змішаною (або, що характерне для ігор з двома чистими стратегіями даного гравця, є цілком змішаною). При зміні одного

зі значень  $\left\{ \{a_{ij}\}_{i=1}^2 \right\}_{j=1}^2$  імовірність  $p_{\text{opt}}$  буде змінюватись також. Виключення становитиме випадок, коли  $a_{11} = a_{12}$  і змінюватиметься  $a_{21}$  або  $a_{22}$ . Але тоді  $p_{\text{opt}} = 1$  (вибір першої чистої стратегії першим гравцем) або  $p_{\text{opt}} = 0$ , а

$$q_{\text{opt}} = \frac{a_{22} - a_{12}}{a_{11} + a_{22} - a_{21} - a_{12}} = \frac{a_{22} - a_{12}}{a_{22} - a_{21}}$$

змінюватиметься при  $a_{12} \neq a_{21}$  (без втрати загальності). Якщо ж  $a_{12} = a_{21}$ , то  $q_{\text{opt}} = 1$  і гра міститиме сідлову точку у чистих стратегіях. Отже, якщо  $2 \times 2$ -гра розв'язуватиметься у змішаних стратегіях, то кожен раз буде нова множина із множин оптимальних стратегій гравців. Перетин таких множин, очевидно, буде порожнім. Теорему доведено.

Дамо тепер таке означення, що має відношення до непорожнього розв'язку нечіткої  $2 \times 2$ -гри.

**Означення 4.** Розв'язок  $2 \times 2$ -гри з матрицею (3) назовемо стійким з радіусом  $r$ , якщо відповідна нечітка  $2 \times 2$ -гра з елементами  $a_{ij} \in [\tilde{a}_{ij} - r; \tilde{a}_{ij} + r]$  має непорожній розв'язок.

Відповідь на питання про існування розв'язків у чистих стратегіях певного класу нечітких  $2 \times 2$ -ігор дає наступне твердження.

**Теорема 2.** Для довільної  $2 \times 2$ -гри, елементи  $\left\{ \{a_{ij}\}_{i=1}^2 \right\}_{j=1}^2 = \{a, b, c, d\}$  матриці якої є різними, з розв'язком у чистих стратегіях знайдеться  $r > 0$  таке, що відповідна нечітка  $2 \times 2$ -гра розв'язуватиметься у чистих стратегіях. При цьому, якщо для визначеності покладати

$$a < b < c < d, \quad (7)$$

значення  $r \in (0; r_{\max})$  при

$$r_{\max} = \min \left\{ \frac{b-a}{2}, \frac{c-b}{2}, \frac{d-c}{2} \right\}. \quad (8)$$

**Доведення.** Нехай  $a < b < c < d$  і відповідна  $2 \times 2$ -гра має сідлову точку у чистих стратегіях. Зрозуміло, що при заміні  $a$  на  $a_1$ ,  $b$  на  $b_1$ ,  $c$  на  $c_1$ ,  $d$  на  $d_1$  такій, що

$$a_1 < b_1 < c_1 < d_1, \quad (9)$$

сідлова точка не зміниться. Візьмемо деяке  $r > 0$  і вимагатимемо, щоб

$$a + r < b - r, \quad b + r < c - r, \quad c + r < d - r.$$

Тоді

$$\begin{aligned} a_1 &= a + r, & b_1 &\in [b - r; b + r], \\ c_1 &\in [c - r; c + r], & d_1 &= d - r \end{aligned}$$

і буде виконуватись (9). Маємо

$$r < \frac{b - a}{2}, \quad (10)$$

$$r < \frac{c - b}{2}, \quad (11)$$

$$r < \frac{d - c}{2}. \quad (12)$$

Оскільки усі елементи множини  $\{a, b, c, d\}$  є різними і, взагалі, має місце (7), то праві частини у (10)–(12) є додатними, і розв'язком системи нерівностей (10)–(12) разом із умовою  $r > 0$  є множина

$$\left( 0; \min \left\{ \frac{b-a}{2}, \frac{c-b}{2}, \frac{d-c}{2} \right\} \right). \quad (13)$$

Теорему доведено.

Звісно, тоді, коли нечітка  $2 \times 2$ -гра не має розв'язку, слід визначати її розв'язок в іншій формі.

**Означення 5.** Нечітким розв'язком нечіткої  $2 \times 2$ -гри назовемо множину (кортеж)

$$\begin{aligned} \tilde{S}(A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}) &= \\ &= \bigcup_{a_{11} \in A_{11}} \bigcup_{a_{12} \in A_{12}} \bigcup_{a_{21} \in A_{21}} \bigcup_{a_{22} \in A_{22}} S(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}) = \\ &= \langle \tilde{P}_{\text{opt}}, \tilde{Q}_{\text{opt}} \rangle. \end{aligned} \quad (14)$$

**Зауваження 7.** До такого типу розв'язку доводиться звертатись, якщо  $S(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22})$  є розв'язком  $2 \times 2$ -гри з матрицею (3) і  $\tilde{S}(A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}) = \langle \emptyset, \emptyset \rangle$ . Проте про практичну «сумісність» нечіткого розв'язку (14) може йти тільки у випадках зв'язності множин оптимальних імовірностей  $p_{\text{opt}}$  та  $q_{\text{opt}}$  як елементів кортежу  $\tilde{S}(A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22})$  з умовою того, що їх лебегівська міра на числовий прямій буде набагато меншою

за одиницю. У випадку незв'язності одного з елементів кортежу  $\tilde{S}(A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22})$  використання концепції нечіткого розв'язку нечіткої  $2 \times 2$ -гри представляється скрутним. Повертаючись до прикладу локально нечіткої гри з ядром (5), для якої незв'язність множин у кортежі

$$\begin{aligned} \tilde{S}(A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}) &= \\ &= \langle \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \rangle \cup \langle \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 5 & 5 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 5 \end{bmatrix} \rangle = \\ &= \langle \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \cup \left\{ \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 5 & 5 \end{bmatrix} \right\}, \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \cup \left\{ \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 5 & 5 \end{bmatrix} \right\} \rangle \end{aligned}$$

очевидна, тобто перший гравець має брати  $p_{\text{opt}} \in \left\{ \frac{4}{5}, 1 \right\}$ , а другий – має брати  $q_{\text{opt}} \in \left\{ \frac{2}{5}, 1 \right\}$ , можна говорити про неприйнятно велику відстань між елементами множини  $\left\{ \frac{2}{5}, 1 \right\}$  (навіть відносно її першого елемента). Для множини  $\left\{ \frac{4}{5}, 1 \right\}$  першого гравця відносна відстань між її елементами є значно меншою, тому нечіткий розв'язок тут є більш прийнятним для першого гравця.

Взагалі кажучи, прийнятність нечіткої множини оптимальних стратегій (у формі оптимальних імовірностей вибору першої чистої стратегії) гравця визначається різницею між її максимальним і мінімальним значеннями. Зокрема, чим менша різниця  $\sup \tilde{P}_{\text{opt}} - \inf \tilde{P}_{\text{opt}}$ , тим більш прийнятною для першого гравця є нечітка множина  $\tilde{P}_{\text{opt}}$ . Аналогічно і з різницею  $\sup \tilde{Q}_{\text{opt}} - \inf \tilde{Q}_{\text{opt}}$  для другого гравця. Зрозуміло, що для зв'язних елементів кортежу (14) замість таких різниць, строго кажучи, слід використовувати лебегівську міру відповідних множин. Тільки тоді можна вести мову про прийнятність не тільки самої концепції нечітких розв'язків у нечітких  $2 \times 2$ -іграх, а й про використання цієї концепції.

Проте, з іншого боку, використання гравцями елементів нечітких множин  $\tilde{P}_{\text{opt}}$  та  $\tilde{Q}_{\text{opt}}$  у кортежі (14) породжуватиме свою гру, розв'язавши яку, вже можна буде не турбуватись про ступінь прийнятності використання нечіткого розв'язку  $\langle \tilde{P}_{\text{opt}}, \tilde{Q}_{\text{opt}} \rangle$ . Чистою стратегією кожного гравця у такій грі, котра, у певному смислі, стане вже метагрою по відношенню до вихідної нечіткої  $2 \times 2$ -гри, буде припущення про те, що матрицею  $2 \times 2$ -гри є елемент множини

$$\left\{ \left\{ \left\{ \left( \begin{array}{cc} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{array} \right) \right\}_{a_{11} \in A_{11}} \right\}_{a_{12} \in A_{12}} \right\}_{a_{21} \in A_{21}} \right\}_{a_{22} \in A_{22}} \quad (15)$$

з відповідними розв'язком

$$\begin{aligned} S(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}) &= \\ &= \langle \mathbf{P}_{\text{opt}}(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}), \mathbf{Q}_{\text{opt}}(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}) \rangle. \quad (16) \end{aligned}$$

При цьому, очевидно, перший гравець робитиме свої припущення незалежно від другого і навпаки. Якщо обидва гравці одночасно «подумали» про одну й ту саму матрицю

$$\begin{aligned} &\left\{ \left( \begin{array}{cc} a & b \\ c & d \end{array} \right) \right\} \in \\ &\in \left\{ \left\{ \left\{ \left( \begin{array}{cc} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{array} \right) \right\}_{a_{11} \in A_{11}} \right\}_{a_{12} \in A_{12}} \right\}_{a_{21} \in A_{21}} \right\}_{a_{22} \in A_{22}}, \quad (17) \end{aligned}$$

то це ще означає, що перший гравець отримає виграш

$$\begin{aligned} v_{\text{opt}}(a, b, c, d) &= \\ &= [\mathbf{P}_{\text{opt}}(a, b, c, d)] \cdot \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot [\mathbf{Q}_{\text{opt}}(a, b, c, d)]^T, \quad (18) \end{aligned}$$

а другий гравець стільки ж програє. В описуваній метагрі з'явиться ще один гравець – «природа» або непередбачувані «випадкові обставини», які зумовлять у момент часу обирання гравцями їх чистих стратегій (про обирання змішаних стратегій у певний момент часу говорити складно) той чи інший елемент множини (15) як матрицю (з фіксованими елементами)  $2 \times 2$ -гри. Наприклад, у локально нечіткій грі з ядром (5), у якому  $a_{11} \in \{3.5, 4.5\}$ , кожен з двох гравців і «природа» у певний момент часу можуть вибирати тільки одну з двох матриць

$$\left\{ \left( \begin{array}{cc} 3.5 & 4 \\ 3 & 5 \end{array} \right), \left( \begin{array}{cc} 4.5 & 4 \\ 3 & 5 \end{array} \right) \right\}.$$

Тут, як метагра по відношенню до вихідної нечіткої  $2 \times 2$ -гри, породжується діадична гра [8, 11, 12] трьох осіб.

Взагалі кажучи, породженою метагрою по відношенню до вихідної нечіткої  $2 \times 2$ -гри буде безкоаліційна  $(|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|) \times (|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|) \times$

$\times (|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|)$ -гра трьох осіб. Якщо через  $\mathbf{M}_h$  позначати чисту стратегію  $h$ -го гравця як елемент множини (15),  $\mathbf{P}_{\text{opt}}(\mathbf{M}_1)$  та  $\mathbf{Q}_{\text{opt}}(\mathbf{M}_2)$  – як оптимальні стратегії в  $\mathbf{M}_1$ -грі та  $\mathbf{M}_2$ -грі відповідно, то у такій метагрі функція виграшу першого гравця

$$\begin{aligned} K_1(\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3) &= \\ &= \mathbf{P}_{\text{opt}}(\mathbf{M}_1) \cdot \mathbf{M}_3 \cdot [\mathbf{Q}_{\text{opt}}(\mathbf{M}_2)]^T, \end{aligned} \quad (19)$$

функція виграшу другого гравця

$$\begin{aligned} K_2(\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3) &= \\ &= -\mathbf{P}_{\text{opt}}(\mathbf{M}_1) \cdot \mathbf{M}_3 \cdot [\mathbf{Q}_{\text{opt}}(\mathbf{M}_2)]^T = \\ &= -K_1(\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3), \end{aligned} \quad (20)$$

а функцію виграшу третього гравця («природи») можна покласти тотожною нулю:

$$\begin{aligned} K_3(\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3) &= 0, \\ \forall \mathbf{M}_h \in \left\{ \left\{ \left\{ \left( \begin{array}{cc} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{array} \right) \right\}_{a_{11} \in A_{11}} \right\}_{a_{12} \in A_{12}} \right\}_{a_{21} \in A_{21}} \right\}_{a_{22} \in A_{22}}, \\ h = \overline{1, 3}. \end{aligned} \quad (21)$$

Очевидно, що для скінчених множин  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{21}$ ,  $A_{22}$  функції виграшів (19)–(21) можна представити у формі тривимірних

$$\begin{aligned} (|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|) \times (|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|) \times \\ \times (|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|) - \text{матриця}, \end{aligned}$$

але, зважаючи на (20) і (21), можна обмежитись однією

$$\begin{aligned} (|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|) \times (|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|) \times \\ \times (|A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|) - \text{матрицею} \end{aligned}$$

$\mathbf{K} = [k_{m_1 m_2 m_3}]_{G \times G \times G}$  з елементами

$$\begin{aligned} k_{m_1 m_2 m_3} &= \mathbf{P}_{\text{opt}}(\mathbf{M}_1^{(m_1)}) \cdot \mathbf{M}_3^{(m_3)} \cdot [\mathbf{Q}_{\text{opt}}(\mathbf{M}_2^{(m_2)})]^T, \\ m_h &= \overline{1, G} \quad \forall h = \overline{1, 3}, \end{aligned} \quad (22)$$

де

$$G = |A_{11}| \cdot |A_{12}| \cdot |A_{21}| \cdot |A_{22}|$$

й

$$\begin{aligned} \left\{ \mathbf{M}_h^{(m_h)} \right\}_{m_h=1}^G &= \\ &= \left\{ \left\{ \left\{ \left( \begin{array}{cc} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{array} \right) \right\}_{a_{11} \in A_{11}} \right\}_{a_{12} \in A_{12}} \right\}_{a_{21} \in A_{21}} \right\}_{a_{22} \in A_{22}}. \end{aligned}$$

Так само можна обмежитись лише функцією (19) у випадку, коли принаймні одна з множин системи  $\left\{ \{A_{ij}\}_{i=1}^2 \right\}_{j=1}^2$  є нескінченною.

Отже, нечітка  $2 \times 2$ -гра з множиною (15) усіх можливих «чітких»  $2 \times 2$ -матриць за умови порожнього кортежу (4) і неприйнятності нечіткого розв'язку (14) породжуватиме безкоаліційну  $G \times G \times G$ -гру (метагру) з ядром (19) при штучному покладанні (21). Розв'язок цієї метагри міститиме оптимальну поведінку обох гравців в умовах ведення вихідної нечіткої  $2 \times 2$ -гри.

## ВИСНОВОК ТА ПЕРСПЕКТИВА ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Звичайно, питання про впроваджуваність розв'язку безкоаліційної  $G \times G \times G$ -метагри є відкритим і далеко не тривіальним [8, 11, 12]. Можливо, у деяких ситуаціях практичне використання цього розв'язку [13, 14] виявиться настільки незрозумілим (адже можна йтише як про імовірності вибору чистих стратегій – матриць, так і про відому неоднозначність ситуацій рівноваги у безкоаліційних іграх), що буде варто шукати способи усунення «нечіткості» у  $2 \times 2$ -гри (прямого, «негрового») перетворення нечіткої  $2 \times 2$ -гри у «чітку»). Але запропонована концепція розв'язку (4) нечіткої  $2 \times 2$ -гри та її нечіткого розв'язку (14) з можливим розв'язуванням безкоаліційної  $G \times G \times G$ -метагри має фундаментальне значення для ігрових методів моделювання в умовах невизначеності. У перспективі, звісно, слід зайнятися формулюванням відповідних положень для матричних ігор більших і, взагалі кажучи, довільних форматів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Трухаев, Р. И. Модели принятия решений в условиях неопределенности / Трухаев Р. И. – М. : Наука, 1981. – 258 с.
2. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений / Черноруцкий И. Г. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 416 с. : ил.
3. Caprani, O. Introduction to Interval Analysis / O. Caprani, K. Madsen, H. B. Nielsen. – IMM, DTU, 2002. – 82 р.
4. Больщаков, А. А. Методы обработки многомерных данных и временных рядов : [учебное пособие для вузов] / А. А. Больщаков, Р. Н. Каримов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 520 с. : ил.
5. Петросян, Л. А. Теория игр: [учеб. пособие для ун-тов] / Петросян Л. А., Зенкевич Н. А., Семина Е. А. – М. : Высшая школа ; Книжный дом «Университет», 1998. – 304 с. : ил.
6. Романюк, В. В. Мінімаксний підхід у реалізації стохастичного параметра з невідомим імовірнісним розподілом на інтервалі ненульової міри / В. В. Романюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 3. – С. 65–71.

7. Романюк, В. В. Оцінювання вірогідності розподілу статистичних частот випадкової величини з невідомим математичним сподіванням і дисперсією / В. В. Романюк // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – № 21. – С. 152–161.
8. Вороб'єв, Н. Н. Теория игр для экономистов-кибернетиков / Воробьёв Н. Н. – М. : Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 272 с.
9. Романюк, В. В. Модель визначення оптимального рішення проектувальника у задачі про розрахунок повздовжньої стійкості двох елементів будівельної конструкції при дії на них нормованого стискаючого зусилля / В. В. Романюк // Проблеми трибології. – 2010. – № 1. – С. 42–56.
10. Оуэн, Г. Теория игр : [пер. с англ.] / Оуэн Г. – 2-е изд. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 216 с.
11. Романюк, В. В. Рекомендації щодо використання нерівноважної симетричної ситуації у діадичній грі як моделі охорони навколошнього середовища з трьома суб'єктами забруднення довкілля / В. В. Романюк // Екологічна безпека та природокористування. – 2010. – Вип. 5. – С. 144–159.
12. Романюк, В. В. Практична реалізація стратегії у найвигіднішій симетричній ситуації у діадичній грі з трьома суб'єктами забруднення водойми / В. В. Романюк // Екологічна безпека. – 2009. – № 4 (8). – С. 49–56.
13. Романюк, В. В. Метод реалізації принципу оптимальності у матричних іграх без сідової точки / В. В. Романюк // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Інформатика та моделювання. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – № 49. – С. 146–154.
14. Романюк, В. В. Метод реалізації оптимальних змішаних стратегій у матричній грі з порожньою множиною сідлових точок у чистих стратегіях з відомою кількістю партій гри / В. В. Романюк // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2009. – № 2. – С. 45–52.

Надійшла 19.10.2010

УДК 519.816+519.712.6

Федюкович В. Е.

Інженер ООО «ИнтроПро» (г. Київ)

## О НЕОБХОДИМОСТИ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ СЕРТИФИКАТА СХЕМЫ DAA

Выполнен анализ схемы DAA. Обнаружено, что схема допускает совместные действия Эмитента и Проверяющего с целью получить дополнительную информацию о Пользователе, которые не обнаруживаются Пользователем, следующим протоколу. Предложена дополнительная проверка Пользователем DAA сертификата, полученного от Эмитента, позволяющая обнаружить такую атаку и прекратить протокол.

**Ключевые слова:** DAA, анонимность, аутентификация, протокол доказательства знания, TPM.

### ВВЕДЕНИЕ

Аппаратное обеспечение персонального компьютера состоит, с момента его появления, из унифицированных блоков, что допускает его самостоятельную сборку. Обратная сторона максимально упрощенной процедуры сборки заключается в фактическом отсутствии механизмов контроля целостности аппаратного

Романюк В. В.  
РЕШЕНИЕ НЕЧЕТКОЙ АНТАГОНИСТИЧЕСКОЙ  
 $2 \times 2$ -ИГРЫ

Представлена концепция решения антагонистической  $2 \times 2$ -игры, элементы матрицы которой задаются в форме неодноэлементных множеств. Показано, что решением такой нечеткой игры может быть специальное пересечение решений всех обычных  $2 \times 2$ -игр, элементы матриц которых образуют эти множества. Для случаев, когда такое пересечение окажется пустым, предлагается использование нечеткого решения нечеткой  $2 \times 2$ -игры. При условии неприемлемости подобного решения строится бескоалиционная метаигра, решение которой будет содержать оптимальные поведения обоих игроков в исходной нечеткой  $2 \times 2$ -игре.

**Ключевые слова:** моделирование в условиях неопределенности, принятие решений в условиях неопределенности, нечеткая  $2 \times 2$ -игра, бескоалиционная метаигра, оптимальное поведение.

Romanuke V. V.

SOLVING THE FUZZY ANTAGONISTIC  $2 \times 2$ -GAME

There has been represented a concept of solving the antagonistic  $2 \times 2$ -game, whose matrix elements are defined in the form of non-one-element sets. It has been revealed that the solution of such fuzzy game may be a special intersection of solutions of all ordinary  $2 \times 2$ -games, whose matrices elements constitute those sets. For cases when such intersection appears to be empty, it is suggested to use a fuzzy solution of a fuzzy  $2 \times 2$ -game. If this solution is unacceptable, a noncooperative metagame is constructed, the solution of which will contain the optimal behavior of both players in the initial fuzzy  $2 \times 2$ -game.

**Key words:** modeling within uncertainty, decision making within uncertainty, fuzzy  $2 \times 2$ -game, noncooperative metagame, optimal behavior.

обеспечения, что затрудняет обнаружение вмешательства на аппаратном уровне. Такое вмешательство, в свою очередь, может приводить к утечке конфиденциальных данных при их обработке на таком компьютере. Контроль целостности аппаратного и программного обеспечения компьютера является одной из основных целей, решаемых в рамках Trusted Computing

Group [1] (TCG). TCG анонсировала цели сохранности важной информации путем создания защищенного носителя данных; создания механизмов надежной аутентификации компьютеров, в том числе удаленной; контроля целостности и управления пользователем путей предоставления информации о целостности третьим лицам. Задача контроля целостности решается путем «измерения» параметров старта компьютера и сохранения их в микросхеме Trusted Platform Module (TPM). Предусмотрен механизм «накопления»: в регистр TPM помещается значение хэш-функции, аргументами которой являются текущее содержание регистра и очередное измерение. TPM предоставляет доступ на чтение к значению регистра, содержащему произвольные данные пользователя, при условии совпадения состояния такого компьютера, представленного регистром накопления, с состоянием на момент инициализации такого регистра. TCG также имеет надежную проверку состояния удаленного компьютера, с учетом ожидаемого конфликта интересов сторон, связанного с распространением персональных данных владельца компьютера. В версии 1.1 спецификаций TPM используется цифровая электронная подпись, выполняемая потенциально короткоживущими RSA ключами Attestation Identity Key (AIK). Такие ключи заверяются доверенной третьей стороной (Privacy CA), которая, в свою очередь, аутентифицирует компьютер по постоянному RSA ключу Endorsement Key (EK). Версия 1.2 спецификаций предусматривает схему Direct Anonymous Attestation (DAA) [2], в которой для скрытия связи между экземпляром подписи доверенной стороны и сертификатом пользователя используется вариант механизма затемнения (blinding) [3], полностью выполняемый на уровне программного обеспечения компьютера пользователя. Имеется свойство анонимности схемы: различные экземпляры подписи, созданные Пользователем, а также различными Пользователями, неотличимы.

Микросхема TPM серийно выпускается Infineon и другими компаниями, и устанавливается на некоторые системные платы и ноутбуки. Функциональность TPM включена в микросхему южного моста некоторых наборов логики (chipset) Intel. Дальнейшее развитие [4] схемы DAA предполагает использование эллиптических кривых, имеющих билинейные отображения (bilinear pairing).

Инициатива Trusted Computing в целом подверглась критике [5, 6] со стороны Фонда свободного программного обеспечения (FSF). Следует отметить, что ряд утверждений можно рассматривать как предположения о намерениях и планах участниках рынка. Так, например, в эссе Столлмена [5] содержится предположение о рисках для пользователей компьютеров, связанных с потерей возможности установ-

ливать и использовать свободное программное обеспечение; при этом делается ссылка на законодательные инициативы в США. Отдельного внимания заслуживает ссылка на программное обеспечение GNU Privacy Guard (GPG), а также утверждение о полезности GPG при пересылке информации по электронной почте, в форме противопоставления функциональности GPG и предполагаемых целей Trusted Computing. В материале Андерсена [6] корректно изложена идея мониторинга старта компьютера, на основании чего делается ряд предположений, в том числе о возможности избирательного блокирования компьютера, идентифицируемого на основании уникальных ключей. В статье [7] сформулировано утверждение о рисках, связанных с предоставлением третьим лицам точной информации о программном обеспечении Пользователя.

Ожидание анонимности пользователей при удаленной проверке целостности их компьютеров в рамках схемы DAA является решающим фактором, объясняющим интерес к изучению такого механизма проверки на уровне серийно выпускаемого оборудования. Ряд утверждений о возможностях TPM и рисках, возникающих при его использовании, следует рассматривать как необоснованные, а также игнорирующие возможности, предоставляемые протоколами доказательства знания для ограничения распространения персональной информации. С другой стороны, следует обратить внимание на ошибку, нередко встречающуюся при проектировании программного обеспечения: недостаточная проверка возвращаемого значения, что особенно важно в случае совместных вычислений и конфликта интересов участников вычислений. В этой работе изложены результаты независимого анализа схемы DAA, которые могут быть полезны при анализе рисков и выработке рекомендаций.

## 1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О СХЕМЕ DAA

Участниками схемы являются Пользователи, Прoverяющие и Эмитент. Схема состоит из алгоритма выбора параметров схемы (Setup), протокола выпуска Эмитентом сертификата Пользователя (Join), алгоритмов создания и проверки экземпляра подписи Пользователя (Sign и Verify). Пользователь создает экземпляр подписи, который является неинтерактивным вариантом [8] протокола доказательства знания ключей TPM, таких, что имеется экземпляр подписи Эмитента на экземпляре привязки к этим ключам. Предусматривается генерация микросхемой случайных значений (nonce), которые являются дополнительными аргументами хэш-функции при выборе значения запроса, отсутствующими в оригинальной работе [8]. Все вычисления с ключами TPM выпол-

няются на уровне микросхемы (TPM), операции с затенением (blinding) и обмен стое  $e$  и случайное  $v''$ , вычисляет элемент группы  $A$ , такой, что

$$A^e US^{v''} = Z \pmod{n}, \quad (1)$$

где  $S, Z$  – элементы группы, параметры схемы. Используется подгруппа квадратичных вычетов мультиплексивной группы кольца вычетов по модулю  $n$  для составного  $n$ , выбранного Эмитентом на этапе генерации параметров схемы. Эмитент пересыпает пользователю  $(A, e, v'')$ , что является экземпляром подписи вида Camenisch-Lysyanskaya [9]. Для создания экземпляра такой подписи необходимо знание факторизации  $n$ , что является ключом Эмитента. Исчерпывающая информация о схеме DAA приведена в оригинальной работе [1].

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Было замечено, что Пользователь использует полученные от Эмитента данные без предварительной проверки, удовлетворяют ли они уравнению (1) как экземпляр подписи Эмитента. Был обнаружен сценарий для Эмитента и Проверяющего (в дальнейшем называемых Соперником), в рамках которого Пользователь не достигает неотличимости событий аутентификации. Пусть Эмитент создал экземпляр подписи, который удовлетворяет уравнению (1) для некоторого произвольного уникального  $\bar{Z}$ , отличного от  $Z$ . Тогда Пользователь, следующий спецификациям, создает экземпляр подписи, успешно проверяемый уравнением (в обозначениях оригинальной работы)

$$T_1^e R_0^{f_0} R_1^{f_1} S^v h^{-ew} = \bar{Z} \pmod{n}, \quad (2)$$

Проверяющий, следующий спецификациям, отвергает такой экземпляр подписи как некорректный, так как значение запроса не совпадает со значением хеш-функции. Однако Проверяющий, имеющий список значений  $\bar{Z}$ , полученный от Эмитента, может попытаться воссоздать значение запроса, перебирая все значения из такого списка. А именно, при таком переборе следует использовать  $\bar{T}_1$  при формировании аргумента хеш-функции вместо  $\hat{T}_1$  в оригинальной работе:

$$\bar{T}_1 = \bar{Z}^{-c} T_1^{s_e + c2^{\frac{e}{2}-1}} R_0^{s_{f_0}} R_1^{s_{f_1}} S^v h^{-s_{ew}} \pmod{n}. \quad (3)$$

Таким образом, Проверяющий всегда может распознать сертификат, выданный Пользователю действующим произвольно Эмитентом, при условии выдачи уникальных некорректных (т. е. не удовлетворяющих уравнению (1) проверки подписи) сертификатов. Такая конструкция позволяет такому Сопернику формировать историю событий аутентификации выбранных Эмитентом Пользователей, что делает заявлен-

ное свойство анонимности схемы DAA требующим уточнения. Схема DAA также допускает Пользователя, который всегда выполняет дополнительную проверку (1) полученного от Эмитента сертификата. Такой Пользователь всегда обнаруживает попытку нарушения анонимности путем предоставления некорректного сертификата и может прекратить протокол с таким Эмитентом. Кроме того, действия такого Пользователя неотличимы от действий Пользователя, следующего протоколу в случае, если Эмитент также следует протоколу. Дополнительная проверка предусматривает реализацию на уровне программного обеспечения и не требует каких-либо изменений в микросхеме Trusted Platform Module (TPM). Эти результаты были изложены в препринте IACR [10] и представлены на конференции РусКрипто [11]. В последовавших работах (например, [12]) предусмотрена проверка Пользователем корректности полученного экземпляра подписи Эмитента.

Необходимо также обратить внимание на дополнительные случайные значения, выбираемые TPM при формировании запроса при помощи хэш-функции. Как следствие, эти случайные значения необходимы для проверки корректности подписи Пользователя, что допускает скрытый канал передачи данных TPM – Проверяющий. Следует отметить, что предложенный способ формирования запроса не допускает механизма совместного выбора случайных значений, предложенного в модели «наблюдатель в кошельке» [13].

Формирование ответов Пользователя в виде экземпляра подписи может ограничивать возможности такого Пользователя в управлении доступностью информации о состоянии компьютера для третьих лиц. Определенный интерес может представлять интерактивная проверка состояния, в том числе с учетом схем с выбранным заранее Проверяющим (designated Verifier) или схем с подтверждением (confirming signatures).

## ВЫВОДЫ

Обнаружена уязвимость схемы Direct Anonymous Attestation в модели угроз, предусматривающей произвольные совместные действия Эмитента и Проверяющего. Уязвимость позволяет такому Сопернику исключить анонимность Пользователя, следующего спецификациям. Выпуск некорректных сертификатов может оставаться незамеченным в случаях использования программного обеспечения Эмитента и Проверяющего только одного производителя. Такая уязвимость может быть исключена дополнительной проверкой Пользователем полученного сертификата. Также отмечена возможность скрытого канала передачи путем генерации микросхемой TPM псевдо-

дослучайных чисел, которые должны быть получены Проверяющим в неизменном виде.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brickell, E.* Direct Anonymous Attestation [Электронный ресурс] / Brickell E., Camenisch J. and Chen L. // Cryptology ePrint Archive. – Report 2004/205. – Режим доступа: <http://eprint.iacr.org/2004/205/>.
2. Trusted Computing Group [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.trustedcomputinggroup.org/>.
3. *Chaum, D.* Blind Signatures for Untraceable Payments / Chaum D., Rivest R. L. and Sherman A. T. (Eds.) // Advances in Cryptology : proceedings of CRYPTO'82. – Plenum, New York, 1983. – P. 89–105.
4. *Brickell, E.* Simplified security notions of direct anonymous attestation and a concrete scheme from pairings / Brickell E., Chen L. and Li J. // International Journal of Information Security. – 2009. – Vol. 8. – P. 315–330.
5. *Stallman, R.* Can You Trust Your Computer? [Электронный ресурс] / Richard Stallman // Free Software Free Society: selected essays of Richard M. Stallman. – Режим доступа: <http://www.gnu.org/philosophy/can-you-trust.html>.
6. *Anderson, R.* ‘Trusted Computing’ Frequently Asked Questions [Электронный ресурс] / Anderson R. – Режим доступа: <http://www.cl.cam.ac.uk/~rja14/tcpa-faq.html>.
7. Trusted Computing: Promise and Risk [Электронный ресурс] // Electronic Frontier Foundation whitepaper. – Режим доступа: <http://www.eff.org/wp/trusted-computing-promise-and-risk>.
8. *Fiat, A.* How to Prove Yourself: Practical Solutions to Identification and Signature Problems / Fiat A. and Shamir A. // Lecture Notes in Computer Science. – 1987. – Vol. 263. – P.186–194.
9. *Camenisch, J.* A Signature Scheme with Efficient Protocols / Camenisch J. and Lysyanskaya A. // Lecture Notes in Computer Science. – 2003. – Vol. 2576. – P.268–289.
10. *Fedyukovych, V.* A strategy for any DAA Issuer and an additional verification by a Host [Электронный ресурс] / V. Fedyukovych // Cryptology ePrint Archive. – Report 2008/277. – Режим доступа: <http://eprint.iacr.org/2008/277/>.
11. *Федюкович, Е.* Восстановление анонимности при использовании протоколов DAA [Электронный ресурс] / В. Е. Федюкович // Рускрипто 2009. – Режим доступа: <http://ruscrypto.ru/sources/conference/rc2009/>.
12. *Brickell, E.* Enhanced Privacy ID from Bilinear Pairing [Электронный ресурс] / Brickell E. and Li J. // Cryptology ePrint Archive. – Report 2009/095. – Режим доступа: <http://eprint.iacr.org/2009/095/>.
13. *Chaum, D.* Wallet Databases with Observers / Chaum D. and Pedersen T. P. // Lecture Notes in Computer Science. – 1993. – Vol. 740/1993. – P. 89–105.

Надійшла 1.11.2010

Федюкович В. Є.

## ПРО ДОДАТКОВУ ПЕРЕВІРКУ СЕРТИФІКАТА СХЕМИ DAA

Було виконано аналіз схеми DAA. Було знайдено, що схема не є анонімною: Емітент може випустити сертифікат, який завжди може відповісти Перевірючому. Також було запропоновано додаткове рівняння перевірки, щоб уникнути такої атаки.

**Ключові слова:** DAA, анонімність, атрибуція, протокол доказу знання, TPM.

Fedyukovych V.

## ON ADDITIONAL VERIFICATION OF DDA CERTIFICATE

A strategy for colluding Issuer and Verifier with DAA scheme was found to let such an adversary always distinguish honest Users that were issued ‘tagged’ certificates voiding anonymity property of DAA. Additional verification equation was introduced to detect such an attack.

**Key words:** DAA, anonymity, authentication, proof of knowledge, TPM.

УДК 681.3.06

Халимов Г. З.

Канд. техн. наук, доцент Харківського національного університета радіоелектроніки

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КРИВЫХ ФЕРМА ДЛЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ХЕШИРОВАНИЯ

Получены точные решения для числа точек кривых Ферма, когда порядок поля имеет делители 2, 3 и 6, также оценки числа точек на основе вероятностного подхода. Приводятся асимптотические границы отношения максимального числа точек кривой Ферма в простом поле к ее роду и к границе Хассе – Вейля.

**Ключевые слова:** универсальное хеширование, кривые Ферма.

### ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЕ АКТУАЛЬНОСТЬ

Универсальное хеширование на основе алгебро-геометрического подхода впервые было предложено Биербрауэром и Кабатинским [1]. Пусть задана абсолютно неразложимая, несингулярная проективная кривая  $\chi$  над полем  $F_q$  с точками  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \in \chi(F_q)$ . Для каждой алгебраической кривой можно определить поле рациональных функций  $F_q(\chi)$ . В каждой точке  $P_j$  кривой  $\chi$  можно

вычислить оценку  $\vartheta_P$  для рациональных функций  $f_i \in F_q(\chi)$ , которая определяет порядок нуля или полюса функции  $f_i$  в этой точке. Хеш-значение  $h_{P_j}(m) \in F_q$  для сообщения  $m = (m_1, m_2, \dots, m_k)$ ,  $m_i \in F_q$  в точке  $P_j \in F_q$  определяется выражением

$$h_{P_j}(m) = \sum_{i=1}^k f_i(P_j)m_i, \quad (1)$$

где  $f_i \in F_q(\chi)$  с упорядоченными порядками полюсов  $0 < u_1 < u_2 < \dots < u_k$ . Хеш-функция  $h_{P_j}(m)$  опреде-

© Халимов Г. З., 2011

ляет универсальный хеш-класс  $\varepsilon - U(N, q^k, q)$ , где вероятность коллизии  $\varepsilon \leq u_k/N$ ,  $N$  – число точек алгебраической кривой,  $q^k$  – объем пространства сообщений,  $q$  – объем пространства хеш-кодов. Хеш-функция  $h_{P_j}(m)$  является ключевой, ее значение зависит от точки  $P_j$  кривой  $\chi$ . Оценка для вероятности коллизии зависит от алгеброгеометрических параметров кривой.

**Утверждение 1.** [2] Вероятность коллизии при универсальном хешировании (1) при  $k > 2g - 1$ , где  $g$  – род алгебраической кривой и  $N$  – число точек кривой, определяется границей

$$\varepsilon \leq (k + g - 1)/N. \quad (2)$$

Проблематика построения схем универсального хеширования на основе алгеброгеометрического представления заключается в выборе алгебраических кривых с требуемыми параметрами, прежде всего с как можно большим отношением числа точек кривой к ее роду, а также с реализацией вычислений в конечном поле  $F_q$ , простотой вычислений и согласованностью с представлением информационных данных. Интерес представляют конструкции простых полей с модулями  $2^m \pm 1$  или близких к ним простых чисел. В представленных материалах отражены основные результаты исследований по кривым Ферма в простом поле для целей универсального хеширования.

Целью статьи является нахождение оценок для числа решений кривой Ферма в простом поле. В разделе 1 рассмотрены основные свойства кривых Ферма и точные значения числа точек для кривых Ферма в простом поле. В разделе 2 на основе вероятностного подхода получены оценки числа решений уравнения Ферма в конечном поле. В разделе 3 приводятся асимптотические результаты по кривым Ферма над простым полем.

## 1. ТОЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ЧИСЛА ТОЧЕК ДЛЯ КРИВЫХ ФЕРМА В ПРОСТОМ ПОЛЕ

Кривые Ферма  $Fr_m$  определяются выражением

$$X^m + Y^m + Z^m = 0, \quad (3)$$

имеют частные производные вида  $F_X = mX^{m-1}$ ,  $F_Y = mY^{m-1}$ ,  $F_Z = mZ^{m-1}$ . Рассмотрим основные свойства кривых Ферма для случая простого поля  $F_q$ .

**Утверждение 1.** Пусть кривая Ферма  $Fr_m$  определена над простым полем  $F_q$ . Справедливо следующее:

1) кривая  $Fr_m$  является неприводимой, несингулярной кривой степени  $m$  без особенностей, рода  $g = \frac{(m-1)(m-2)}{2}$ ;

2) если  $m$  взаимно просто с  $q-1$ , тогда  $X^m + Y^m + Z^m = 0$  изоморфна  $X + Y + Z = 0$  и имеет число точек  $N = q + 1$ ;

3) кривая вида  $X^{(q-1)/3} + Y^{(q-1)/3} + Z^{(q-1)/3} = 0$  имеет  $N = 2(q-1)^2/9$  и  $g = (q-4)(q-7)/18$ ;

4) кривая вида  $X^{(q-1)/2} + Y^{(q-1)/2} + Z^{(q-1)/2} = 0$  имеет  $N = 3(q-1)/2$  и  $g = (q-3)(q-5)/8$ ;

5) кривая вида  $X^{(q-1)/6} + Y^{(q-1)/6} + Z^{(q-1)/6} = 0$  имеет число точек  $N = (q-1)/2 + (q-1)^2/18$  и род  $g = (q-7)(q-13)/72$ ;

6) кривая  $X^{(q-1)/2^m} + Y^{(q-1)/2^m} + Z^{(q-1)/2^m} = 0$  имеет род  $g = (q-2^m-1)(q-2^m-2)/2^{2m+1}$  и число точек  $N = 3(q-1)/2^m$ , если  $|2^{2^m-1}| \neq 1 \pmod{q}$  и  $N = 3(q-1)/2^m + 3(q-1)^2/2^{2m}$ , если  $2^{2^m-1} = -1 \pmod{q}$ .

Результаты 1 и 2 являются очевидными и известными. Результаты 3–6 получаются методом подсчета числа решений для уравнений Ферма на основе свойства суммы элементов мультиплекативной подгруппы второго, третьего и шестого порядка. Значение рода кривой определяется формулой Римана – Рока.

Результат 3 следует из того, что решениями уравнения кривой в проективном пространстве  $P^2$  над  $F_q$  являются точки  $(\gamma : \xi : 1)$ , для которых справедливо  $\gamma^{(q-1)/3} + \xi^{(q-1)/3} + 1 = 0$ . Так как  $\gamma, \xi \in F_q$  и  $\gamma = \alpha^i$ ,  $\xi = \alpha^j$ ,  $\alpha$  – образующий элемент поля, имеем  $\alpha^{i(q-1)/3} + \alpha^{j(q-1)/3} + 1 = 0$  или  $\beta^i + \beta^j + 1 = 0$ , где  $\beta = \alpha^{(q-1)/3}$  – образующий элемент мультиплекативной подгруппы третьего порядка. В силу свойства  $\sum_{k=0}^{n-1} \beta^k = 0$  для элементов мультиплекативной группы порядка  $n$  получим, что уравнение Ферма имеет решение, если и только если  $\beta^{(i)} = \beta^1$  и  $\beta^{(j)} = \beta^2$ , где  $(\cdot)$  обозначает вычисление значения степени по модулю порядка  $\beta$ , а так же если  $\beta^{(i)} = \beta^2$  и  $\beta^{(j)} = \beta^1$ . Число решений по каждому набору условий равно  $(q-1)^2/9$  и  $N = 2(q-1)^2/9$ .

Результат 4 является очевидным. Элементы поля  $\alpha^{i(q-1)/2}$  принадлежат мультиплекативной подгруппе второго порядка:  $1, \beta = \alpha^{(q-1)/2}$  и  $1 + \beta = 0$ . Кривая Ферма имеет решения, если одна из координат  $P^2$ , например  $z = 0$ , а две другие удовлетворяют равенствам  $Y^{(q-1)/2} = 1$  и  $X^{(q-1)/2} = \beta$ . Искомыми решениями являются  $y = 1$  и  $x = \alpha^{2i+1}$ ,  $i = \overline{0, (q-1)/2-1}$ . Общее число решений с учетом перестановок координат будет  $N = 3(q-1)/2$ .

Аналогично получим результат 5. Элементы поля  $\alpha^{i(q-1)/6}$  принадлежат мультиплекативной группе шестого порядка:  $1, \beta^1, \beta^2, \beta^3, \beta^4, \beta^5$ , где  $\beta = \alpha^{(q-1)/6}$ . Мультиплекативная группа шестого порядка включает мультиплекативные подгруппы втор-

рого порядка 1,  $\beta^3$  и третьего 1,  $\beta^2, \beta^4$ . По свойству суммы элементов мультиликативной группы имеем  $1 + \beta^3 = 0$  и  $1 + \beta^2 + \beta^4 = 0$ . Первое условие дает  $(q-1)/6$  решений для уравнения кривой в виде  $z = 0, y = 1$  и  $x = \alpha^{3(2i+1)}, i = \overline{0, (q-1)/6-1}$ , а с учетом перестановки координат –  $3(q-1)/6$  решений. Второе условие –  $2(q-1)^2/6$  решений по аналогии с доказательством результата 3. Так как элементы подгрупп не пересекаются и нет других подгрупп порядка 2 или 3, общее число решений  $N = (q-1)/2 + (q-1)^2/18$ .

Для вывода результата 6 заметим, что элементы поля  $\alpha^{i(q-1)/2^m}$  принадлежат мультиликативной группе порядка  $2^m$ : 1,  $\beta, \beta^2, \dots, \beta^{2^m-1}$ , где  $\beta = \alpha^{(q-1)/2^m}$ .

Мультиликативная группа содержит мультиликативные подгруппы только четных порядков  $2^e$ ,  $e = \overline{1, m}$ . Если  $|2^{2^m-1}| \neq 1 \pmod{q}$ , уравнение Ферма имеет только решения, когда одна из координат, например  $z = 0$ , а две другие удовлетворяют равенствам  $Y^{(q-1)/2^m} = 1$  и  $X^{(q-1)/2^m} = \gamma$ , где  $\gamma$  есть элемент подгруппы второго порядка. Решением по координате  $y$  является значение  $y = 1$ , а по координате  $x$  являются точки  $x = \alpha^{2^m i + 2^{m-1}}, i = \overline{0, (q-1)/2^m - 1}$ . Общее число решений с учетом перестановок координат будет  $N = 3(q-1)/2^m$ .

Если  $2^{2^m-1} = -1 \pmod{q}$ , в подгруппе порядка  $2^m$ : 1,  $\beta, \beta^2, \dots, \beta^{2^m-1}$ , существует элемент  $\alpha = 2$ , в силу  $(2^{2^m-1})^2 = 1 \pmod{q}$ . Все степени  $\alpha$  порождают подгруппу  $2^m$  порядка, которая является перестановкой элементов подгруппы 1,  $\beta, \beta^2, \dots, \beta^{2^m-1}$ . Очевидно, что среди элементов подгруппы 1,  $\alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^{2^m-1}$  будет элемент  $\lambda = -2$ , так как  $\alpha \bullet \alpha^{2^m-1} = 2 \bullet 2^{2^m-1} = -2 \pmod{q}$  и элемент  $\gamma = (q-1)/2$ , в силу  $\alpha^{2^m-1}/\alpha = 2^{2^m-1}/2 = (q-1)/2 \pmod{q}$ . В этом случае кривая Ферма имеет решения, которые определяются условиями: 1)  $z = 0, Y^{(q-1)/2^m} = 1, X^{(q-1)/2^m} = \gamma$ ; 2)  $Z^{(q-1)/2^m} = 1, Y^{(q-1)/2^m} = 1, X^{(q-1)/2^m} = \lambda$ ; 3)  $Z^{(q-1)/2^m} = 1, Y^{(q-1)/2^m} = \gamma, X^{(q-1)/2^m} = \gamma$ . Число решений по условию 1), как и в предыдущем случае, равно  $N_1 = 3(q-1)/2^m$ . По условию 2) число корней по каждой координате  $y$  и  $x$  равно  $(q-1)/2^m$ , и с учетом перестановок координат общее число решений равно  $N_2 = 2(q-1)^2/2^{2m}$ . Аналогично для условия 3) с учетом, что перестановок по координатам нет,  $N_3 = (q-1)^2/2^{2m}$ . Общее число решений определяется суммой  $N_1 + N_2 + N_3$ , что дает искомое  $N$ .

**Пример 1.** Уравнения  $X^m + Y^m + Z^m = 0$  над  $F_q$  при  $q = 257$  соответствуют случаю, когда делителями порядка поля  $q-1 = 256$  являются степени двойки. Прямое вычисление решений при  $m = 128, 64, 32, 16$  дает значения  $N = 384, 192, 96, 816$ . При  $m = 128, 64, 32$  выполняется первое условие для резуль-

тата 6, т. е.  $|2^{(q-1)/(2^m)}| \neq 1 \pmod{q}$ , и число точек кривой равно  $N = 3(q-1)/((q-1)/m) = 3m$ , что совпадает с прямыми вычислениями. Для  $m = 16$  справедливо  $2^{(q-1)/(2^m)} = -1 \pmod{q}$  и  $N = 3m + 3m^2$ , что также совпадает с точным значением.

Точные вычисления числа решений для уравнений Ферма, когда степень уравнения является произвольным делителем порядка конечного поля  $F_q$ , является трудоемкой задачей. Ниже рассматриваются оценочные значения для числа точек.

## 2. ОЦЕНКИ ДЛЯ ЧИСЛА ТОЧЕК КРИВЫХ ФЕРМА В КОНЕЧНОМ ПОЛЕ

Оценки числа решений уравнения Ферма в конечном поле  $F_q$  получим на основе вероятностного подхода.

**Теорема 1.** Пусть кривая  $X^m + Y^m + Z^m = 0$  определена над простым полем  $F_q$ , где  $m$  есть делитель  $q-1$ . Оценка для числа точек кривой Ферма при  $m > 2$  равна

$$N \approx 2 \left\lceil \frac{(q-1)}{2m^2} \right\rceil m^2, \quad (4)$$

где  $\lceil x \rceil$  – округление числа до большего целого.

*Доказательство.* Решениями уравнения кривой в проективном пространстве  $P^2$  над  $F_q$  являются точки  $(\gamma : \xi : 1)$ , для которых справедливо  $\gamma^m + \xi^m + 1 = 0$  или  $\delta + \eta + 1 = 0$ , с учетом подстановки  $\gamma^m = \delta, \xi^m = \eta$ . Пусть  $\delta = \beta^i, \eta = \beta^j$ , где  $\beta$  – образующий элемент поля  $F_q$ . Первое условие  $\gamma^m + \xi^m + 1 = 0$  определяет, что степени  $i$  и  $j$  должны иметь делитель  $m$  и  $\beta^i, \beta^j$  должны удовлетворять второму условию  $\delta + \eta + 1 = 0$ . Число пар  $\delta, \eta$ , удовлетворяющих условию  $\delta + \eta + 1 = 0$ , равно  $(q-1)/2$ , а число элементов поля  $\beta^i$ , которые имеют делитель степени  $m$ , равно  $(q-1)/m$ . Образующий элемент  $\beta = a$  выбирается из множества чисел  $\overline{0, q-1}$ , и элементы числового поля вычисляются по правилу  $a^i \pmod{q}$ . Последнее выражение определяет рандомизатор, для которого соответствие между числовым значением элемента мультиликативной группы и его индексом является псевдослучайным. Таким образом, среднее число пар  $\delta, \eta$ , удовлетворяющих условиям

1 и 2, будет равно  $n = \frac{(q-1)}{2} \cdot P(i = 0 \pmod{m},$

$j = 0 \pmod{m}$ ), где сомножитель  $(q-1)/2$  определяет общее число  $\delta, \eta$ , удовлетворяющих условию  $\delta + \eta + 1 = 0$ , а  $P(i = 0 \pmod{m}, j = 0 \pmod{m})$  – вероятность того, что индексы элементов  $\delta, \eta$  имеют делитель  $m$ . Предполагая равновероятность распределения индексов элементов поля в парах  $\delta, \eta$ , полу-

чим  $P(i = 0 \bmod m, j = 0 \bmod m) = 1/m^2$  и оценку для  $n$  в виде  $n = (q-1)/2m^2$ . Так як число пар є ціле число, виконим округлення  $n$  до більшого цілого. Округлення к більшому цілому для случаєв, коли  $m > \sqrt{(q-1)}$ , привело би к нулевої оцінці числа розв'язків, що не є верним (см. утв. 1). Наконець, учили перестановку пар по координатам  $x, y$  і то, що по кожній координаті число кореней рівно  $m$ , отримаємо іскоме вираження  $N$ .  $\diamond$

Рассмотрим следствия данной теоремы, но сначала отметим следующую полезную лемму.

**Лемма 1.** Пусть кривая  $X^m + Y^m + Z^m = 0$  определена над простым полем  $F_q$ , где  $m$  есть делитель  $q - 1$ . Справедливо следующее:

- 1) если  $(q-1)/m$  содержит делитель 2, в число решений входит  $3m$ ;
- 2) если  $(q-1)/m$  содержит делитель 3, в число решений входит  $2m^2$ ;
- 3) если  $(q-1)/m$  содержит делители 2 и 3, в число решений входит  $3m+2m^2$ ;
- 4) если  $(-2)^{(q-1)/m} = 1 \pmod{q}$ , в число решений входит  $3m^2$ .

Доказательство прямо следует из результатов утверждения 1.

Следствия теоремы 1 с уточнением по результатам леммы 1 представлены в предложении 1.

**Предложение 1.** Пусть кривая  $X^m + Y^m + Z^m = 0$  определена над простым полем  $F_q$ , где  $m > 2$  есть делитель  $q - 1$ . Оценки числа точек  $N$  для кривой Ферма имеют следующий вид.

- A) Если  $(-2)^{(q-1)/m} \neq 1 \pmod{q}$ ,
- 1)  $(q-1)/m = 0 \pmod{2}$ ,  $(q-1)/m \neq 0 \pmod{3}$ , тогда  $N \approx 3m + 2\langle(q-1)/(2m^2)\rangle_3 m^2$ ;
  - 2)  $(q-1)/m \neq 0 \pmod{2}$ ,  $(q-1)/m = 0 \pmod{3}$ , тогда  $N \approx 2(1 + \langle(q-1)/(2m^2) - 1\rangle_3)m^2$ ;
  - 3)  $(q-1)/m = 0 \pmod{6}$ , тогда  $N \approx 3m + 2(1 + \langle(q-1)/(2m^2) - 1\rangle_3)m^2$ ;
  - 4)  $(q-1)/m \neq 0 \pmod{2}$ ,  $(q-1)/m \neq 0 \pmod{3}$ , тогда  $N \approx 2\langle(q-1)/(2m^2)\rangle_3 m^2$ .

- B) Если  $(-2)^{(q-1)/m} = 1 \pmod{q}$ ,
- 1)  $(q-1)/m = 0 \pmod{2}$ ,  $(q-1)/m \neq 0 \pmod{3}$ , тогда  $N \approx 3m + 2\langle(q-1)/(2m^2) - 1\rangle_3 m^2 + 3m^2$ ;
  - 2)  $(q-1)/m \neq 0 \pmod{2}$ ,  $(q-1)/m = 0 \pmod{3}$ , тогда  $N \approx 2(1 + \langle(q-1)/(2m^2) - 2\rangle_3)m^2 + 3m^2$ ;
  - 3)  $(q-1)/m = 0 \pmod{6}$ , тогда  $N \approx 3m + 2(1 + \langle(q-1)/(2m^2) - 2\rangle_3)m^2 + 3m^2$ ;
  - 4)  $(q-1)/m \neq 0 \pmod{2}$ ,  $(q-1)/m \neq 0 \pmod{3}$ ,  $N \approx 2\langle(q-1)/(2m^2) - 1\rangle_3 m^2 + 3m^2$ .

Здесь  $\langle x \rangle_3$  – округлення  $x$  до більшого цілого, кратного 3.

Доказательство следует из результатов теоремы 1 и лемми 1. Вичислення оценочних значений числа точок і точні вичислення дають хороше совпадення. Так, для  $q = 1021$  имеємо спадення результатів при  $m = 510, 340, 255, 204, 170, 102, 85, 68, 60, 51, 34, 30, 20, 17, 12, 5, 3, 2$  і число точок  $N = 1530, 231200, 765, 0, 58310, 306, 14705, 9248, 0, 153, 2414, 90, 800, 629, 864, 965, 1008, 1022$ . Для значень  $m = 15, 10, 6, 4$  точні  $N = 45, 1430, 882, 1088$ , а приближені  $N' = 1335, 830, 1098, 992$ . Расходження проявляються і можуть бути существенными, коли степень уравнения становиться менше  $\sqrt{q}$ . Относительна погрешность вероятностной оценки уменьшается с ростом  $q$ .

### 3. АСИМПТОТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО КРИВЫМ ФЕРМА НАД ПРОСТЫМ ПОЛЕМ

Асимптотические результаты по кривым Ферма над простым полем определяются теоремами 2, 3.

**Теорема 2.** Асимптотическая граница для отношения максимального числа точек  $N_g(q)$  к її роду  $g$  для кривої Ферма в простому полі определяється вираженiem

$$\limsup_{g \rightarrow \infty} \frac{N_g(q)}{g} = 10. \quad (5)$$

*Доказательство.* Предел отношения  $N_g(q)/g$  определяется максимальной оценкой для числа точек кривых Ферма. Род кривой Ферма равен  $g = (m-1)(m-2)/2$ , где  $m$  – степень уравнения. Движені  $g \rightarrow \infty$  возможно, коли  $q \rightarrow \infty$  і  $m \rightarrow q$ . Подставляя в предел отношения  $N_g(q)/g$  максимальное значення для числа точек на кривої в простому полі  $N \approx 3m + 2(1 + \langle(q-1)/(2m^2) - 2\rangle_3)m^2 + 3m^2$ , що соответствує умові  $(-2)^{(q-1)/m} = 1 \pmod{q}$  і  $(q-1)/m = 0 \pmod{6}$  предложenia 1, отримаємо іскому оценку (5).  $\diamond$

**Теорема 3.** Асимптотическая граница отношения максимального числа точек  $N_g(q)$  для кривой Ферма в простому полі к максимальному числу точек по границе Хассе – Вейля определяється вираженiem

$$\limsup_{g \rightarrow \infty} \frac{N_g(q)}{N_g(q)_{HV}} = \frac{5}{\sqrt{q}}. \quad (6)$$

*Доказательство.* Из теоремы 2 следует, що максимальна оценка для числа точек кривых Ферма в простому полі має вид  $N \approx 3m + 2(1 + \langle(q-1)/(2m^2) - 2\rangle_3)m^2 + 3m^2$ . Выразим  $m$  з вираження для роду кривої. Для більших  $g$  справед-

ливо  $g \approx m^2/2$  и  $m \approx \sqrt{2g}$ . Подставляя последний результат  $m$  в выражение для числа точек, получим

$$N_g(q) = 2\sqrt{2g} + 4(1 + \langle (q-1)/(4g^2) - 2 \rangle_3)g + 6g.$$

Граница Хассе – Вейля для максимальных кривых равна  $N_g(q)_{HV} = q + 1 + 2g\sqrt{q}$ . Вычисление  $\limsup_{g \rightarrow \infty} N_g(q)/N_g(q)_{HV}$  дает (6). ◇

Точные вычисления  $N_g(q)/g$  согласуются с результатами (5) и (6). Так, для  $q = 257$  и  $m = 16$  имеем  $N = 816$  и  $N_g(q)/g = 7,76$ , а для  $q = 2^{16} + 1 = 65537$  и  $m = 2048$  имеем  $N = 12589056$  и  $N_g(q)/g = 6,01$ .

## ВЫВОДЫ

1. В простом поле не существует максимальных кривых Ферма. При большом роде проигрыш границе Хассе – Вейля пропорционален  $1/(\sqrt{q})$ . С уменьшением рода кривой значение числа точек приближается к границе Хассе – Вейля, и при  $g = 0,1$  имеем тривиальный случай  $N = q + 1$ .

2. Универсальное хеширование по кривым Ферма в простом поле не обеспечивает требования по вероятности коллизии. В соответствии с выражением (2) для  $\epsilon$  алгебраическая кривая должна быть большого рода, с большим числом точек и значительным отношением  $N_g(q)/g$ . Асимптотика  $N_g(q)/g$  для кривых Ферма равна 10. Кривые малого рода проигрывают по параметру  $N$ , что не обеспечивает требования по вероятности коллизии для практических значений  $q$ .

3. Результаты для кривых Ферма представлены для простого поля и частично могут быть отнесены

к свойствам кривых в расширениях конечного поля. Расширенные конечные поля имеют большее многообразие по комбинаторным свойствам, что влияет на оценки параметров кривых.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bierbrauer, J. On families of hash functions via geometric codes and concatenation. / Bierbrauer J., Johansson T., Katabianskii G., Smeets B. // Advances in Cryptology-CRYPTO'93 Proceedings. – Springer-Verlag, 1994. – P. 331–342.
2. Халимов, Г. З. Коллизионные оценки универсального хеширования на основе схем с алгебраическими кодами / Халимов Г. З. // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Т. 8, Вып. 3. – С. 338–342.

Надійшла 25.10.2010

Халимов Г. З.

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ КРИВИХ ФЕРМА ДЛЯ УНІВЕРСАЛЬНОГО ГЕШУВАННЯ

Отримано точні рішення для числа точок кривих Ферма, коли порядок поля має дільники 2, 3 та 6, також оцінки числа точок на основі ймовірностного підходу. Приводяться асимптотичні граници відношення максимального числа точок кривої Ферма в простому полі до її роду та до границі Хассе – Вейля.

**Ключові слова:** універсальне гешування, криві Ферма.

Khalimov G. Z.

ESTIMATION OF FERMA CURVES PARAMETERS FOR UNIVERSAL HASHING OF NUMBER SOLUTION FOR HURVITZ EQUATION IN THE FINITE FIELD

Exact solutions for a number of Ferma curves points when the field order has dividers 2, 3 and 6 as well as estimates of points number have been obtained using probabilistic approach. Asymptotic boundaries of the ratio of maximum number of Ferma curve points in a simple field to its genus and to Hasse–Weil boundary are given.

**Key words:** universal hashing, Ferma curves.

УДК 004

Овсяк О. В.

Канд. техн. наук, доцент Львівської філії Київського національного університету культури і мистецтв

## МОДЕЛЬ РОЗШИРЕНОЇ НОТАЦІЇ ТЕКСТОВОГО ОПИСУ ФОРМУЛ АЛГОРИТМІВ

З метою запису у пам'ять комп'ютера графічно-текстових формул алгоритмів, які утворені функційними унітермами з впорядкованими змінними і параметрами, створено розширену XML-подібну нотацію опису формул алгоритмів. Модель розширеної нотації описана засобами алгебри алгоритмів з використанням операції секвентування. Наведено приклад використання розширеної нотації для опису формули алгоритму Евкліда.

**Ключові слова:** модель, нотація, синтаксис, семантика, унітерм, секвенція, елімінування, паралелення.

## ВСТУП

Для опису алгоритмів інформаційних технологій і систем найчастіше використовуються вербалний і

блок-схемний методи. Відомо, що ці методи, як і методи машин Тюрінга [1], Поста [2], Колмогорова [3], Ахо – Ульмана – Хопкрофта [4], Шонхаге [5] і рекур-

© Овсяк О. В., 2010

сивних функцій [6], алгоритмів Маркова [7] та універсальних алгоритмів Крініцького [8] є методами неформального опису алгоритмів [9]. З метою математичного опису алгоритмів інформаційних технологій і систем створена алгебра алгоритмів [10] та її розширення [11]. Операції алгебри алгоритмів є оригінальними і мають специфічні позначення, яких немає серед стандартних математичних позначень. Тому для автоматизації процесів набору і редактування формул алгоритмів потрібно створити спеціалізовану комп’ютерну систему.

Як правило, кожна із комп’ютерних систем має свій формат даних, наприклад, **Word** використовує формат даних з розширенням **doc**. Останнім часом одним з найбільш часто використовуваних форматів є **xml** формат. На основі мови опису даних **XML** [12] створена сучасна мова **XAML** [13], призначена для програмування інтерфейсів прикладних інформаційних і комп’ютерних систем та комп’ютерної графіки. Нотація (система умовних письмових позначень [14]) **XAML**, у порівнянні з сучасною мовою об’єктного програмування **C#** [12], у більшій мірі зорієнтована на розробників комп’ютерної графіки.

## ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ

Спеціалізованими редакторами для набору і редактування формул алгоритмів є комп’ютерні системи **МОДАЛ** [15], **АБСТРАКТАЛ** [16] і **GenCod** [17]. Системи **МОДАЛ** і **АБСТРАКТАЛ** хоч і відрізняються своїми можливостями, але мають подібні формати даних. Подібність форматів даних полягає в наявності полів, які призначені для зберігання координат розташування графічних знаків операцій на робочому полі системи. Недоліком такого розв’язання є жорстка фіксація формул алгоритмів до місця розташування на робочому полі комп’ютерної системи. Для усунення цього недоліку у системі **GenCod** створено **xml**-подібний формат даних збереження формул алгоритмів у пам’яті комп’ютера. Однак формат **GenCod** має такий недолік, як відсутність можливості впорядкування змінних функційних унітермів. З метою усунення цього недоліку у статті введено модифікований формат текстового опису формул алгоритмів.

## МОДЕЛЬ РОЗШИРЕНОЇ НОТАЦІЇ ОПИСУ ФОРМУЛ АЛГОРИТМІВ

Опис моделі розширеної нотації виконаємо засобами алгебри алгоритмів. Загальний вигляд текстового опису формули алгоритму є таким:

$$\overbrace{L ; R_1 ; Q ; R_2}^{\text{,}}$$

де

$$\overbrace{L = \langle ?xml; \#; v; \#; z; \#; ? \rangle}^{\text{,}}$$

де  $\langle ?xml$  – константа, ідентифікуюча початок опису заголовку формул алгоритму,  $\#$  – наявність одного або декількох пропусків (пробілів),  $v$  – версія формату,  $z$  – формат кодування,  $\rangle$  – константа, ідентифікуюча кінець опису заголовку формул алгоритму,

$$\overbrace{v \in B = \text{version} = "1.0", \text{version} = "1.1", \dots, \text{version} = "X.Y",}^{\text{,}}$$

$$\overbrace{z \in Z = \text{encoding} = "utf8", \text{encoding} = "utf16",}^{\text{,}}$$

$$\overbrace{R_1 = \langle ; root ; \rangle}^{\text{,}}$$

$\langle$  – константа-ідентифікатор початку опису дескриптора,  $root$  – ідентифікатор кореневого дескриптора,  $\rangle$  – ідентифікатор закриття початку і кінця опису дескриптора,

$$\overbrace{R_2 = \langle / ; root ; \rangle}^{\text{,}}$$

де  $\langle /$  – константа-ідентифікатор опису кінця дескриптора,

$$\overbrace{Q = \overbrace{W_0 ; W_1 ; \dots ; W_{n-1}}^{\text{,}}}^{\text{,}}, Q = \overbrace{W_0 ; W_1 ; \dots ; W_{n-1}}^{\text{,}}$$

$$\overbrace{W_i = \overbrace{V_0 ; V_1 ; \dots ; V_{m-1}}^{\text{,}}}^{\text{,}}, i \in \overbrace{0 ; 1 ; \dots ; n-1}^{\text{,}}$$

$$\overbrace{V_i \in M = S, E, P, C^s, C^e, C^p, U, *}^{\text{,}}$$

$$\overbrace{j \in \overbrace{0 ; 1 ; \dots ; m-1}^{\text{,}}}^{\text{,}}$$

де  $S, E, P, C^s, C^e, C^p, U$  – граматика опису операцій секвентування, елімінування, паралелення, циклічного секвентування, циклічного елімінування, циклічного паралелення і унітерма, відповідно,  $a^*$  – порожній унітерм.

## Синтаксис і семантика опису унітермів

Унітерми є одного із трьох типів:

$$\overbrace{U \in U_1, U_2, U_3}^{\text{,}}$$

де  $U_1$  – тривіальний (несеквенційний) унітерм,  $U_2$  – секвенційний унітерм,  $U_3$  – подвійний унітерм.

1. Опис тривіальних (несеквенційних) унітермів має такий вигляд:

$$\overbrace{U_1 = \langle ; uniterm ; \# ; u ; \# ; / \rangle}^{\text{,}}$$

де  $uniterm$  – ідентифікатор опису унітерма,  $u$  – унітерм (будь-які символи та їх послідовності).

2. Такою формулою описуються секвенційні унітерми:

$$U_2 = \underbrace{< ; \text{uniterms} ; \# ; u\_1 ; \# ; u\_2 ; \# ; / >}_{},$$

де *uniterms* – ідентифікатор опису секвенційного унітерма, *u\_1* – знак (позначення секвенційного унітерма) і *u\_2* – секвенційні змінні унітерма.

3. Формат подвійних унітермів:

$$U_3 = \underbrace{< ; \text{unitermp} ; \# ; u\_1 ; \# ; u\_2 ; \# ; u\_3 ; \# ; / >}_{},$$

де *unitermp* – ідентифікатор подвійного унітерма, *u\_1* – знак подвійного унітерма, *u\_2* – знак секвенційного унітерма і *u\_3* – секвенційні змінні унітерма.

### Опис складових операцій

А) Секвентування починається і закінчується такими секвенціями:

$$\begin{aligned} S_1 &= \underbrace{< ; s_0 ; \# ; r ; \# ; o ; / >}_{}, \\ S_2 &= \underbrace{< / ; s_0 ; / >}_{}, \end{aligned}$$

де *s\_0* = "sequence" – ідентифікатор опису секвентування, *r* – розділювач унітермів, *o* – орієнтація знаку операції секвентування,

$$\begin{aligned} z \in R &= \underbrace{\text{"semicolon", "coma"}}, \\ o \in O &= \underbrace{\text{"horizontal", "vertical"}}, \end{aligned}$$

де "semicolon" – розділювач крапка з комою, "coma" – розділювач кома, "horizontal" – орієнтація горизонтальна, "vertical" – орієнтація вертикальна.

Б) Елімінування має такий початок і кінець опису:

$$\begin{aligned} E_1 &= \underbrace{< ; e_0 ; \# ; o ; / >}_{}, \\ E_2 &= \underbrace{< / ; e_0 ; / >}_{}, \end{aligned}$$

де *e\_0* = "elimination" – ідентифікатор опису елімінування.

В) Паралелення починається і закінчується такими секвенціями:

$$\begin{aligned} P_1 &= \underbrace{< ; p_0 ; \# ; r ; \# ; o ; / >}_{}, \\ P_2 &= \underbrace{< / ; p_0 ; / >}_{}, \end{aligned}$$

де *p\_0* = "parallelization" – ідентифікатор опису паралелення.

Г) Циклічне секвентування має такі секвенції:

$$\begin{aligned} C^s_1 &= \underbrace{< ; c^s ; \# ; o ; / >}_{}, \\ C^s_2 &= \underbrace{< / ; c^s ; / >}_{}, \end{aligned}$$

де *c^s* = "cyclic-sequence" – ідентифікатор опису циклічного секвентування.

Г) Циклічне елімінування починається і закінчується такими секвенціями:

$$\begin{aligned} C^e_1 &= \underbrace{< ; c^e ; \# ; o ; / >}_{}, \\ C^e_2 &= \underbrace{< / ; c^e ; / >}_{}, \end{aligned}$$

де *c^e* = "cyclic-elimination" – ідентифікатор опису циклічного елімінування.

Д) У циклічному паралелення входять такі секвенції:

$$\begin{aligned} C^p_1 &= \underbrace{< ; c^p ; \# ; o ; / >}_{}, \\ C^p_2 &= \underbrace{< / ; c^p ; / >}_{}, \end{aligned}$$

де *c^p* = "cyclic-parallelization" – ідентифікатор опису циклічного паралелення.

### Синтаксис і семантика операцій

А) Секвентування:

$$S = \underbrace{S_1 ; W_i ; W_j ; S_2}_{},$$

Б) Елімінування:

$$E = \underbrace{E_1 ; W_i ; W_j ; W_k ; E_2}_{},$$

В) Паралелення:

$$P = \underbrace{P_1 ; W_i ; W_j ; P_2}_{},$$

Г) Циклічного секвентування:

$$C^s = \underbrace{C^s_1 ; \# ; W_g ; \# ; W_i ; \# ; C^s_2}_{},$$

Г) Циклічного елімінування:

$$C^e = \overbrace{C^e_1; \#; W_g; \#; W_i; \#; C^e_2}.$$

Д) Циклічного паралелення:

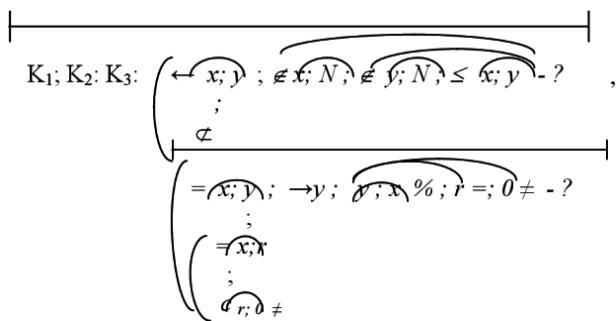
$$C^p = \overbrace{C^p_1; \#; W_g; \#; W_i; \#; C^p_2},$$

де

$$W_g \in u, \quad W_j = \overbrace{V_0; V_1; \dots; V_{k-1}}, \\ j \in \overbrace{0; 1; \dots; k-1}.$$

### ПРИКЛАД ОПИСУ АЛГОРИТМУ ЕВКЛІДА

З використанням розширеної нотації формула алгоритму Евкліда [2] для обчислення двох натуральних чисел матиме такий вигляд:



де  $K_1$  – повідомлення про те, що змінна  $x$  не є натуральним числом,  $N$  – множина натуральних чисел;  $K_2$  – повідомлення «Значення  $y$  не є натуральним числом»,  $K_3$  – повідомлення  $x \leq y$ ,  $\leftarrow x$ ;  $y$  – унітерм введення з клавіатури значень змінних  $x$  і  $y$ ;  $\not\in x$ ;  $N$  – перевірка неналежності значення змінної  $x$  до натуральніх чисел;  $\not\in y$ ;  $N$  – перевірка належності значення змінної  $y$  до натуральніх чисел,  $= x$ ;  $y$ , приписування змінній  $x$  значення змінної  $y$ ,  $y$ ;  $x \%$  – знаходження остачі від ділення  $x$  на  $y$ ;

$\overbrace{y; x \% ; r =; 0 \neq - ?}$  – приписування змінній остачі від ділення і її порівняння з нулем;  $c_{r; 0 \neq}$  – повернення у цикл за умовою  $r \neq 0$ , знак операції початку циклічного секвентування.

З використанням створеної моделі граматики текстового опису ця формула опишеться так:

```
<? xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<root>
<elimination orientation="horizontal">
<uniterm> K1; K2; K3</uniterm>
<sequence separator="semicolon" orientation="vertical">
```

```
<uniterms></uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm> x </uniterm>
<uniterm> y </uniterm>
</sequence>
<cyclic-sequence orientation="vertical">
<uniterm></uniterm>
<elimination orientation="horizontal">
<sequence separator="semicolon" orientation="vertical">
<uniterms></uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm> x </uniterm>
<uniterm> y </uniterm>
</sequence>
<sequence separator="semicolon" orientation="vertical">
<uniterms></uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm> y </uniterm>
<uniterm> r </uniterm>
</sequence>
<uniterms>c</uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm> r </uniterm>
<uniterm> 0 </uniterm> </uniterm>
</sequence>
<uniterms></uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm> 0 </uniterm>
</sequence>
<uniterms></uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm> y </uniterm>
</sequence>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterms></uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm> x </uniterm>
</sequence>
<uniterms>%</uniterms>
<uniterms>r</uniterms>
</sequence>
<uniterms></uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm> 0 </uniterm>
</sequence>
<uniterms></uniterms>
<elimination>
</cyclic-sequence>
</sequence>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterms>y</uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm>x</uniterm>
<uniterm>N</uniterm>
</sequence>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterms></uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm>y</uniterm>
<uniterm>N</uniterm>
</sequence>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterms>j</uniterms>
<sequence separator="semicolon" orientation="horizontal">
<uniterm>x</uniterm>
<uniterm>y</uniterm>
</sequence>
```

```
</sequence>
</sequence>
</sequence>
</elimination>
</root>
```

Версія і формат кодування описані у першому зверху рядку представленого **xml**-подібного формату. Другий рядок має назву кореневого дескриптора. Опис елімінування починається дескриптором третього рядка. У четвертому рядку описані унітерми  $K_1$ ,  $K_2$  і  $K_3$ . Опис дескриптора секвентування починається у п'ятому рядку. Шостий рядок містить секвенційний унітерм введення значень змінних з клавіатури ( $\leftarrow$ ). Самі ж назви змінних ( $x$ ,  $y$ ), яким приписуються введені з клавіатури значення, описані у сьомому, восьмому, дев'ятому і десятому рядках. Подальші рядки поданого прикладу досить легко читаються і тому не потребують додаткових пояснень.

## ВИСНОВКИ

- Створена модель розширеної нотації забезпечує текстовий опис формул алгоритмів як із тривіальними, так і секвенційними та дубльованими унітермами.
- У моделі розширеної нотації міститься опис впорядкувань не тільки самих унітермів, а також і змінних унітермів.
- Модель розширеної нотації забезпечує переносимість формул алгоритмів.

## СПИСОК ЛІТРАТУРИ

- Turing, A. M. On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem / Turing A. M. // Proceedings of London Mathematical Society. – 1936–1937. – Series 2, Vol. 42. – pp. 230–265; correction, ibidem, vol. 43, pp. 544–546. – [Reprinted in [13 Davis M., pp. 155–222] and available online at <http://www.abelard.org/turpap2/tp2-ie.asp>].
- Post, E. L. Finite Combinatory Processes - Formulation 1 / Post E. L. // Journal of Symbolic Logic. – 1936. – 1. – Pp. 103–105. – Reprinted in The Undecidable, pp. 289ff.
- Kolmogorov, A. N. On the concept of algorithm (in Russian) / Kolmogorov A. N. // Uspekhi Mat. Nauk. – 1953. – 8:4. – Pp. 175–176. – [Translated into English in Uspensky V. A., Semenov A. L. Algorithms: Main Ideas and Applications. – Kluwer, 1993.]
- Aho, A. V. The design and analysis of computer algorithms / Aho A. V., Hopcroft J. E., Ullman J. D. – Addison-Wesley Publishing Company, 1974.
- Schönhage, A. Universelle Turing Speicherung / Schönhage A. // In J. Dörr and G. Hotz, Editors, Automatentheorie und Formale Sprachen. – Bibliogr. Institut, Mannheim, 1970. – Pp. 369–383.
- Church, A. An unsolvable problem of elementary number theory / Church A. // American Journal of Mathematics. – 1936. – Vol. 58. – Pp. 345–363.
- Markov, A. A. Theory of algorithms (in Russian) / Markov A. A. // Editions of Academy of Sciences of the USSR. – 1951. – Vol. 38. – Pp. 176–189 – [Translated into English in American Mathematical Society Translations, 1960, series 2, 15, pp. 1–14.]
- Krinitzki, N. A. Algorithms around us (in Russian) / Krinitzki N. A. – Moscow : Mir, 1988. – [Also translated to Spanish (Algoritmos a nuestro alrededor)].
- Успенський, В. А. Теорія алгоритмів: основні отримані та приложения / Успенський В. А., Семенов А. Л. – М. : Наука, 1987. – 288 с.
- Овсяк, В. Засоби еквівалентних перетворень алгоритмів / Овсяк В. // Доповіді національної академії наук України. – 1996. – № 9. – С. 83–89.
- Owsiaik, W. Rozszerzenie algebra algorytmów / Owsiaik W., Owsiaik A. // Pomiary, automatyka, kontrola. – № 2. – S. 184–188.
- Дейтел, Х. C# / Дейтел Х. и др. – М. ; СПб : БХВ-Петербург, 2006. – 1056 с.
- Мак-Дональд, М. WPF. Windows Presentation Foundation в .NET 3.5 с примерами на 2008 / Мак-Дональд М. – Второе издание. – М. : Вильямс, 2008. – 928 с.
- Великий тлумачний словник сучасної української мови / уклад. і голов. ред. В. Т. Бусел. – К. ; Ірпінь: Пепрун, 2002. – 1440 с.
- Бритковський, В. М. Моделювання редактора формул секвенційних алгоритмів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи» / Бритковський В. М. – Львів, 2003. – 18 с.
- Василюк, А. С. Підвищення ефективності математичного і програмного забезпечення редактора формул алгоритмів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук: спец. 01.05.02 «Математичне та програмне забезпечення обчислювальних машин і систем» / Василюк А. С. – Львів, 2008. – 20 с.
- Овсяк, О. В. Класи інформаційної системи генерування коду / Овсяк О. В. // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2010. – № 1. – С. 171–176.

Надійшла 06.07.2010

Овсяк А. В.

## МОДЕЛЬ РАСШИРЕНОЙ НОТАЦИИ ТЕКСТОВОГО ОПИСАНИЯ ФОРМУЛ АЛГОРИТМОВ

С целью записи в память компьютера графически-текстовых формул алгоритмов, которые образованы функциональными унитермами с упорядоченными переменными и параметрами, создано расширенную **xml**-подобную нотацию описания формул алгоритмов. Модель расширенной нотации описана средствами алгебры алгоритмов с использованием операции секвенцирования.

Приведен пример использования расширенной нотации для описания формулы алгоритма Евклида.

**Ключевые слова:** модель, нотация, синтаксис, семантика, унитерм, секвенцирование, элиминирование, параллелизм.

Ovsyak O. V.

## MODEL OF EXTENDED NOTATION OF ALGORITHM FORMULAS TEXTUAL DESCRIPTION

The proposed extended **xml**-notation of algorithm formulas description provides writing of graphical-textual algorithm formulas formed by functional uniterms with ordered variables and parameters in the computer memory. The extended notation model is described by means of algorithm algebra using the sequencing operation.

The example of Euclid algorithm formula description using the extended notation is given in the paper.

**Key words:** model, notation, syntax, semantics, uniterm, sequencing, elimination, parallelizing.

# НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

## НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

### NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.021:004.622:65.021.1

Дубровин В. И.<sup>1</sup>, Твердохлеб Ю. В.<sup>2</sup>

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

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

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ЭКГ-СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Предложен метод анализа ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования в системе электрокардиографии высокого разрешения. Данный метод позволяет обнаружить девять важных координат точек кардиосигнала: начало, пик и смещение Р-зубца, QRS-комплекса и Т-зубца во всех отведениях ЭКГ-сигнала. Предлагаемый подход увеличивает точность обнаружения Р и Т зубцов. Обоснован оптимальный способ фильтрации ЭКГ-сигнала от шумов.

**Ключевые слова:** электрокардиограмма, Р-QRS-T-комплексы, вейвлет-преобразование.

### ВВЕДЕНИЕ

Электрокардиограмма (ЭКГ) представляет собой запись электрических потенциалов активности сердца, снятую с одного или нескольких отведений, и состоит из периодической последовательности кардиоциклов. В типичном кардиоцикле выделяют несколько элементов: Р-волна, QRS-комплекс и Т-волна (рис. 1). Отправной точкой ряда современных методик компьютерной электрокардиографии является выделение положения QRS-комплекса, который отражает процесс деполяризации желудочков. Затем обнаруживают Р и Т зубцы, отражающие процесс деполяризации правого и левого предсердий, и процесс конечной деполяризации миокарда желудочков соответственно [1–3].

В настоящее время для анализа ЭКГ-сигнала перспективно применение вейвлет-анализа. Вейвлеты – это обобщенное название семейств математических функций определенной формы, которые локальны по

времени и по частоте, и в которых все функции получаются из одной базовой (порождающей) функции посредством сдвигов и растяжений по оси времени. По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье, вейвлеты способны с гораздо более высокой точностью представить локальные особенности сигналов, вплоть до разрывов первого рода [4–5].

Целью данной работы является усовершенствование методов анализа ЭКГ-сигналов в системе электрокардиографии высокого разрешения.

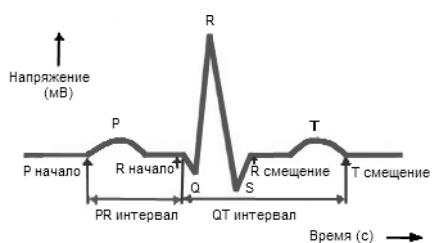


Рис. 1. Типичный комплекс ЭКГ-сигнала

## 1. ВИБОР ВИДА ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАННЯ И ТИПА ВЕЙВЛЕТ-НОСИТЕЛЯ

Разработанный метод анализа ЭКГ-сигнала базируется на непрерывном вейвлет-преобразовании (CWT). Непрерывное вейвлет-преобразование в разных временных масштабах характеризует сигнал в различных частотных диапазонах, в то время как дискретное вейвлет-преобразование (DWT) ограничено масштабами, которые являются степенями двойки. Использование CWT вместо DWT предоставляет больше возможностей [4–5].

Пусть  $s$  – сигнал и  $\psi$  – вейвлет. При непрерывном преобразовании вейвлет-коэффициенты сигнала  $s$ , соответствующие масштабному коэффициенту  $a$  и положению  $b$ , определяются формулой (1) [4]:

$$CWT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt. \quad (1)$$

Для выбора оптимального вейвлета, используемого в качестве базиса, было протестировано несколько вейвлет-функций. Под оптимальным вейвлетом будем иметь в виду тот, который обеспечивает правильное местоположение координат девяти точек кардиоцикла: начало, пик и смещение Т-зубца, QRS-комплекса и Р-зубца. В работах [6, 7] применяются биортогональные вейвлеты с компактным носителем, используя масштабы, кратные степени двойки. В работах [7, 8] используются гауссовые вейвлеты (пред-

вейвлеты). Свойства этих семейств вейвлетов [4, 5] представлены в табл. 1.

Наилучшим вейвлет-носителем, удовлетворяющим перечисленным выше требованиям, согласно полученным результатам (табл. 2), является биортогональный вейвлет «bior1.5».

В качестве масштаба, используемого для определения правильного местоположения девяти координат точек ЭКГ-сигнала, был использован 15 масштаб для обнаружения QRS-комплекса [7–11] и 41 масштаб для обнаружения Р и Т зубцов [7]. Масштабы 15 и 41 обеспечивают наибольшую точность в обнаружении данных зубцов. Вейвлет «bior1.5» в масштабах 15 и 41 представлен на рис. 2.

## 2. МЕТОД АНАЛИЗА КАРДИОСИГНАЛА

Процесс анализа кардиосигнала условно можно разделить на две стадии: стадия предварительной обработки и выделение признаков (рис. 3).

Стадия предварительной обработки заключается в удалении шумов (электромиографические потенциалы мышц, артефакты взаимодействия электродов с кожей, электронный шум усилителей и фоновый шум сети) [3–5]. Шумом принято считать высокочастотные компоненты кардиосигнала. Удаление шума приводит к сжатию и сглаживанию ЭКГ-сигнала. Стадия выделения признаков из кардиосигнала представляет собой процесс извлечения требуемой информации (зубцы, комплексы и т. д.).

Рассмотрим подробнее каждую стадию.

**Таблица 1.** Свойства гауссовых и биортогональных вейвлетов

Критерий	Гауссовые вейвлеты (gaus)	Биортогональные вейвлеты (bior)
Наличие функция $\Phi$	–	+
Наличие функция $\Psi$	+ (явно выражена)	+
Ортогональный анализ	–	+
Наличие компактного носителя	–	+( $\phi, \psi, \tilde{\phi}, \tilde{\psi}$ )
Возможность восстановления	Восстановление не гарантируется	+
Симметрия	+	+
FIR-фильтры	–	+
Возможный вейвлет-анализ	CWT без использования быстрых алгоритмов	CWT и DWT с использованием быстрых алгоритмов

**Таблица 2.** Точность обнаружения координат точек ЭКГ-сигнала

Критерий	Gaus	Bior		
		«bior1.1»	«bior1.3»	«bior1.5»
Точность обнаружения координат точек ЭКГ-сигнала, %	91–92	93–94	95–96	98–99

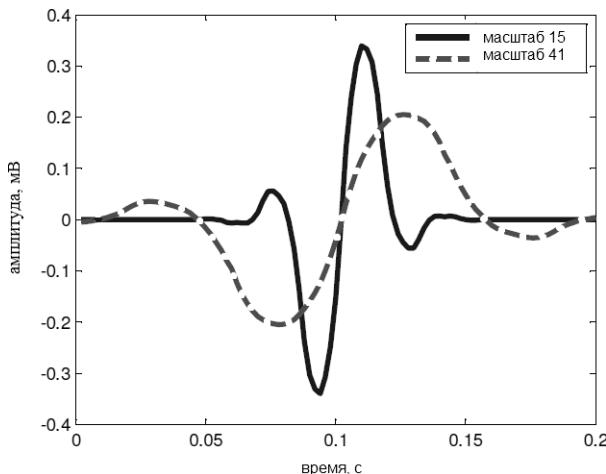


Рис. 2. Вейвлет «bior1.5» в масштабах 15 и 41



Рис. 3. Структура обробки ЕКГ-сигналу

## 2.1. Предварительная обработка

В простейшой модели предполагается, что зашумленный сигнал имеет вид (2) [4, 5]:

$$s(n) = f(n) + \sigma \cdot e(n), \quad (2)$$

где  $f(n)$  – полезный сигнал,  $\sigma$  – уровень шума и  $e(n)$  – гауссов белый шум, т. е. стационарная случайная последовательность с нулевым математическим ожиданием, абсолютно некоррелированная и с дисперсией, равной единице.

При вейвлет-анализе сигнал раскладывается на аппроксимирующие коэффициенты, которые представляют слаженный сигнал, и детализирующие коэффициенты, описывающие колебания. Следовательно, шумовая компонента лучше отражается в детализирующих коэффициентах. Подобные составляющие могут быть удалены с использованием процедуры обнуления или пересчета коэффициентов детализации, значения которых меньше по сравнению со значением порога. Процедура пороговой обработки, или «трешолдинг», на сегодняшний день является пер-

спективным инструментом для «очистки» кардиосигнала от шумов (высокочастотных компонент) [4].

Существуют следующие виды трешолдинга [4, 5]:

- 1) жесткий трешолдинг, при котором все коэффициенты, превышающие некоторый порог, считаются принадлежащими к «оригинальному» сигналу, а остальные относят к шуму и обнуляют (3):

$$f(x) = \begin{cases} x, & |x| \geq t, \\ 0, & |x| < t, \end{cases} \quad (3)$$

где  $t$  – некоторый порог (коэффициент трешолдинга);

- 2) мягкий трешолдинг (4):

$$f(x) = \begin{cases} x - t, & x \geq t, \\ 0, & |x| < t, \\ x + t, & x \leq t. \end{cases} \quad (4)$$

Качество шумоподавления сигнала и, следовательно, степень увеличения отношения сигнал/шум зависят не только от вида функции трешолдинга, но также от способа ее применения. В зависимости от этого трешолдинг делится на глобальный и локальный, а локальный в свою очередь на общий и многоуровневый [2, 3].

Для определения пороговых значений будем использовать следующие методы:

- 1) *SQR-LOG метод* (5) [12, 13]:

$$t = \sqrt{2 \left( \frac{\text{median}\{c(i)\}, i = 1 \dots n}{0,6745} \right)^2 \ln(n)}, \quad (5)$$

где 0,6745 – оценка среднеквадратичного отклонения белого Гауссова шума,  $c(i)$  – вейвлет-коэффициенты.

- 2) *Метод Берга – Массара* (6) [14]:

$$t = |c(z)|, \\ z = \arg \min \left[ -\sum \{c^2(i), i < k\} + 2\sigma^2 k \left( a + \ln \left( \frac{n}{k} \right) \right) \right], \\ k = 1 \dots n, \quad (6)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия шума,  $a$  – параметр разреженности  $a \geq 1$ .

Параметр разреженности является ключевым в методе Берга – Массара, так как именно его величина, задаваемая исследователем, определяет степень подавления имеющихся в сигнале шумов.

В методе Берга – Массара определяются три интервала изменений значения параметра  $a$ , которые задают величину «штрафа»:

- «высокий», при  $2,5 \leq a \leq 10$ ;
- «средний», при  $1,5 \leq a \leq 2,5$ ;
- «низкий», при  $1 \leq a \leq 1,5$ .

3) Метод Штейна (7) [15]:

$$\begin{aligned} T_m &= \arg \min_{t \geq 0} [SURE(W)], \\ SURE(W) &= \sigma^2 - \\ &- \frac{1}{N} \left( 2\sigma^2 \cdot \#\{n : |W(m, n)|\} - \sum_{k=1}^L \min(|W(m, n)|)^2 \right), \quad (7) \end{aligned}$$

где  $W(m, n)$  – вейвлет-коэффициенты на уровне разложения  $m$ ;  $L$  – длина вектора вейвлет-коэффициентов  $W(m, n)$  на уровне  $m$ ;  $\sigma^2$  – дисперсия шума;  $\#S$  – мощность множества  $S$ .

В работе [16] был выбран вейвлет из семейства Добеши в качестве базисного. Введем следующее ограничение: базовый вейвлет может быть применен к дискретному вейвлет-преобразованию, порядок высокочастотных и низкочастотных фильтров, предназначенных для выделения детализирующей и аппроксимирующей составляющих, не должен превышать 10 (из-за большой ресурсоемкости). Вейвлеты «db2» и «db4» удовлетворяют данным требованиям.

Считается, что верхняя граничная частота кардиосигнала, заметно влияющая на ее форму, не превышает 100 Гц [4]. Поэтому компоненты сигнала частоты выше 100 Гц можно удалить без существенного изменения формы сигнала. Исходя из этого, рассчитаем уровень разложения сигнала для вейвлетов «db2» и «db4». Вейвлет «db2» имеет центральную частоту  $Fr = 0,6667$  Гц [4]. Поскольку  $\Delta t = 1/1024$ , то центральная частота первого уровня разложения равна  $Fr_1 = 0,6667 \times 1024 = 682,70$  Гц, далее для второго уровня  $Fr_2 = 341,35$  Гц, для третьего уровня  $Fr_3 = 170,68$ , для четвертого уровня  $Fr_4 = 85,34$  Гц. Аналогично для вейвлета «db4» с центральной частотой  $Fr = 0,7143$  Гц [15]:  $Fr_1 = 734,30$  Гц,  $Fr_2 = 367,15$  Гц,  $Fr_3 = 183,57$  Гц,  $Fr_4 = 91,8$  Гц. Таким образом, для удаления компонент кардиосигнала, чья частота выше 100 Гц, требуется использовать четвертый уровень разложения, при этом мы получаем сжатие сигнала в  $2^4 = 16$  раз.

В качестве меры при выборе базисного вейвлета, применяемого для удаления шумов, будем использовать среднеквадратическую ошибку (8) [16]:

$$MSE(w, l) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s(i) - \theta(i))^2, \quad (8)$$

где  $s(i)$  – исходный сигнал,  $\theta(i)$  – очищенный сигнал,  $w$  – вейвлет-функция,  $l$  – уровень разложения сигнала.

Результаты сравнения по видам и методам трешолдинга для вейвлетов «db2» и «db4» на четвертом уровне разложения с использованием локального многоуровневого трешолдинга представлены в табл. 3 и 4.

**Таблица 3.** Сравнение методов и типов вейвлет-трешолдинга для «db2»

	Жесткий трешолдинг	Мягкий трешолдинг
Метод Берга – Массара	0,0447	0,0563
SQR-LOG метод	2,5625	9,1393
Метод Штейна	1,0046	1,0239

**Таблица 4.** Сравнение методов и типов вейвлет-трешолдинга для «db4»

	Жесткий трешолдинг	Мягкий трешолдинг
Метод Берга – Массара	0,0393	0,0530
SQR-LOG метод	2,4873	8,9010
Метод Штейна	1,0073	1,0309

Согласно полученным результатам, наилучшим вейвлет-носителем для фильтрации сигнала от шумов является вейвлет «db4» на четвертом уровне разложения, а лучшим методом при локальном многоуровневом вейвлет-трешолдинге является жесткий трешолдинг с использованием метода Берга – Массара и штрафным порогом  $a = 6$  (рис. 4, 5).

## 2.2. Выделение Р-QRS-Т комплексов

Как было сказано ранее, для выделения важных координат точек ЭКГ-сигнала (начало, пик и смещение Т-зубца, QRS-комплекса и Р-зубца) при непрерывном вейвлет-преобразовании требуется использование вейвлет «bior1.5» и 15 масштаб для обнаружения QRS-комплекса или 41 масштаб для обнаружения Р и Т зубцов. В работах [7–11] предложен следующий подход: выбираются две подряд пары коэффициентов, пересекающие нуль, между каждой из которых лежит локальный максимум (минимум) соответственно; в результате первый вейвлет-коэффициент является началом зубца, средний – пиком, а последний – смещением. Данный подход применяется для 15 и 41 масштабов в отдельности.

У предложенного выше метода низкое быстродействие (для использования в 24-часовом Холтеровском мониторинге) из-за постоянного поиска локального максимума (минимума) в парах вейвлет-коэффициентов. Поэтому вместо поиска экстремумов авторами было предложено использовать пороговое значение, равное половине глобального максимума (минимума):  $t_1 = 0,5\max(\{C(i)\})$  или  $t_2 = 0,5\min(\{C(i)\})$ , где  $C(i)$  – вейвлет-коэффициенты,  $i = 1\dots N$ . Также не учтена ситуация, когда имеется большая амплитудная разница между QRS-комплексом и Р, Т зубцами. В этом случае метод является малоэффективным. Поэтому, для точного обнаружения Р и Т зубцов, ав-

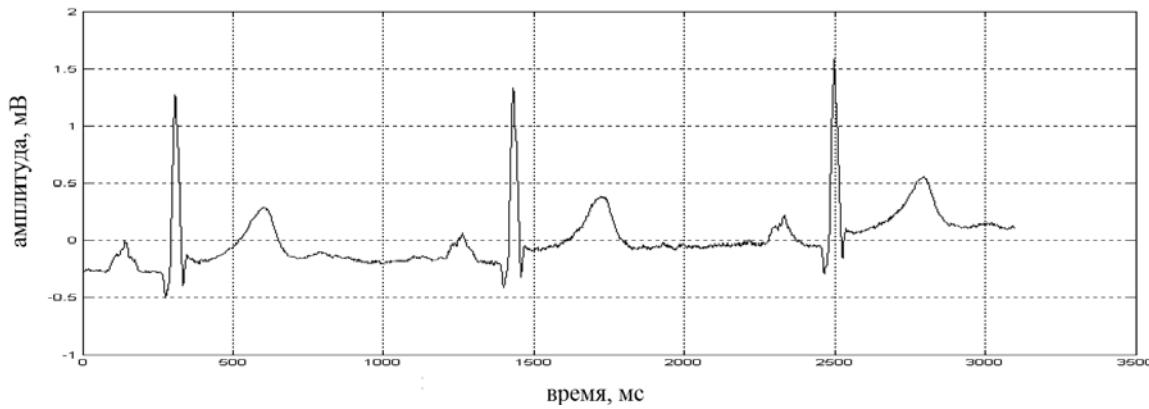


Рис. 4. Исходный кардиосигнал

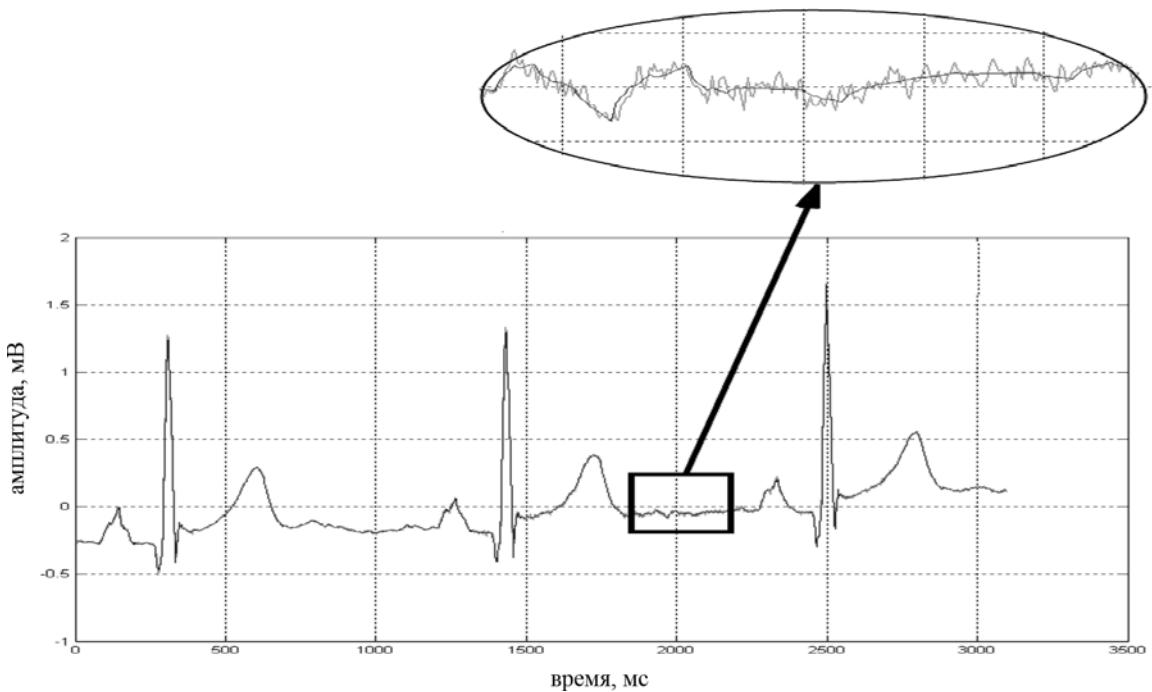


Рис. 5. Результат обробки ЭКГ-сигнала

торами предложено после обнаружения QRS-комплексов «удалить» их (QRS-комpleksы), аппроксимируя линейно каждый такой участок сигнала.

Таким образом, процедура обнаружения важных координат точек кардиосигнала состоит из следующих этапов.

#### 1. Выделение QRS-комплексов:

- Применить CWT с масштабным коэффициентом  $a = 15$ .

- Подсчитать пороговые значения  $t_1 = 0,5\max(\{C(i)\})$  и  $t_2 = 0,5\min(\{C(i)\})$ .

- Найти пары коэффициентов, пересекающие нуль.

- Выбрать две последовательные пары так, чтобы между каждой из них находился вейвлет-коэффици-

ент, превышающий по модулю значение порога  $t_1$  и  $t_2$ . Тогда первый вейвлет-коэффициент будет началом QRS-комплекса, второй – пиком комплекса, а третий – его смещением.

#### 2. «Удаление» QRS-комплексов:

Выполнить линейную аппроксимацию участков сигнала между точками, обозначенными как начало и смещение QRS-комплексов.

#### 3. Выделение Р и Т зубцов:

- Применить CWT с масштабным коэффициентом  $a = 41$ .

- Подсчитать пороговые значения  $t_1 = 0,5\max(\{C(i)\})$  и  $t_2 = 0,5\min(\{C(i)\})$ .

- Найти пары коэффициентов, пересекающие нуль.

Выбрать две последовательные пары так, чтобы между каждой из них находился вейвлет-коэффициент, превышающий по модулю значение порога  $t_1$  и  $t_2$ . Тогда первый вейвлет-коэффициент будет началом Р-зубца, второй – пиком зубца, а третий – его смещением.

Выбрать следующие две последовательные пары таким же образом, как и две предыдущие. Теперь первый вейвлет-коэффициент будет началом Т-зубца, второй – пиком зубца, а третий – его смещением.

Этапы работы процедуры проиллюстрированы на рис. 6–10.

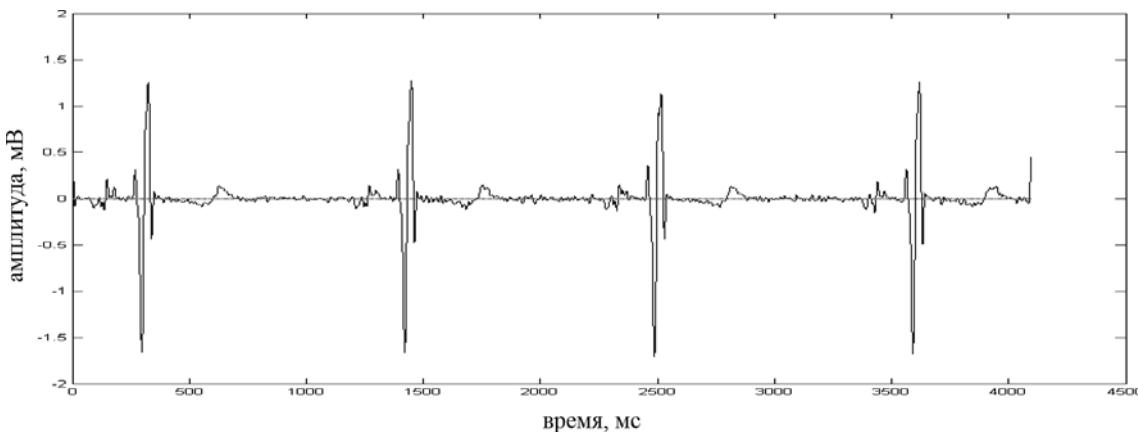


Рис. 6. Применение CWT с масштабным коэффициентом  $a = 15$  к ЭКГ-сигналу

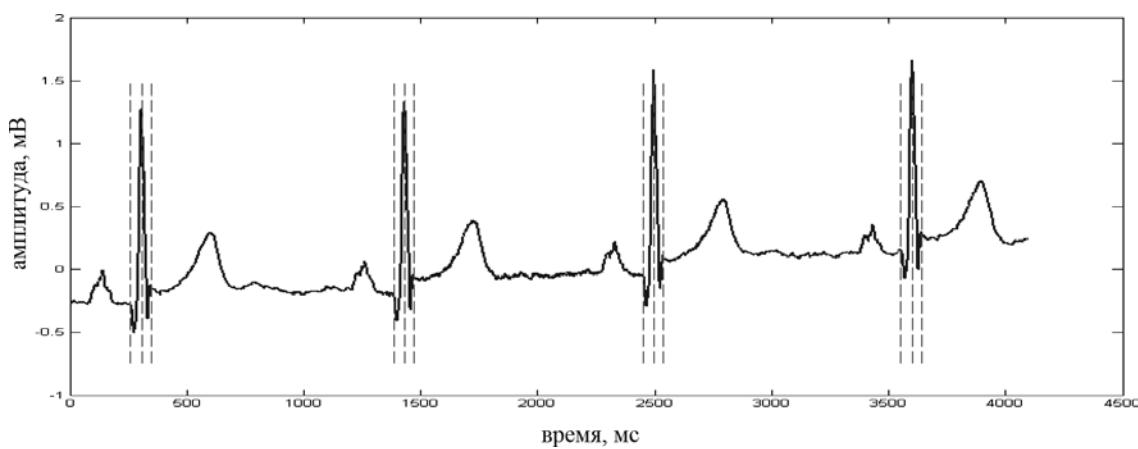


Рис. 7. Выделенные QRS-комплексы ЭКГ-сигнала

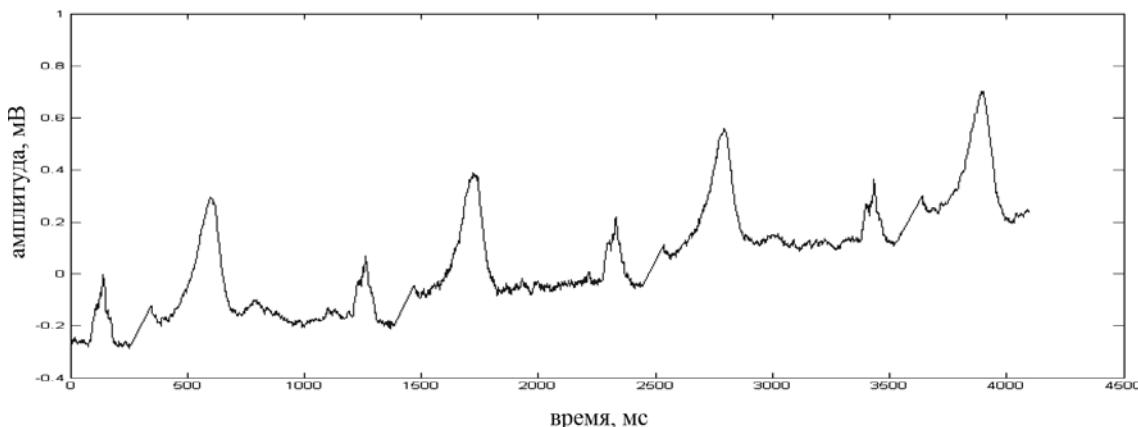


Рис. 8. «Удаление» QRS-комплексов из ЭКГ-сигнала

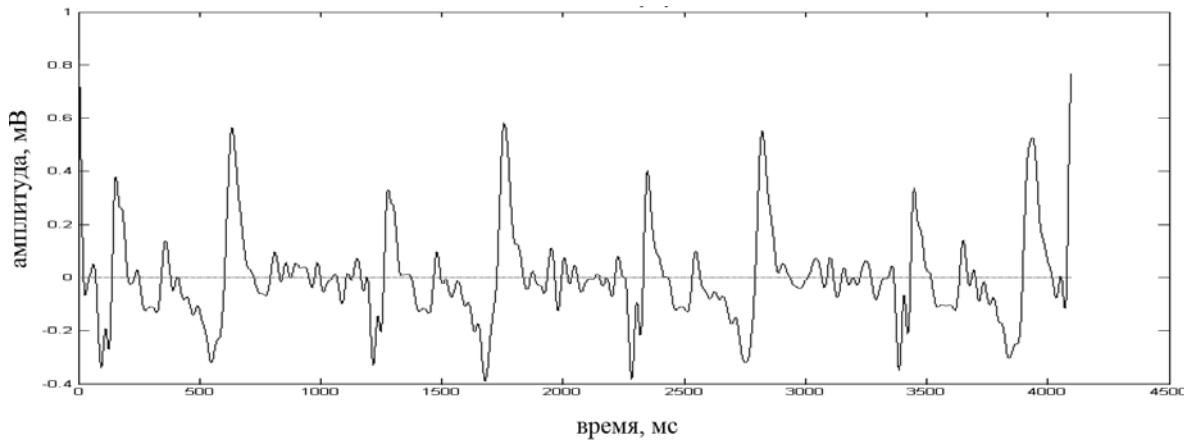
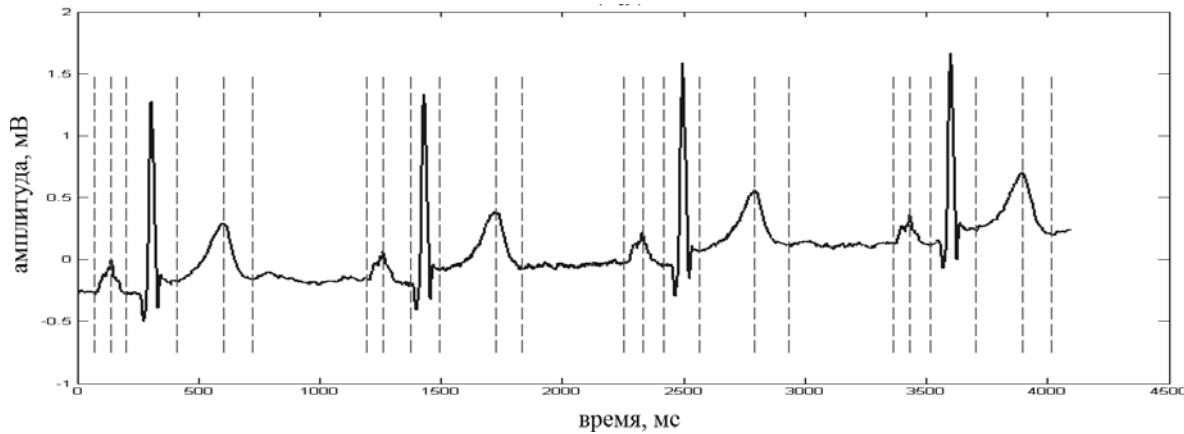
Рис. 9. Применение CWT с масштабным коэффициентом  $a = 41$  к ЭКГ-сигналу

Рис. 10. Выделенные Р и Т зубцы ЭКГ-сигнала

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения важных координат точек кардиосигнала (начало, пик и смещение Р-зубца, QRS-комплекса и Т-зубца), использовались базы данных ЭКГ Phisionet. Было протестировано тридцать пять кардиограмм людей с различными заболеваниями сердца

(30) и здоровых людей (5). Среди них: блокада пучков Гиса (6), атриовентрикулярная блокада (3), гипертрофия миокарда (6), стенокардия (5), инфаркт миокарда (10).

Результаты тестирования кардиосигналов здоровых людей и людей с различными патологиями приведены в табл. 5.

**Таблица 5.** Точность обнаружения Р-QRS-Т комплексов в ЭКГ-сигналах здоровых людей и людей с различными патологиями

Диагноз	Точность обнаружения, %
Блокада пучков Гиса	97–98
Атриовентрикулярная блокада	98–99
Гипертрофия миокарда	98–99
Стенокардия	98–99
Инфаркт миокарда	97–98
Без патологий	98–99

## ВЫВОДЫ

1. Обоснован выбор типа вейвлет-преобразования и базисного вейвлета для анализа кардиосигналов (непрерывное вейвлет-преобразование с использованием базиса «bior1.5»).

2. Обоснован выбор масштабного коэффициента при непрерывном вейвлет-преобразовании для обнаружения P, QRS и T зубцов (15 масштаб для обнаружения QRS-комплекса и 41 масштаб для обнаружения P и T зубцов).

3. Усовершенствован метод обнаружения P-QRS-T зубцов: предложено пороговое значение и использование аппроксимации сигнала в областях QRS-комплекса с целью повышения точности обнаружения P и T зубцов.

4. Проанализированы существующие методики очистки сигналов от шумов.

5. Обоснован выбор типа и метода вейвлет-трешолдинга (локальный многоуровневый жесткий трешолдинг с использованием метода Берга – Массара и вейвлета «db4» на четвертом уровне разложения в качестве базиса).

Разработанный метод анализа ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования в системе электрокардиографии высокого разрешения позволяет «очистить» кардиосигнал от шумов без потери информации. С помощью метода можно обнаружить девять важных координат точек кардиосигнала: начало, пик и смещение P-зубца, QRS-комплекса и T-зубца с точностью 98–99 %. Предлагаемый подход значительно увеличивает точность обнаружения P и T зубцов.

Направлением дальнейших исследований является разработка системы анализа и диагностики кардиосигнала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зубинов, Ю. И. Азбука ЭКГ и боли в сердце / Ю. И. Зубинов. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. – 240 с.
- Хан, М. Г. Быстрый анализ ЭКГ / М. Г. Хан. – М. : Бином, 1999. – 230 с.
- Хэмптон, Дж. Атлас ЭКГ: 150 клинических ситуаций / Дж. Хэмптон. – М. : Медицинская литература, 2007. – 320 с.
- Смоленцев, Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Смоленцев Н. К. – М. : ДМК Пресс, 2008. – 448 с.
- Алексеев, К. А. Очерк «Вокруг CWT» [Электронный ресурс] / Алексеев К. А. – Электрон. дан. – Режим доступа: <http://matlab.exponenta.ru/wavelet/> book3/index.php, вільний. – Заг. з екрану.
- Martinez, J. P. A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases / Martinez J. P., Almeida R., Laguna P. // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2004. – Vol. 51. – P. 570–581.
- Vitec, M. A wavelet-based ECG delineation in Multilead ECG signals: Evaluation on the CSE Database / Vitec M., Hrubes J., Kozumplik J. // IFMBE Proceedings. – 2009. – Vol.25. – P. 177–180.
- Sahambi, J. S. Using wavelet transform for ECG characterization / Sahambi J. S., Tandon S. B. // IEEE Engineering in Medicine and Biology. – 2000. – Vol. 9. – P. 1532–1546.
- Chouhan, V. S. Delineation of QRS-complex, P and T-wave in 12-lead ECG / Chouhan V. S., Mehta S. S., Lingayat N. S. // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – 2008. – Vol. 8. – P. 185–190.
- De Chazal, P. Automatic measurement of the QRS onset and offset in individual ECG leads / De Chazal P., Cellier B. // IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. – 1996. – Vol. 4. – P. 1399–1403.
- Laguna, P. Automatic detection of wave boundaries in multilead ECG signals / Laguna P., Jane R., Caminal P. // Computers and Biomedical Research. – 1994. – Vol. 27. – P. 45–60.
- Dohoto, D. L. De-Noising by soft-thresholding / Dohoto D. L. // IEEE Transactions on Information Theory. – 1995. – Vol. 41. – P. 613–627.
- Dohoto, D. L. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage / Dohoto D. L., Johnstone I. M. // Biometrika. – 1994. – Vol. 81. – P. 425–455.
- Walden, A. T. Spectrum estimation by wavelet thresholding of multitaper estimators / Walden A. T., Percival D. B., McCoy E. J. // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1998. – Vol. 46. – P. 3153–3165.
- Luisier, F. A new SURE approach to image denoising: Interscale Orthonormal wavelet thresholding / Luisier F., Blu T., Unser M. // IEEE Transactions on image processing. – 2007. – Vol. 16. – P. 593–606.
- Stein, C. Estimation of the mean of a multivariate normal distribution / Stein C. // Ann. Statist. – 1981. – Vol. 9. – P. 1135–1151.

Надійшла 14.09.2010

Дубровін В. І., Твердохліб Ю. В.

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ АНАЛІЗУ ЕКГ-СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОКАРДІОГРАФІЇ ВИСОКОГО ПІДСИЛЕННЯ

У цій статті запропоновано модифікований метод аналізу ЕКГ-сигналів, який базується на безперервному вейвлет-перетворенні та одномасштабному підході. Алгоритм дозволяє знайти дев'ять важливих координат точок у всіх відділеннях кардиосигналу: початок, пік та зсув T зубця, QRS комплексу та P зубця. Реалізований алгоритм забезпечує високу точність у виявленні P і T зубців, що було невирішеною частиною попередніх методів. Також запропоновано оптимальний спосіб фільтрації кардиосигналу від шумових складових, який є модифікацією методів вейвлет-трешолдинга.

**Ключові слова:** електрокардіограма, P-QRS-T комплекс, вейвлет-перетворення.

Dubrovin V. I., Tverdohlib J. V.

IMPROVEMENT OF ECG SIGNALS ANALYSIS BASED ON WAVELET CONVERSION IN HIGH-RESOLUTION ELECTROCARDIOGRAPHY SYSTEM

In this paper we present an improved method of ECG signals delineation based on continuous wavelet conversion and single-scale approach. The algorithm permits to detect nine reference points in all ECG parts: onset, peak and offset of T wave, QRS complex and P wave. The implemented algorithm significantly increases the accuracy of P wave and T wave detection, which was the problem of the previous methods. We propose also the improved method of ECG signals filtering from noise as updating of the wavelet-thresholding methods.

**Key words:** electrocardiogram, P-QRS-T waves, wavelet conversion.

<sup>1</sup>Аспирант Харківського національного університета радіоелектроники

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, асистент Харківського національного університета радіоелектроники

<sup>3</sup>Д-р техн. наук, професор Харківського національного університета радіоелектроники

## АДАПТИВНАЯ НЕЙРО-ФАЗЗИ СЕТЬ КОХОНЕНА

В статье предложен рекуррентный алгоритм обучения составной кластеризующей нейро-фаззи сети Кохонена, являющейся обобщением WTA и WTM принципов обучения и алгоритмов Кашьяпа – Блейдона и Цыпкина, а также объединяющий в себе возможностный и вероятностный подходы к кластеризации.

**Ключевые слова:** алгоритм самообучения, кластеризация, нейро-фаззи сеть, самоорганизующаяся карта Кохонена.

### ВВЕДЕНИЕ

Задача кластеризации (классификации без учителя) достаточно часто встречается во многих приложениях, связанных с интеллектуальным анализом данных. Традиционный подход к решению этих задач предполагает, что каждое наблюдение может относиться только к одному кластеру, хотя более естественной представляется ситуация, когда обрабатываемый вектор признаков с разными уровнями принадлежности (вероятности, возможности) может принадлежать сразу нескольким классам. Данная ситуация является предметом рассмотрения нечеткого (фаззи) кластерного анализа, интенсивно развивающегося в двух направлениях: вероятностном [1–5] и возможностном [6, 7] подходах. Большинство алгоритмов нечеткой кластеризации предназначено для работы в пакетном режиме, когда весь массив данных, подлежащих обработке, задан априорно. В то же время существует широкий класс задач, когда данные поступают на обработку последовательно, в on-line режиме. Алгоритмов, предназначенных для решения этих задач, известно сравнительно немного [8–10], при этом они реализуют вероятностный подход на основе рекуррентной оптимизации принятой нечеткой целевой функции [1].

Для последовательной обработки данных при решении задачи кластеризации наилучшим образом приспособлены искусственные нейронные сети Кохонена [11], имеющие однослойную архитектуру с латеральными связями и обучаемые на основе принципов «победитель получает все» (WTA) или «победитель получает больше» (WTM). Данные сети продемонстрировали свою эффективность при решении многих задач с непересекающимися кластерами. Необходимость решения задач кластеризации в последовательном режиме обработки в условиях пересека-

ющихся классов привела к появлению самообучающихся гибридных нейро-фаззи систем, являющихся обобщением нейронной сети Кохонена и обладающих, благодаря использованию специальных алгоритмов настройки своих семантических весов, более широкими функциональными возможностями. Так, в [12, 13] была введена модификация сети Кохонена, основанная на нечетких правилах. Данная сеть показала свою эффективность в ряде задач, связанных с распознаванием образов, однако численная громоздкость затрудняет ее использование в on-line режиме. В [14] была предложена сеть Кохонена с нечетким выводом, обучаемая на основе комбинации правил Кохонена и Гроссберга. Основным недостатком этой конструкции является зависимость получаемых результатов от выбора свободных параметров процедуры обучения. В [15] была предложена, а в [16] развита, так называемая нечеткая кластеризующая сеть Кохонена (FKCN), основанная на алгоритме нечетких c-средних (FCM) Бездека [1], который может быть записан и в рекуррентной форме. Лежащий в ее основе вероятностный подход к задаче кластеризации имеет принципиальные недостатки, ограничивающие ее использование в задачах с неизвестным заранее количеством кластеров.

В данной работе мы вводим новую двухслойную адаптивную нечеткую кластеризующую сеть Кохонена (AFKCN), являющуюся адаптивной модификацией FKCN [15] и дальнейшим развитием конструкции, рассмотренной в [17], а также рекуррентные алгоритмы ее обучения, являющиеся обобщением правил Кохонена (WTA и WTM) и предназначенные для решения задачи в режиме последовательной обработки данных на основе как вероятностного, так и возможностного подходов.

## 1. АРХІТЕКТУРА АДАПТИВНОЇ НЕЧЕТКОЇ КЛАСТЕРИЗУЮЩОЇ СЕТИ КОХОНЕНА

Архитектура предлагаемой нейро-фаззи сети приведена на рис. 1 и содержит два слоя: слой Кохонена, в котором определяются прототипы (центроиды) кластеров, и слой вычисления принадлежностей.

Входные векторы-образы  $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$  (здесь  $k = 1, 2, \dots, N, \dots$  имеет смысл или номера образа в обучающей выборке или текущего дискретного времени) с рецепторного (нулевого) слоя последовательно подаются на нейроны слоя Кохонена  $N_j^K$ , настраиваемые синаптические веса которых  $c_{ji}(k)$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$  определяют центроиды  $m$  пересекающихся кластеров  $c_j(k) = (c_{j1}(k), \dots, c_{j1}(k), \dots, c_{jn}(k))^T$ . В выходном слое, образованном нейронами  $N_j^M$ , вычисляются уровни принадлежности  $u(k) = (u_1(k), u_2(k), \dots, u_m(k))^T$  текущего вектора  $x(k)$  к  $j$ -му кластеру. По латеральным связям слоя Кохонена (показаны пунктиром) реализуются процессы конкуренции и кооперации, лежащие в основе WTM и WTA принципов.

## 2. АДАПТИВНИЙ РЕКУРРЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ ОБУЧЕННЯ НЕЧЕТКОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ

В классе процедур нечеткой кластеризации наиболее строгими с математической точки зрения являются алгоритмы, основанные на целевых функциях [1] и решающие задачу их оптимизации при тех или иных априорных предположениях. Наиболее распространенным здесь является вероятностный под-

ход, основанный на минимизации критерия (целевой функции)

$$E(u_j, c_j) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^m u_j^\beta \|x(k) - c_j\|^2 \quad (1)$$

при ограничениях

$$\sum_{j=1}^m u_j(k) = 1, \quad (2)$$

$$0 \leq \sum_{k=1}^N u_k(k) \leq N, \quad (3)$$

где  $u_j(k) \in [0, 1]$ ,  $\beta$  – неотрицательный параметр фаззикации (фаззификатор), определяющий размытость границ между кластерами,  $k = 1, 2, \dots, N$ . Результатом кластеризации является  $(N \times m)$ -матрица  $U = \{u_j(k)\}$ , называемая матрицей нечеткого разбиения.

Заметим, что поскольку элементы матрицы  $U$  могут рассматриваться как вероятности гипотез принадлежности векторов данных определенным кластерам, то процедуры, порождаемые минимизацией (1) при ограничениях (2), (3), называются вероятностными алгоритмами нечеткой кластеризации.

Вводя функцию Лагранжа

$$\begin{aligned} L(u_j(k), c_j, \lambda(k)) &= \\ &= \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^m u_j^\beta(k) \|x(k) - c_j\|^2 + \\ &+ \sum_{k=1}^N \lambda(k) \left( \sum_{j=1}^m u_j(k) - 1 \right) \end{aligned}$$

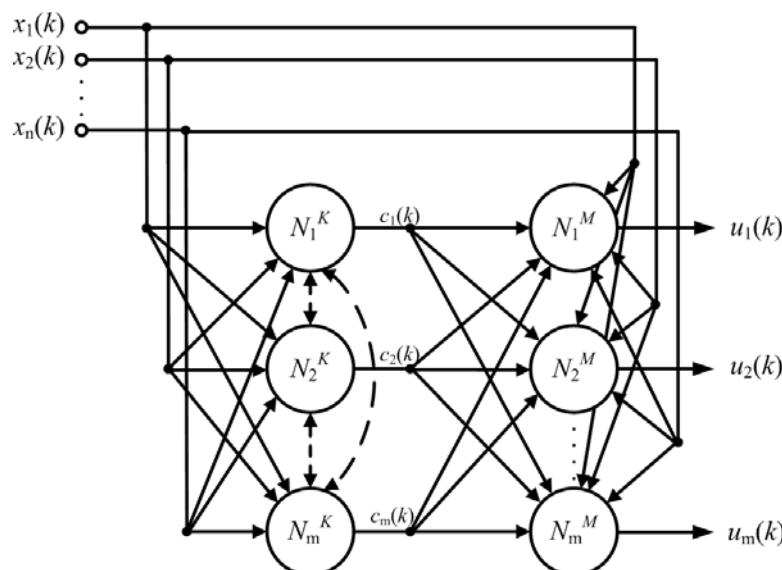


Рис. 1. Адаптивна нечтка кластеризуюча сеть Кохонена

(здесь  $\lambda(k)$  – неопределенный множитель Лагранжа) и решая систему уравнений Каруша – Куна – Таккеара, несложно получить искомое решение в виде

$$\left\{ \begin{array}{l} u_j(k) = \frac{(\|x(k) - c_j\|^2)^{\frac{1}{1-\beta}}}{\sum_{l=1}^m (\|x(k) - c_l\|^2)^{\frac{1}{1-\beta}}}, \\ c_j = \frac{\sum_{k=1}^N u_j^\beta(k) x(k)}{\sum_{k=1}^N u_j^\beta(k)}, \\ \lambda(k) = -\left( \left( \sum_{l=1}^m \beta \|x(k) - c_l\|^2 \right)^{\frac{1}{1-\beta}} \right)^{1-\beta}, \end{array} \right. \quad (4)$$

совпадающее при  $\beta = 2$  с алгоритмом нечетких  $C$ -средних Бездека:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_j(k) = \frac{\|x(k) - c_j\|^2}{\sum_{l=1}^m \|x(k) - c_l\|^2}, \\ c_j = \frac{\sum_{k=1}^N u_j^2(k) x(k)}{\sum_{k=1}^N u_j^2(k)}. \end{array} \right. \quad (5)$$

Использование процедур (4), (5) подразумевает, что вся выборка, подлежащая кластеризации и содержащая  $N$  наблюдений, задана заранее и не может изменяться в процессе обработки.

Для последовательной обработки данных, поступающих в on-line режиме, в [18–20] был использован рекуррентный алгоритм, в основе которого лежит процедура нелинейного программирования Эрроу – Гурвица – Удзвавы:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_j(k+1) = \frac{(\|x(k+1) - c_j(k)\|)^{\frac{2}{1-\beta}}}{\sum_{l=1}^m (\|x(k+1) - c_l(k)\|)^{\frac{2}{1-\beta}}}, \\ c_j(k+1) = c_j(k) + \eta(k) u_j^\beta(k+1) (x(k+1) - c_j(k)), \end{array} \right. \quad (6)$$

являющийся обобщением алгоритма обучения Чанга – Ли [9, 10] и совпадающий при  $\beta = 2$  с градиентной процедурой кластеризации Парка – Дэгтера [8]

$$\left\{ \begin{array}{l} u_j(k+1) = \frac{(\|x(k+1) - c_j(k)\|)^{-2}}{\sum_{l=1}^m (\|x(k+1) - c_l(k)\|)^{-2}}, \\ c_j(k+1) = c_j(k) + \eta(k) u_j^2(k+1) (x(k+1) - c_j(k)). \end{array} \right.$$

Рассматривая соотношения (6) с позиций обучения нейросети Кохонена, можно заметить, что множитель  $u_j^\beta(k+1)$  во втором выражении соответствует функции соседства в правиле обучения на основе WTM-принципа.

Несложно видеть, что при  $\beta = 1$  и  $u_j(k) \in \{0, 1\}$  процедура (6) совпадает с четким алгоритмом  $C$ -средних (HCM), а при  $\beta = 0$  получаем стандартное WTA-правило обучения Кохонена [11]

$$c_j(k+1) = c_j(k) + \eta(k)(x(k+1) - c_j(k)), \quad (7)$$

первоначально введенное Кашьяпом – Блейдоном [21] в шестидесятых годах прошлого века. Правило (7), как можно заметить, оптимизирует целевую функцию

$$E(c_j) = \sum_{k=1}^N \|x(k) - c_j\|^2, \quad \sum_{j=1}^m N_j = N,$$

прямая минимизация которой ведет к обычной оценке среднего арифметического

$$c_j(k) = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} x(k), \quad (8)$$

где  $N_j$  – число векторов  $x(k)$ , отнесенных к  $j$ -му кластеру в процессе конкуренции. Переписывая (8) в рекуррентной форме, приходим к оптимальному алгоритму самообучения Цыпкина [22]

$$c_j(k+1) = c_j(k) + \frac{1}{N_j(k+1)} \sum_{k=1}^{N_j} (x(k+1) - c_j(k)),$$

(здесь  $N_j(k+1)$  – число векторов  $x(k)$ , отнесенных к  $j$ -му кластеру на  $(k+1)$ -й итерации алгоритма), являющуюся процедурой стохастической аппроксимации в чистом виде.

Таким образом, алгоритм (6) может рассматриваться в качестве правила обучения нейро-фаззи-сети, приведенной на рис. 1, объединяющего в себе вероятностную нечеткую кластеризацию, правила самообучения Кохонена, алгоритмы Кашьяпа – Блейдона и Цыпкина.

Основные недостатки вероятностного подхода связаны с ограничением (2), требующим равенства единице суммы принадлежностей конкретного вектора-образа всем кластерам. В простейшем случае двух кластеров и двух образов вектор, равноправно принадлежащий обоим классам, и вектор, не принадлежащий ни одному из них, но лежащий на равном расстоянии от обоих центроидов, имеют одинаковые уровни принадлежности, равные 0,5. Естественно, что данное обстоятельство, требующее точного априорного знания числа кластеров  $m$  и ухудшающее точность получаемых результатов, привело к появлению возможностного подхода к нечеткой кластеризации [6, 7].

В возможностных алгоритмах кластеризации целевая функция имеет вид

$$E(u_j, c_j) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^m u_j^\beta(k) \|x(k) - c_j\|^2 + \sum_{j=1}^m \mu_j \sum_{k=1}^N (1 - u_j(k))^\beta, \quad (9)$$

где скалярный параметр  $\mu_j > 0$  определяет расстояние, на котором уровень принадлежности принимает значение 0,5, т. е. если

$$\|x(k) - c_j\|^2 = \mu_j,$$

то  $u_j(k) = 0,5$ .

Прямая оптимизация (9) по  $u_j, c_j$  дает очевидное решение

$$\left\{ \begin{array}{l} u_j(k) = \left( 1 + \left( \frac{\|x(k) - c_j\|^2}{\mu_j} \right)^{\frac{1}{1-\beta}} \right)^{-1}, \\ c_j = \frac{\sum_{k=1}^N u_j^\beta(k) x(k)}{\sum_{k=1}^N u_j^\beta(k)}, \\ \mu_j = \frac{\sum_{k=1}^N u_j^\beta(k) \|x(k) - c_j\|^2}{\sum_{k=1}^N u_j^\beta(k)}, \end{array} \right. \quad (10)$$

при  $\beta = 2$  принимающее вид

$$\left\{ \begin{array}{l} u_j(k) = \frac{\mu_j}{\mu_j + \|x(k) - c_j\|^2}, \\ c_j = \frac{\sum_{k=1}^N u_j^2(k) x(k)}{\sum_{k=1}^N u_j^2(k)}, \\ \mu_j = \frac{\sum_{k=1}^N u_j^2(k) \|x(k) - c_j\|^2}{\sum_{k=1}^N u_j^2(k)}. \end{array} \right. \quad (11)$$

Интересно заметить, что выражения, описывающие центроиды, в (4) и (10) и в (5) и (11) совпадают, однако принадлежности вычисляются различными способами.

Если данные поступают на обработку последовательно, то вместо (10), (11) могут быть использованы рекуррентные алгоритмы [17–20] вида

$$\left\{ \begin{array}{l} u_j(k) = \frac{1}{1 + \left( \frac{\|x(k) - c_j\|^2}{\mu_j(k)} \right)^{\frac{1}{1-\beta}}}, \\ c_j(k+1) = c_j(k) + \eta(k) u_j^\beta(k+1) (x(k+1) - c_j(k)), \\ \mu_j(k+1) = \frac{\sum_{p=1}^{k+1} u_j^\beta(p) \|x(p) - c_j(k+1)\|^2}{\sum_{p=1}^{k+1} u_j^\beta(p)} \end{array} \right. \quad (12)$$

и

$$\left\{ \begin{array}{l} u_j(k) = \frac{\mu_j(k)}{\mu_j(k) + \|x(k+1) - c_j(k)\|^2}, \\ c_j(k+1) = c_j(k) + \eta(k) u_j^\beta(k+1) (x(k+1) - c_j(k)), \\ \mu_j(k+1) = \frac{\sum_{p=1}^{k+1} u_j^\beta(p) \|x(p) - c_j(k+1)\|^2}{\sum_{p=1}^{k+1} u_j^\beta(p)} \end{array} \right. \quad (13)$$

Несложно заметить, что процедуры (12), (13) также по сути являются WTM-правилами обучения сети Кохонена, однако, что интересно, первое соотношение, задающее уровень принадлежности образа к кластеру, есть стандартная колоколообразная функция принадлежности с изменяющимся во времени параметром ширины.

Алгоритмы, построенные на основе возможностного подхода, в отличие от вероятностных алгоритмов, позволяют в процессе обработки данных обнаруживать появление новых кластеров. Так, если уровень принадлежности наблюдения  $x(k+1)$  ко всем кластерам окажется ниже некоторого наперед заданного порога, можно говорить о появлении  $(m+1)$ -го кластера с начальными координатами центрида  $c_{m+1} = x(k+1)$ .

### 3. СОСТАВНАЯ АДАПТИВНАЯ НЕЧЕТКАЯ КЛАСТЕРИЗУЮЩАЯ СЕТЬ КОХОНЕНА (CAFKCN)

Поскольку заранее невозможно сказать, какой из подходов – вероятностный или возможностный – более предпочтителен при решении конкретной задачи, целесообразно их одновременное использование. Кроме того, решения, полученные с помощью вероятностных процедур, рекомендуется использовать в качестве начальных условий для возможностных алгоритмов [7, 23]. В связи с этим целесообразно параллельное использование обоих подходов в рамках составной адаптивной нечеткой кластеризующей сети Кохонена (CAFKCN), приведенной на рис. 2.

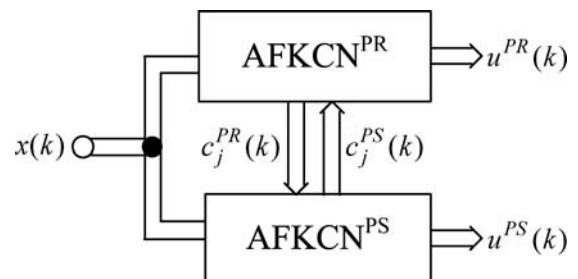


Рис. 2. Составная адаптивная нечеткая кластеризующая сеть Кохонена

Данная конструкция образована двумя параллельно включенными адаптивными нечеткими кластеризирующими сетями Кохонена (AFKCN), одна из которых обучается с помощью алгоритма (6), а другая – алгоритма (12). Индексы PR и PS обозначают возможностную и вероятностную оценки соответственно.

Алгоритм обучения CAFKCN имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} c_j^{PR}(k+1) = c_j^{PS}(k) + \eta(k)(u_j^{PR}(k))^\beta(x(k+1) - c_j^{PS}(k)), \\ u_j^{PR}(k+1) = \frac{\|x(k+1) - c_j^{PR}(k+1)\|^{\frac{2}{1-\beta}}}{\sum_{l=1}^m \|x(k+1) - c_l^{PR}(k+1)\|^{\frac{2}{1-\beta}}}, \\ c_j^{PS}(k+1) = c_j^{PR}(k) + \eta(k)(u_j^{PS}(k))^\beta(x(k+1) - c_j^{PR}(k+1)), \\ u_j^{PS}(k+1) = \frac{1}{1 + \left( \frac{\|x(k) - c_j^{PS}(k+1)\|^2}{\mu_j(k)} \right)^{\frac{1}{1-\beta}}}, \\ \mu_j(k+1) = \frac{\sum_{p=1}^{k+1} (u_j^{PS}(p))^\beta \|x(p) - c_j^{PS}(k+1)\|^2}{\sum_{p=1}^{k+1} (u_j^{PS}(p))^\beta}, \end{array} \right. \quad (14)$$

при этом при вычислении центроидов кластеров сети обмениваются между собой соответствующей информацией. Признаком правильного оценивания с помощью алгоритма (14) является выполнение неравенства

$$\sum_{l=1}^m \|c_l^{PR} - c_l^{PS}\|^2 \leq \varepsilon, \quad (15)$$

где  $\varepsilon$  определяет приемлемую точность кластеризации.

## ВЫВОДЫ

В статье предлагается подход к обучению кластеризующей сети Кохонена в условиях пересекающихся кластеров на основе адаптивных процедур вероятностной и возможностной нечеткой кластеризации, являющихся обобщением WTA и WTM правил Кохонена, алгоритмов Кашьяпа – Блейдона и Цыпкина. Компьютерное моделирование демонстрирует эффективность развивающегося подхода для решения задач кластеризации данных в условиях неопределенности. Результаты могут быть использованы для решения задач интеллектуального анализа данных, ранней диагностики неисправностей, Web-Mining и т. п., когда размер выборки данных заранее неизвестен, а сами эти данные должны обрабатываться в реальном времени.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bezdek, J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms / Bezdek J. C. – N. Y. : Plenum Press, 1981. – 272 p.
2. Gath, I. Unsupervised optimal fuzzy clustering / Gath I., Geva A. B. // Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1989. – 2. – 7. – P. 773–787.
3. Höppner, F. Fuzzy-Clusteranalyse. / Höppner F., Klawonn F., Kruse R. – Braunschweig : Vieweg, 1997. – 280 S.
4. Höppner, F. Fuzzy Clustering Analysis: Methods for Classification, Data Analysis and Image Recognition. / Höppner F., Klawonn F., Kruse R., Runkler T. – Chichester : John Wiley & Sons, 1999. – 289 p.
5. Gan, G. Data Clustering: Theory, Algorithms and Applications / Gan G.; Ma Ch.; Wu J. – Philadelphia : SIAM, 2007. – 466 p.
6. Krishnapuram, R. A possibilistic approach to clustering / Krishnapuram R., Keller J. M. // Fuzzy Systems. – 1993. – 1. – № 2. – P. 98–110.
7. Krishnapuram, R. Fuzzy and possibilistic clustering methods for computer vision / Krishnapuram R., Keller J. M. // Neural Fuzzy Systems. – 1994. – 12. – P. 133–159.
8. Park, D. C. Gradient based fuzzy c-means (GBCFM) algorithm / Park D. C., Dagher I. // Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks. – 1984. – P. 1626–1631.
9. Chung, F. L. Fuzzy competitive learning / Chung F. L., Lee T. // Neural Networks. – 1994. – 7. – № 3. – P. 539–552.
10. Chung, F.-L. Unsupervised fuzzy competitive learning with monotonically decreasing fuzziness / Chung F.-L., Lee T. // Proc. 1993 Int. Joint Conf. on Neural Networks. – 1993. – P. 2929–2932.
11. Kohonen, T. Self-Organizing Maps / Kohonen T. – Berlin : Springer-Verlag. – 1995. – 362 p.
12. Vuorimaa, P. Fuzzy self-organizing map / Vuorimaa P. // Fuzzy Sets and Systems. – 1994. – 66. – P. 223–231.
13. Vuorimaa, P. Use of the fuzzy self-organizing map in pattern self-recognition / Vuorimaa P. // Proc. 3-rd IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems «FUZZ-IEEE'94». – Orlando, USA, 1994. – P. 798–801.
14. Bodyanskiy, Ye. Combined learning algorithm for a self-organizing map with fuzzy inference / Bodyanskiy Ye., Gorshkov Ye., Kolodyazhnyi V., Stephan A. // Computational intelligence, theory and applications: International Conference 8th Fuzzy Days in Dortmund, Germany, Sept. 29 – Oct. 01, 2004 ; proceedings / B. Reusch (Ed.). – Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – P. 641–650. – (Advanced in Soft Computing ; Vol. 33).
15. Gorshkov, Ye. New recursive learning algorithms for fuzzy Kohonen clustering network / Gorshkov Ye., Kolodyazhnyi V., Bodyanskiy Ye. // Proc. 17th Int. Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems. – Rapperswil, Switzerland, 2009. – P. 58–61.
16. Pascual-Marqui, R. D. Smoothly distributed fuzzy c-means: a new self-organizing map. / Pascual-Marqui R. D., Pascual Montano A. D., Kochi K., Carazo J. M. // Pattern Recognition. – 2001. – 34. – P. 2395–2402.
17. Tsao, E. C.-K. Fuzzy Kohonen clustering network / Tsao E. C.-K., Bezdek J. C., Pal N. P. // Pattern Recognition. – 1994. – 27. – № 5. – P. 757–764.
18. Бодянський, Е. В. Об адаптивному алгоритму нечеткой кластеризации данных / Бодянський Е. В., Горшков Е. В., Кокшев И. В., Колодязький В. В. // Адаптивні системи автоматичного управління. – Вип. 5(25). – Дніпропетровськ : Системні технології, 2002. – С. 108–117.
19. Bodyanskiy, Ye. Recursive fuzzy clustering algorithms / Bodyanskiy Ye., Kolodyazhnyi V., Stephan A. // Proc. 10<sup>th</sup> East West Fuzzy Colloquium. – Zittau, Germany, 2002. – P. 276–283.
20. Bodyanskiy, Ye. Computational intelligence techniques for data analysis / Bodyanskiy Ye. // Lecture Notes in Informatics. – 2005. – Vol. P-72. – P. 15–36.
21. Kashyap, R. L. Estimation of probability density and distribution functions / Kashyap R. L., Blaydon C. C. // IEEE Trans. on Information Theory. – 1968. – 14. – № 4. – P. 549–556.
22. Цыпкин, Я. З. Основы теории обучающихся систем / Цыпкин Я. З. – Москва : Наука, 1970. – 252 с.

23. Klawonn, F. Constructing a fuzzy controller from data / Klawonn F., Kruse R. // Fuzzy Sets and Systems. – 1997. – 85. – P. 117–193.

Надійшла 21.10.2010

Колчигін Б. В., Волкова В. В., Бодянський Є. В.  
АДАПТИВНА НЕЙРО-ФАЗЗІ МЕРЕЖА КОХОНЕНА  
У роботі запропоновано рекурентний алгоритм навчання складової нейро-фаззі мережі Кохонена для кластеризації. Запропонований алгоритм є узагальненням WTA, WTM принципів навчання та алгоритмів Кашьяпа-Блейдона та Ципкіна, а також об'єднує в собі імовірнісний та можливісний методи навчання.

УДК 004.93

Субботин С. А.

*Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ НЕЙРОМОДЕЛЕЙ

Экспериментально исследован комплекс информационных показателей качества диагностических нейромоделей при решении практических задач. Получены качественные зависимости между показателями, учет которых при формировании интегральных показателей качества позволяет существенно упростить вычисления путем исключения дублирующихся показателей.

**Ключевые слова:** качество, модель, техническая диагностика, нейронная сеть, нейро-нечеткая сеть.

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость обеспечения высокого уровня качества выпускаемых и эксплуатируемых изделий обуславливает потребность в разработке систем неразрушающей диагностики и контроля качества, для построения которых, в свою очередь, необходимо обладать диагностической моделью [1].

Одними из наиболее перспективных средств разработки диагностических моделей являются искусственные нейронные [2] и нейро-нечеткие сети [3], обладающие способностями к индуктивному обучению на основе прецедентов. В настоящее время известно достаточно большое количество различных архитектур нейронных и нейро-нечетких сетей, а также методов их обучения [2, 3]. Кроме того, даже для сети с фиксированной архитектурой и методом обучения вследствие свойства вариативности получаемых моделей по одной и той же выборке прецедентов возможно получить множество различных моделей, обладающих приемлемым уровнем точности. Поэтому на практике при разработке систем технической диагностики в нейросетевом или нейро-нечетком базисе является актуальной задача выбора одной из множества возможных диагностических моделей, что требует разработки информационных показателей, характеризующих качество модели.

Цель данной работы заключается в создании и экспериментальном исследовании комплекса показателей качества нейромоделей для автоматизации их построения и анализа.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА НЕЙРОМОДЕЛИ

Пусть задана обучающая выборка  $\langle x, y \rangle$ ,  $x = \{x^s\}$ ,  $x^s = \{x_j^s\}$ ,  $y = \{y^s\}$ ,  $s = 1, 2, \dots, S$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , где  $x_j^s$  – значение  $j$ -го входного признака  $s$ -го экземпляра  $x^s$  выборки,  $y^s$  – значение выходного признака, сопоставленное  $s$ -му экземпляру выборки,  $S$  – объем выборки,  $N$  – число признаков в выборке. На основе обучающей выборки  $\langle x, y \rangle$  может быть получена нейромодель  $net(w, x)$ , где  $w = \{w_j^{(\eta, i)}\}$ ,  $w_j^{(\eta, i)}$  – весовой коэффициент, сопоставленный  $j$ -му входу  $i$ -го нейрона  $\eta$ -го слоя  $x_j^{(\eta, i)}$ ,  $net = \{\varphi^{(\eta, i)}(w^{(\eta, i)}, x^{(\eta, i)})\}$ ,  $\varphi^{(\eta, i)}(w^{(\eta, i)}, x^{(\eta, i)})\}$ ,  $w^{(\eta, i)} = \{w_j^{(\eta, i)}\}$ ,  $x^{(\eta, i)} = \{x_j^{(\eta, i)}\}$ ,

$\phi^{(\eta, i)}(w^{(\eta, i)}, x^{(\eta, i)})$  и  $\psi^{(\eta, i)}(w^{(\eta, i)}, x^{(\eta, i)})$  – соответственно, весовая (дискриминантная) и активационная функции  $i$ -го нейрона  $\eta$ -го слоя.

Обозначим:  $M$  – число слоев в сети;  $N_3$  – число нейронов в  $\eta$ -м слое;  $N_h$  – число нейронов в сети;  $N_{h_{\max}}^{\max}$  – максимально допустимое число нейронов;  $N_w$  – число весов в сети;  $w_j^{(\eta, i)}$ ,  $w_j^{(\eta, i)}_{\min}$  – максимальное и минимальное возможные значения веса  $w_j^{(\eta, i)}$ ;  $w_{i,j}^{\max}$ ,  $w_{i,j}^{\min}$  – максимальное и минимальное возможные значения веса связи от  $i$ -го нейрона к  $j$ -му;  $w_{\max}$ ,  $w_{\min}$  – максимальное и минимальное возможные значения весов сети;  $\psi_{\max}^{(M, i)}$ ,  $\psi_{\min}^{(M, i)}$  – максимальное и минимальное значения  $i$ -го выхода.

Необходимо разработать информационные показатели  $\{I_i\}$ , характеризующие качество нейромодели  $f(w, x)$ , т. е. выражающие количественно наличие у модели тех или иных свойств, важных для пользователя.

## 2. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКОЙ НЕЙРОМОДЕЛИ

Традиционно используемым показателем качества нейромодели является ее ошибка  $E$  (как правило, среднеквадратическая) [2]. Однако ошибка не отражает множество свойств, которыми обладают нейромодели.

В ранних работах [4, 5] автором была предпринята попытка разработки набора показателей, характеризующих логическую прозрачность и сложность нейронных сетей прямого распространения. Однако весьма значительный набор свойств нейросетей и нейро-нечетких сетей оставался неописанным аналитически выражавшими его показателями.

Поэтому в последнее время в работах [6–9] предложены показатели: предорганизации в обучении  $I_{po}$ , обобщения  $I_G$ , соответствия нелинейностей выборки и нейромодели:  $\tilde{I}_{nl}$ , автоматизации в обучении  $I_{aut}$ , автоматизации предорганизации в обучении  $I_{apo}$ , адаптивности  $I_{adapt}$ , асимметрии весов  $I_{asym}^w$ , асимметрии модели  $I_{asym}$ , асимметрии нейронов  $I_{asym}^h$ , вариативности  $I_v$ , иерархичности  $I_h$ , интерпретабельности  $I_{interp}$ , максимальной надежности весов  $I_{wre}^{\max}$ , максимальной надежности нейронов  $I_{h\_re}^{\max}$ , нейронной пластичности  $I_{np}$ , нелинейности модели  $I_{nl}(net)$ , обобщения  $I_{gen}$ , однородности активационных функций  $I_{ha}$ , однородности дискриминантных функций  $I_{hd}$ , однородности нейронов  $I_{hn}$ , параллелизма  $I_{par}$ , обучаемости  $I_{lr}$ , пластичности нейромодели  $I_{pl}$ , разнообразия модели по отношению к генеральной совокупности  $I_{div}(net, X, Y)$ , разнообразия модели по отношению к обучающей выборке  $I_{div}(net, <x, y>)$ ,

разнообразия нейромодели  $I_{div}(net)$ , распределенности памяти  $I_{md}$ , робастности по отношению ко входам  $I_{Rb}^x$ , робастности  $I_{Rb}$ , робастности по отношению к весам  $I_{Rb}^w$ , симметрии весов  $I_{sym}^w$ , симметрии модели  $I_{sym}$ , симметрии нейронов  $I_{sym}^h$ , синаптической пластичности  $I_{sp}$ , сложности сети  $L_{net}$ , средней надежности весов  $I_{wre}^{avg}$ , средней надежности нейронов  $I_{h\_re}^{avg}$ , уверенности  $i$ -го выхода  $I_{cert}^i(x^s)$ , уверенности модели  $I_{cert}$ , функциональной блочности  $I_{fb}$ , устойчивости к шуму  $I_{tol}^{\ell}$ , чувствительности  $I_{tol}^{\ell}$ , эквивалентности  $I_{eq}$ , эквифинальности  $I_{eqf}$ , эластичности выходной переменной  $y_i$  по признаку  $x_j$   $El_{x_j}(net, y_i)$ , эмерджентности  $I_{\alpha}$ , эффективности модели  $I_{ef}$ , интегральный информационный критерий  $IC$ . Данный комплекс показателей может быть дополнен информационными показателями  $SSD$ ,  $CAIC$ ,  $MDL$ ,  $CP$ ,  $AIC$ ,  $AICc$ ,  $HQC$ ,  $BIC$ ,  $AICu$ .

Совокупность предложенных показателей [6–9] позволяет в комплексе охарактеризовать качество диагностической нейромодели.

Поскольку количество разработанных показателей [6–9] достаточно велико, то весьма важным с практической точки зрения является иерархическое упорядочивание вычисления показателей при их совместном применении.

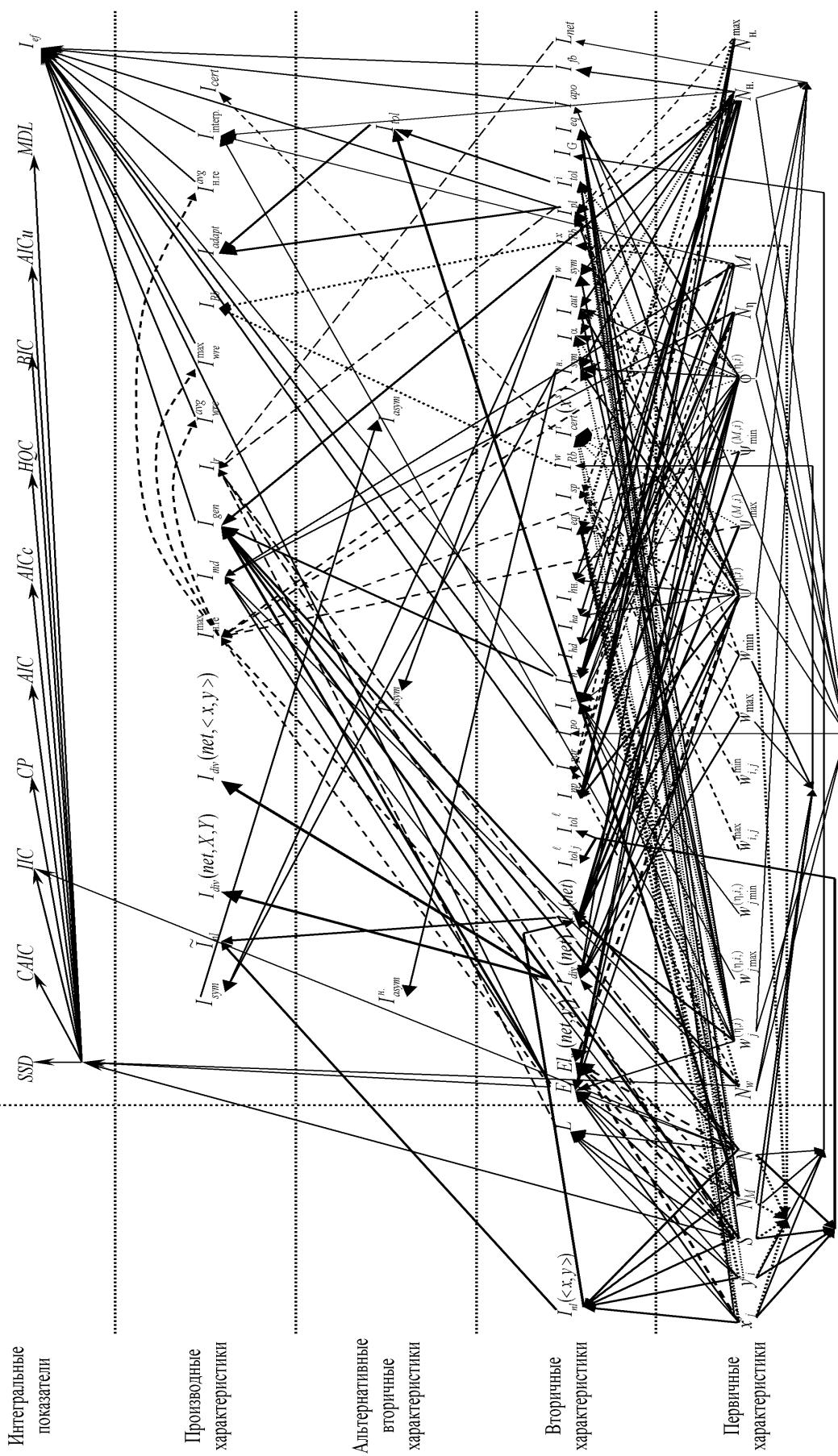
На рис. 1 приведен граф иерархии аналитических связей разработанных показателей. Применение данного графа при разработке программ позволяет существенно сократить объем вычислений за счет исключения повторов однотипных расчетов при расчете значительной части показателей качества.

Поскольку на качество нейромодели существенное влияние оказывает обучающая выборка данных, в работах [10–12] были предложены показатели качества выборок. На рис. 1 отображены аналитические зависимости показателей качества нейромоделей от некоторых характеристик обучающей выборки: сложности  $L$  и нелинейности  $I_{nl}(<x, y>)$ . Взаимосвязи между показателями качества выборок описаны в [11].

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

Расчет комплекса предложенных показателей качества, даже с оптимизацией вычислений путем использования графа, приведенного на рисунке, может оказаться на практике вычислительно затратным. Поэтому представляет существенный интерес исследование взаимосвязей между показателями качества с целью устранения из комплексных показателей избыточных вычислений.

## Характеристики нейромодели



**Рис. 1.** Схема аналитических взаимосвязей информационных показателей качества диагностических нейромоделей

Для практических задач [12] проводились эксперименты по исследованию взаимосвязей между показателями качества нейромоделей на основе нейронных сетей: многослойной прямого распространения и радиально-базисной [2], а также нейро-нечетких сетей Мамдани и ANFIS [3]. Наиболее интересные графики экспериментально полученных зависимостей между показателями качества нейромоделей изображены на рис. 2–3.

Как видно из рис. 2, с увеличением  $L_{net}$  наблюдается рост  $I_{lr}$ , при возрастании  $I_{div}(net, <x, y>)$  отмечается убывание  $I_{gen}$ , с ростом  $I_{gen}$  наблюдается увеличение  $I_{ef}$ , с увеличением  $I_{apo}$  отмечается рост  $I_{interp}$ , с ростом  $I_h$  наблюдается увеличение  $I_{eqf}$  и  $I_{interp}$ .

В свою очередь, из рис. 3 следует, что при возрастании  $I_{par}$  наблюдается увеличение  $I_{ef}$  с ростом  $I_{hn}$  происходит убывание  $I_{interp}$ , при возрастании  $I_{sym}$  наблюдается уменьшение  $I_{fb}$  и  $I_{interp}$ , а также увеличение  $I_{hn}$ , при возрастании  $I_{pl}$  наблюдается увеличение  $I_{ef}$ .

Также в результате проведенных экспериментов отмечено, что с ростом сложности сети  $L_{net}$  уменьшается показатель соответствия нелинейностей выборки и нейромодели  $\tilde{I}_{nl}$  (при фиксированной выборке это объясняется увеличением нелинейности нейромодели), при возрастании показателя эмерджентности  $I_\alpha$  наблюдается уменьшение разнообразия сети  $I_{div}(net)$  и отношения разнообразия выборки и сети  $I_{div}(net, <x, y>)$ , при возрастании  $I_{div}(net)$  и  $I_{div}(net, <x, y>)$  наблюдается рост  $I_v$ , а также убывание показателей  $I_{ef}$ ,  $I_{gen}$ ,  $I_{h,re}^{avg}$  и  $I_{wre}^{avg}$ .

Увеличение  $I_{sym}$  и  $I_{sym}^h$  приводит к уменьшению  $I_{fb}$  и  $I_{interp}$ , а также к увеличению  $I_{ha}$ ,  $I_{hd}$  и  $I_{hn}$ . С ростом  $I_{ha}$  происходит увеличение  $I_{hn}$ . С ростом показателей  $I_{ha}$ ,  $I_{hd}$  и  $I_{hn}$  происходит уменьшение показателей функциональной блочности  $I_{fb}$  и интерпретабельности  $I_{interp}$ .

С увеличением значения показателя автоматизации предорганизации в обучении  $I_{apo}$  наблюдается рост значений показателя интерпретабельности  $I_{interp}$ , а также убывание показателей  $I_{ha}$ ,  $I_{hd}$ ,  $I_{hn}$ ,  $I_{sym}$  и  $I_{sym}^h$ . Увеличение показателя иерархичности модели  $I_h$  приводит к возрастанию показателей эквифинальности  $I_{eqf}$  и интерпретабельности  $I_{interp}$ .

Увеличение показателя обобщения  $I_{gen}$  приводит к росту  $I_{ef}$  и  $I_{h,re}^{avg}$ . В свою очередь, увеличение значения  $I_{h,re}^{avg}$  приводит к росту  $I_{ef}$  и  $I_{wre}^{avg}$ , с возрастанием  $I_v$  происходит убывание  $I_{h,re}^{avg}$ , а увеличение  $I_{ma}$  приводит к росту  $I_{wre}^{avg}$ ,  $I_{h,re}^{avg}$ ,  $I_{ef}$ ,  $I_{gen}$  и  $I_{par}$  а также к убыванию  $I_{div}(net)$  и  $I_{div}(net, <x, y>)$ . При возрастании значений  $I_{par}$  наблюдается увеличение  $I_{ef}$ ,  $I_{h,re}^{avg}$  и  $I_{wre}^{avg}$ , а также уменьшение  $I_{div}(net)$ ,  $I_{div}(net, <x, y>)$  и  $I_v$ .

При увеличении значений  $N$ ,  $N_h$  и  $N_w$  наблюдается уменьшение эмерджентности  $I_\alpha$ . Возрастание  $N_w$  приводит к росту  $I_{div}(net)$  и  $I_{div}(net, <x, y>)$ , а также к убыванию  $I_{ef}$ ,  $I_{gen}$  и  $I_{h,re}^{avg}$ . Увеличение  $I_{sp}$  приводит к увеличению  $I_{ef}$ ,  $I_{md}$ ,  $I_{h,re}^{avg}$  и  $I_{wre}^{avg}$ . С ростом значения  $I_{pl}$  возрастают  $I_\alpha$ ,  $I_{ef}$ ,  $I_{md}$ ,  $I_{h,re}^{avg}$  и  $I_{wre}^{avg}$ , с увеличением числа нейронов  $N_h$  происходит убывание  $I_{ef}$ ,  $I_{pl}$ , и  $I_{sp}$ , а также увеличение  $N_w$ ,  $I_{div}(net)$ ,  $I_{div}(net, <x, y>)$  и  $I_v$ .

Полученные качественные зависимости между показателями, характеризующими свойства нейромоделей, могут быть учтены при формировании интегральных показателей качества для исключения качественно эквивалентных дублирующихся показателей, что позволит упростить и ускорить вычисления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

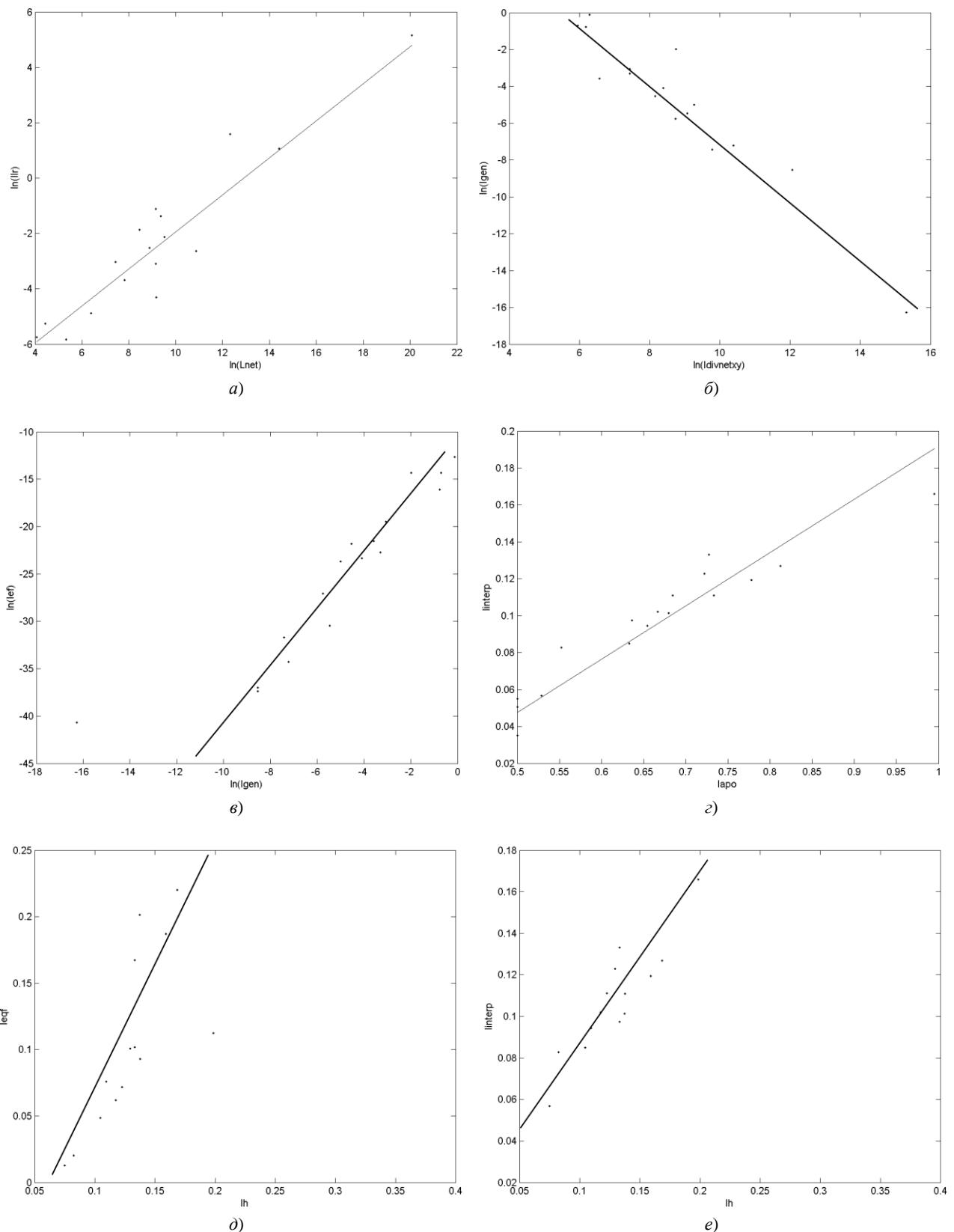
С целью автоматизации построения и анализа диагностических моделей в работе решена актуальная задача экспериментального исследования комплекса показателей качества диагностических нейромоделей.

Практическая ценность работы заключается в том, что при решении задач диагностики экспериментально исследован комплекс информационных показателей качества диагностических нейромоделей. Это позволило получить качественные зависимости между показателями, учет которых при формировании интегральных показателей качества позволяет существенно упростить вычисления путем исключения качественно эквивалентных (дублирующихся) показателей.

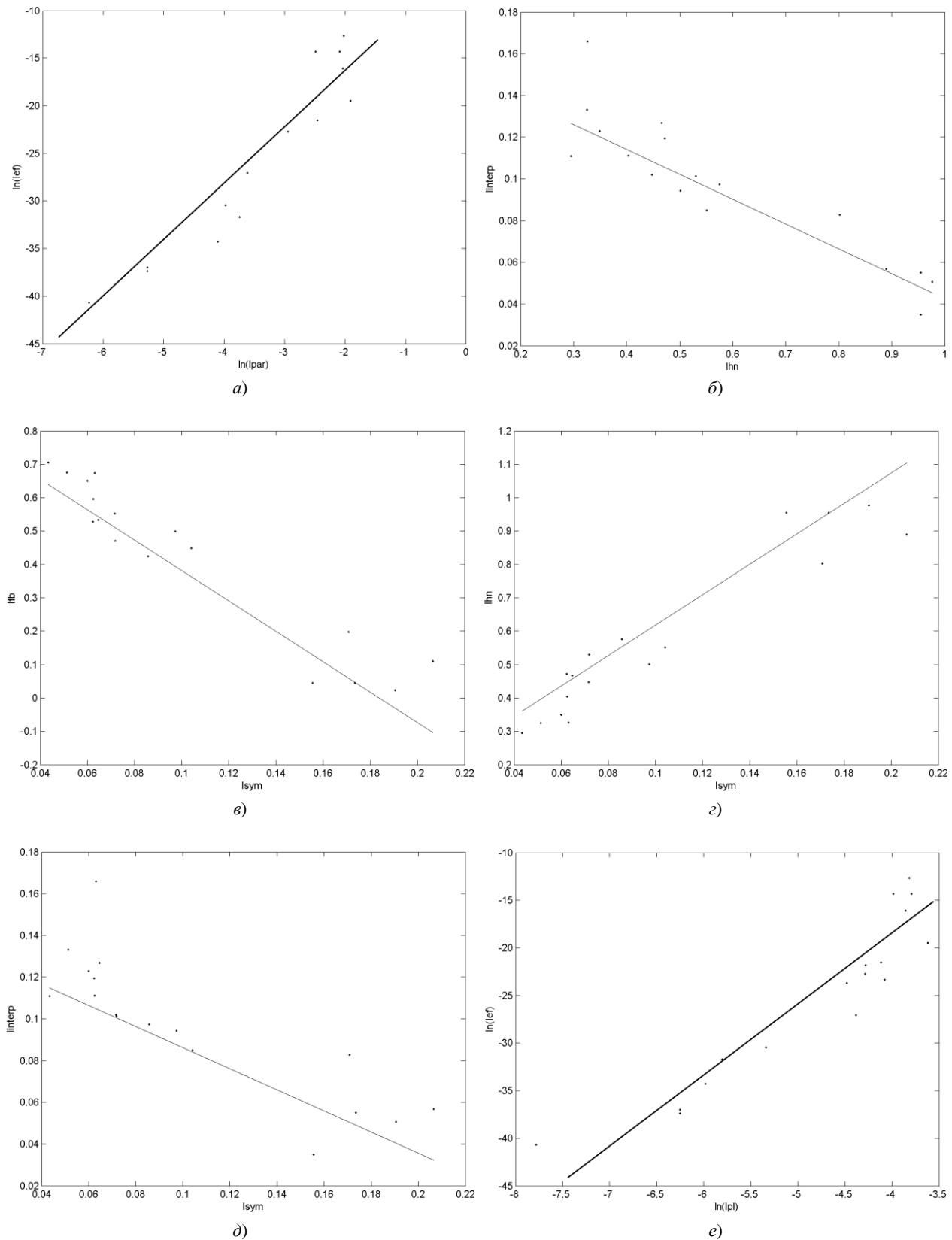
Работа выполнена в рамках госбюджетной темы кафедры программных средств Запорожского национального технического университета «Информационные технологии автоматизации распознавания образов и принятия решений для диагностики в условиях неопределенности на основе гибридных нечеткологических, нейросетевых и мультиагентных методов вычислительного интеллекта» (номер гос. регистрации 0109U007673).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Биргер, И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. – М. : Машиностроение, 1978. – 240 с.
2. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин ; пер. с англ. – М. : Вильямс, 2006. – 1104 с.
3. Субботин, С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: навчальний посібник / С. О. Субботин. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – 341 с.
4. Субботин, С. А. Методика и критерии сравнения моделей и алгоритмов синтеза искусственных нейронных сетей / С. А. Субботин // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2003. – № 2. – С. 109–114.
5. Субботин, С. А. О сравнении нейросетевых моделей / С. А. Субботин // Нейроинформатика и ее приложения : материалы XI Всероссийского семинара, 3–5

**Рис. 2.** Графики залежностей:

*a –  $\ln(I_{lr})$  or  $\ln(L_{net})$ ; δ –  $\ln(I_{\text{gen}})$  or  $\ln(I_{div\text{net}, <x,y>})$ ; ε –  $\ln(I_{ef})$  or  $\ln(\text{gen})$ ; ζ –  $I_{\text{interp.}}$  от  $I_{apo}$ ; δ –  $I_{eqf}$  от  $I_h$ ; ε –  $I_{\text{interp.}}$  от  $I_h$*



**Рис. 3.** Графики залежностей:

*a* –  $\ln(I_{eff})$  от  $\ln(I_{par})$ ; *б* –  $I_{interp}$  от  $I_{hn}$ ; *в* –  $I_{fb}$  от  $I_{sym}$ ; *г* –  $I_{hn}$  от  $I_{sym}$ ; *д* –  $I_{interp}$  от  $I_{sym}$ ; *е* –  $\ln(I_{eff})$  от  $\ln(I_{pl})$

- октября 2003 г. / под ред. А. Н. Горбаня, Е. М. Миркеса. – Красноярск : ИВМ СО РАН, 2003. – С. 152–153.
6. Субботин, С. А. Анализ свойств и критерии сравнения нейросетевых моделей для решения задач диагностики и распознавания образов / С. А. Субботин // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2009. – Т. 11. – № 3. – С. 42–52.
  7. Субботин, С. А. Модели критериев сравнения нейронных и нейро-нечетких сетей в задачах диагностики и классификации образов / С. А. Субботин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – Донецьк : ДНТУ, 2010. – Вип. 12 (165). – С.148–151.
  8. Субботин, С. А. Показатели качества и эффективность нейромоделей / С. А. Субботин // Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи, 1–5 декабря 2009 г., Ульяновск : сборник научных трудов. – Т. 2. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 38–47.
  9. Субботин, С. А. Интегральные показатели качества диагностических нейромоделей / С. А. Субботин // Научная сессия МИФИ – 2010. XII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2010» : сборник научных трудов. – М. : МИФИ, 2010. – Ч. 1. – С. 12.
  10. Субботин, С. А. Комплекс характеристик и критериев сравнения обучающих выборок для решения задач диагностики и распознавания образов / С. А. Субботин // Математичні машини і системи. – 2010. – № 1. – С. 25–39.
  11. 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.
  12. Богуслаев, А. В. Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных дви-

гателей: монография / А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин ; под ред. Д. В. Павленко, С. А. Субботина. – Запорожье : Мотор Сич, 2009. – 468 с.

Надійшла 24.09.2010

Субботін С. О.

#### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ Й АНАЛІЗ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ДІАГНОСТИЧНИХ НЕЙРОМОДЕЛЕЙ

Експериментально досліджено комплекс інформаційних показників якості діагностичних нейромоделей при вирішенні практичних завдань. Отримано якісні залежності між показниками, врахування яких при формуванні інтегральних показників якості дозволяє істотно спростити обчислення шляхом виключення показників, що дублюються.

**Ключові слова:** якість, модель, технічна діагностика, нейронна мережа, нейро-нечітка мережа.

Subbotin S. A.

#### EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND ANALYSIS OF INFORMATION QUALITY INDICES CORRELATION FOR DIAGNOSTIC NEUROMODELS

The complex of information quality indices of diagnostic neuromodels has been experimentally investigated by solving practical problems. Qualitative relationships between the indices have been obtained. When used for formation of integral quality indices, they can simplify computation by eliminating duplicate indices.

**Key words:** quality, model, technical diagnosis, neural network, neuro-fuzzy network.

# ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.03; 681.518:061

Евланов М. В.<sup>1</sup>, Терещенко И. В.<sup>1</sup>, Штангей С. В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

## РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЯ

Статья посвящена разработке информационной технологии мониторинга бизнес-процессов предприятия, позволяющей автоматизировать процессы формирования представлений данного бизнес-процесса. Разработана структурная схема этой технологии и рассмотрено назначение основных ее элементов. Представлена методика настройки предложенной информационной технологии в зависимости от особенностей конкретного бизнес-процесса.

**Ключевые слова:** мониторинг, автоматизация, компонент, корректировка, онтологическая модель, синтез.

### ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ МОНИТОРИНГА БИЗНЕС-АКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

В настоящее время существует большая потребность в специализированных информационных технологиях (ИТ) оперативного мониторинга бизнес-активности (Business Activity Monitoring, BAM) предприятия. Концепция BAM была предложена аналитической компанией Gartner. В соответствии с этой концепцией BAM рассматривается как предоставление доступа в режиме, близком к режиму реального времени, к наиболее важным индикаторам производительности бизнеса с целью увеличения скорости и эффективности бизнес-операций [1]. Типичный сценарий BAM упрощенно выглядит следующим образом: лицо, принимающее бизнес-решения, оценивает происходящие на предприятии экономические события. При этом используется специализированное программное обеспечение, основанное на наборе

правил фильтрации событий и уведомления пользователей о возникающих событиях.

Основными задачами BAM являются [1]:

- измерение фактических параметров бизнес-процесса (БП) и контроль их отклонений от заданных параметров;
- контроль исполнения регламентов;
- обнаружение нештатных ситуаций;
- персонализированный контроль за исполнителями БП;
- контроль нагрузки на сотрудников и загрузки оборудования.

BAM тесно связан с интеграцией корпоративных приложений. Для полноценного обеспечения мониторинга бизнес-событий в реальном времени на крупном предприятии необходимо интегрировать все используемые информационные службы.

Решение задач BAM обеспечивает возможность оперативно отслеживать и обрабатывать важнейшие

бизнес-события (новую сделку, изменение цепочки поставок, изменение законодательства, запрос на доработку ИТ и т. д.). Внедрение и эксплуатация систем ВАМ способствует принятию быстрых, обоснованных и четких управленческих решений, результатами которых являются конкурентные преимущества, получаемые предприятием. Поэтому разработка специализированных ИТ ВАМ является актуальной научно-прикладной задачей.

### ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА БИЗНЕС-АКТИВНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЯ

Для решения проблемы построения ИТ ВАМ в работе [2] предложена обобщенная модель, описывающая взаимодействие основных компонентов данной ИТ. Эта модель имеет вид

$$L_{IT} = [L^{ISO}, L^{IM}, L^{AM}, L^{VM}, F_{IM}^{ISO}, F_{ISO}^{IM}, F_{AM}^{ISO}, F_{ISO}^{AM}, F_{VM}^{ISO}, F_{ISO}^{VM}, F_{AM}^{VM}, F_{VM}^{AM}], \quad (1)$$

где  $L_{IT}$  – категория структурированных множеств, описывающая ИТ мониторинга БП;  $L^{ISO}$  – подкатегория, описывающая изоморфные алфавиты языков описания БП;  $L^{IM}$  – структурно-категориальная модель информационного представления БП;  $L^{AM}$  – структурно-категориальная модель аналитического представления БП;  $L^{VM}$  – структурно-категориальная модель визуального представления БП;  $F_{IM}^{ISO}$  – функтор, отображающий подкатегорию  $L^{ISO}$  в подкатегорию  $L^{IM}$ ;  $F_{ISO}^{IM}$  – функтор, отображающий подкатегорию  $L^{IM}$  в подкатегорию  $L^{ISO}$ ;  $F_{AM}^{ISO}$  – функтор, отображающий подкатегорию  $L^{ISO}$  в подкатегорию  $L^{AM}$ ;  $F_{ISO}^{AM}$  – функтор, отображающий подкатегорию  $L^{AM}$  в подкатегорию  $L^{ISO}$ ;  $F_{VM}^{ISO}$  – функтор, отображающий подкатегорию  $L^{ISO}$  в подкатегорию  $L^{VM}$ ;  $F_{ISO}^{VM}$  – функтор, отображающий подкатегорию  $L^{VM}$  в подкатегорию  $L^{ISO}$ ;  $F_{AM}^{VM}$  – функтор, отображающий подкатегорию  $L^{VM}$  в подкатегорию  $L^{AM}$  и устанавливающий правила преобразования информационного представления БП в аналитическое представление;  $F_{AM}^{VM}$  – функтор, отображающий подкатегорию  $L^{AM}$  в подкатегорию  $L^{VM}$  и устанавливающий правила преобразования аналитического представления модели БП в визуальное представление.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как следует из выражения (1), для детализации формализованного описания ИТ ВАМ необходимо в первую очередь разработать формализованные описания информационного, визуального и аналитического представления БП. Результаты разработки

структурно-категориальной модели, описывающей информационное представление БП, рассмотрены в [3]. Результаты разработки структурно-категориальной модели, описывающей визуальное представление БП, рассмотрены в [4]. Результаты разработки структурно-категориальной модели, описывающей информационное представление БП, рассмотрены в [5].

Согласно модели (1) преобразование формализованных описаний наблюдаемого БП может осуществляться двумя основными способами:

а) первый способ предполагает организацию преобразования формализованных описаний путем выполнения стандартных преобразований таких описаний в процессе эксплуатации ИТ (преобразования описаны функторами  $F_{AM}^{IM}$  и  $F_{VM}^{AM}$ );

б) второй способ предполагает организацию взаимного преобразования формализованных описаний через использование единого механизма изоморфных преобразований (механизм описан подкатегорией  $L^{ISO}$  и функторами  $F_{IM}^{ISO}$ ,  $F_{ISO}^{IM}$ ,  $F_{AM}^{ISO}$ ,  $F_{ISO}^{AM}$ ,  $F_{VM}^{ISO}$  и  $F_{ISO}^{VM}$ ).

Поскольку первый способ основан на стандартных программно-реализованных преобразованиях, в статье основное внимание удалено рассмотрению практических подходов к реализации второго способа в рамках ИТ мониторинга БП предприятия.

### РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ИНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІИ МОНИТОРИНГА БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРЕДПРИЯТИЯ

В настоящее время структура типовой ИТ мониторинга ВАМ имеет вид, показанный на рис. 1 [6].

В качестве основных задач, которые должна решать типовая ИТ ВАМ, выделяются такие задачи [7]:

– обеспечить возможность мгновенного осознания ситуации, то есть оценки того, как повлияют события (неисправности в сети, состояние баз данных,



Рис. 1. Структурная схема типовой информационной технологии мониторинга бизнес-деятельности предприятия

изменения в Web, изменение показателей каких-то ресурсов) на ход операций в бизнесе;

– осознав ситуацию, принимать решения и передавать управляющие воздействия, которые могут изменить бизнес-процессы;

– фиксировать нарушения или попытки нарушения политики и соглашений об уровне обслуживания;

– накапливать статистику производительности всех операций.

Такой подход к построению ИТ мониторинга БП предприятия определяет следующие основные блоки этой технологии:

а) хранилище данных (ХД) реального времени, в котором хранятся описания событий, происходящих в аппаратном обеспечении и программных приложениях, а также другие данные, непосредственно связанные с течением бизнес-процессов предприятия;

б) сервер ВАМ, который управляет ХД реального времени в соответствии с разработанными моделями процессов, а также управляет пересылкой данных из ХД в кэш-память и доступностью этих данных для аналитических инструментов и средств подготовки отчетов;

в) оперативные процессы, под которыми понимаются функциональные задачи и модули ИСУП, в частности, систем ERP, SCM, CRM, Human-Resources Management и им подобных, являющиеся источниками описаний событий, происходящих в аппаратном обеспечении и программных приложениях, а также других данных, непосредственно связанные с течением бизнес-процессов предприятия;

г) аналитическая машина, которая на основе данных из ХД рассчитывает значения ключевых показателей производительности (Key Performance Indicators, KPI), определяющих степень достижения поставленных перед БП предприятия целей, а также осуществляет ретроспективный анализ БП и прогнозирование бизнес-деятельности предприятия;

д) машина для правил, которая осуществляет выявление новых и модификацию существующих бизнес-правил выполнения БП предприятия на основе информации, поступающей из аналитической машины;

е) пульт управления, который представляет собой набор способов и средств визуализации результатов работы аналитической машины и машины для правил. Предназначен для отображения текущего состояния БП, результатов анализа и прогноза развития БП, а также сигналов о возникающих бизнес-событиях и чрезвычайных ситуациях.

Рассмотренная схема ИТ мониторинга БП предприятия основана на использовании следующих ос-

новных способов формализованного представления БП:

– визуальное представление, используемое в процессе функционирования пульта управления для визуализации результатов функционирования аналитической машины и машины для правил;

– аналитическое представление, используемое в процессе функционирования аналитической машины и, в ряде случаев, машины для правил;

– представление на уровне хранимых данных или информационное представление, используемое в процессе функционирования ХД реального времени и сервера ВАМ.

Для обеспечения возможности автоматизированного формирования этих представлений БП необходимо модифицировать схему, приведенную на рис. 1. С учетом результатов разработки формализованных описаний БП [3–5] и категорной модели, определяющей возможность автоматизированного преобразования этих представлений [2], структурная схема ИТ мониторинга БП предприятия примет вид, показанный на рис. 2.

Назначение таких компонентов разрабатываемой ИТ мониторинга БП предприятия, как ХД мониторинга БП, сервер мониторинга БП, аналитическая машина, машина правил и пульт управления, совпадает с назначением аналогичных компонентов типовой ИТ ВАМ, структура которой показана на рис. 1.

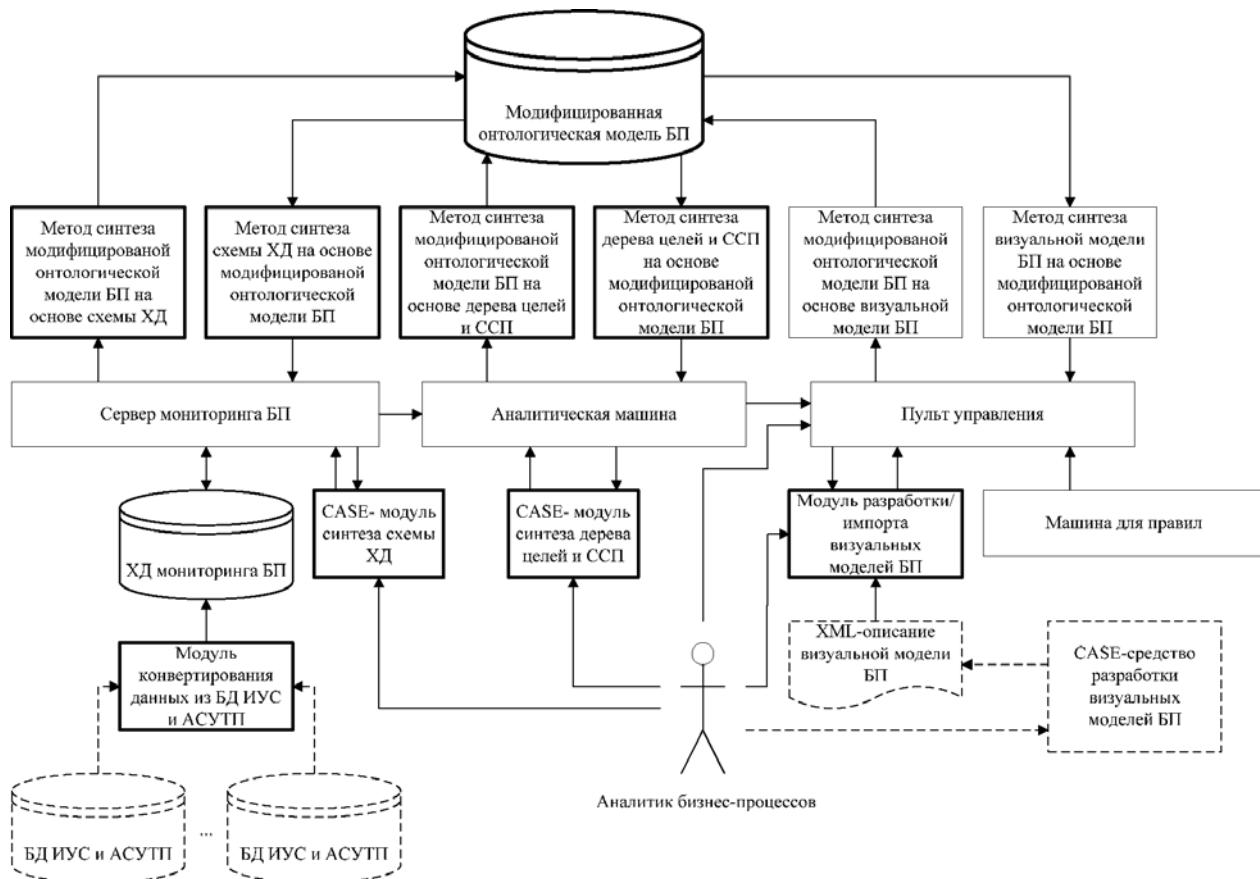
Компонент разрабатываемой ИТ «CASE-модуль синтеза схемы ХД» предназначен для визуального проектирования и корректировки схемы ХД или витрины данных, являющейся формализованным описанием информационного представления наблюдаемого БП.

Компонент разрабатываемой ИТ «CASE-модуль синтеза дерева целей и системы сбалансированных показателей (ССП)» предназначен для визуального проектирования и корректировки дерева целей и соответствующего каждой цели подмножества сбалансированных показателей достижимости этой цели. Результаты разработки дерева целей и связанной с ним ССП являются формализованным описанием аналитического представления наблюдаемого БП.

Компонент разрабатываемой ИТ «Модуль разработки/импорта визуальных моделей БП» предназначен для выполнения следующих функций:

– проектирования визуальных моделей наблюдаемого БП в одной из трех нотаций визуального моделирования БП (IDEF0, Use Case, Activity);

– импорта визуальных моделей наблюдаемого БП, которые разработаны по результатам предварительного обследования объекта автоматизации и его БП



**Рис. 2.** Схема взаємодействия основних структурних компонентів інформаційної технології моніторинга бізнес-процесів підприємства

с использованием традиционных CASE-средств (All-Fusion Modelling Suite, Rational Rose и т. п.), показанных на рис. 2 пунктиром.

Подобный импорт производится в виде XML-документов (показан на рис. 2 пунктиром), описывающих разработанную визуальную модель БП. Структура такого описания является стандартной и определяется онтологической моделью БП.

Компонент разрабатываемой ИТ «Модифицированная онтологическая модель БП» представляет собой шину метаданных [8], описывающих наблюдаемый БП как совокупность согласованных между собой атрибутов. Эти атрибуты характеризуют наблюдаемый БП с точки зрения его информационного, аналитического и визуального представления [9]. Формирование значений этих атрибутов происходит на основе результатов работы компонентов «CASE-модуль синтеза схемы ХД», «CASE-модуль синтеза дерева целей и ССП» и «Модуль разработки/импорта визуальных моделей БП», а сформированные значения могут использоваться для корректировки существующих или синтеза новых представлений наблюдаемого БП в указанных компонентах.

Компоненты разрабатываемой ИТ «Метод синтеза модифицированной онтологической модели БП на основе схемы ХД», «Метод синтеза модифицированной онтологической модели БП на основе дерева целей и ССП», «Метод синтеза модифицированной онтологической модели БП на основе визуальной модели БП» представляют собой совокупность SQL-запросов и программно реализованных процедур обработки данных, обеспечивающих трансформацию описаний схемы ХД или витрину данных, дерева целей и ССП, или же визуальных моделей БП в набор значений атрибутов шины метаданных, описывающих этот БП.

Компоненты разрабатываемой ИТ «Метод синтеза схемы ХД на основе модифицированной онтологической модели БП», «Метод синтеза дерева целей и ССП на основе модифицированной онтологической модели БП», «Метод синтеза визуальной модели БП на основе модифицированной онтологической модели БП» представляют собой совокупность SQL-запросов и программно реализованных процедур обработки данных, обеспечивающих трансформацию совокупности значений атрибутов шины метаданных,

описывающих наблюдаемый БП в описания схемы ХД или ВД, дерева целей и ССП, или же визуальных моделей этого БП.

Компонент разрабатываемой ИТ «Модуль конвертирования данных из БД ИУС и АСУТП» предназначен для реализации автоматизированной процедуры выборки оперативных данных о текущем состоянии наблюдаемого БП из БД ИС и АСУТП, эксплуатируемых на предприятии, преобразования этих данных к требуемому формату и записи результатов преобразования в ХД или витрину данных наблюдаемого БП.

Рассмотренные структурные особенности предлагаемой ИТ определяют методику настройки этой ИТ на особенности конкретного автоматизированного БП. Данная методика состоит из следующих этапов.

Этап 1. Разработка аналитиком визуальной модели БП, чей мониторинг планируется осуществлять. Если разработка выполнялась с использованием модуля разработки/импорта визуальных моделей БП ИТ мониторинга автоматизированных БП (пункт меню «Моделирование», опция «Визуальная модель»), то перейти к Этапу 3. Если разработка выполнялась

с использованием традиционных CASE-средств, то импортировать синтезированную визуальную модель в XML-документ и перейти к Этапу 2.

Этап 2. Импорт XML-документа, содержащего описание визуальной модели БП, в программный модуль ИТ мониторинга БП предприятия.

Этап 3. Корректировка и сохранение разработанной или импортированной визуальной модели автоматизированного БП как его визуального представления. Результат сохранения импортированной визуальной модели БП показан на рис. 3.

Этап 4. Автоматический синтез модифицированной онтологической модели автоматизированного БП на основе его визуального представления путем заполнения схемы шины метаданных ИТ данными, полученными в результате выполнения Этапа 3.

Этап 5. Автоматический синтез и визуализация дерева целей автоматизированного БП на основе результатов выполнения Этапа 4. Пример визуализации синтезированного дерева целей БП удаления окалины металлопроката показан на рис. 4.

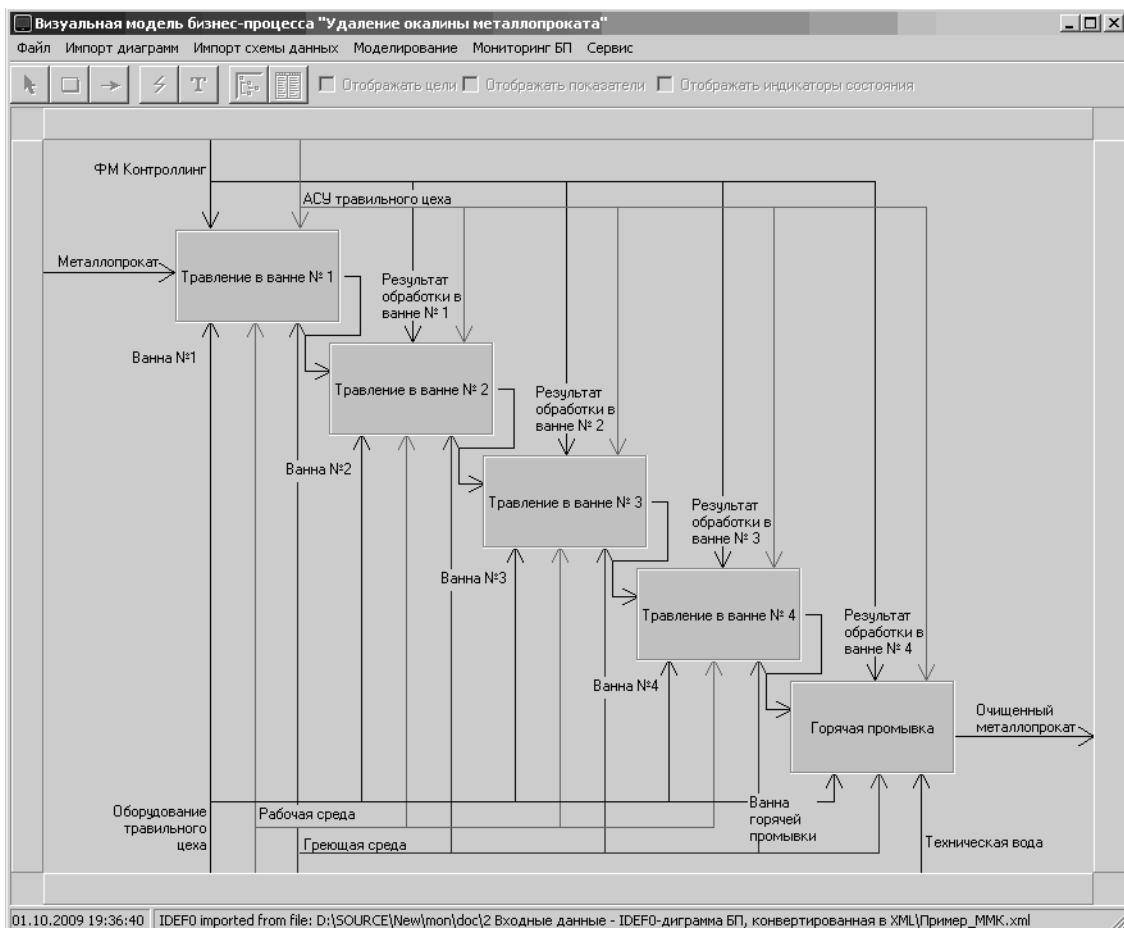
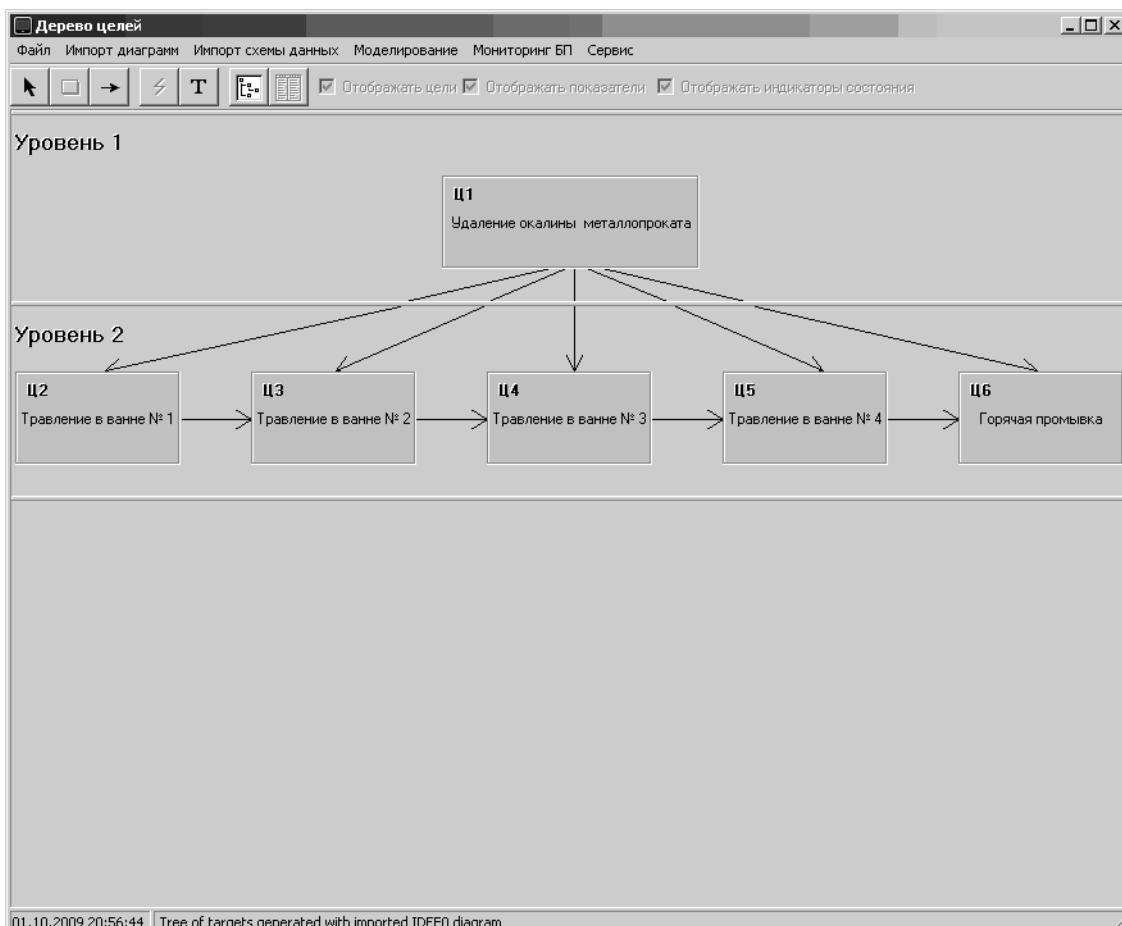


Рис. 3. Сохраненная IDEF0-модель как визуальное представление автоматизированного бизнес-процесса



**Рис. 4.** Пример визуалізації дерева цілей бізнес-процеса, синтезованого на основі модифікованої онтологічної моделі цього бізнес-процеса

**Рис. 5.** Пример синтеза сбалансированного показателя досягливості цілі наблюдаємого бізнес-процеса

Етап 6. Формирование дерева целей автоматизированного БП на основе результатов выполнения Этапа 4.

Етап 7. Корректировка и сохранение дерева целей автоматизированного БП, сформированного в результате выполнения Этапа 6.

Етап 8. Импорт схем данных БД ИС и АСУТП, которые являются источниками оперативных данных о текущем состоянии наблюдаемого автоматизированного БП.

Етап 9. Синтез перечня сбалансированных показателей достижимости каждой из целей, выделенных на Этапе 7, и формирование информационной модели каждого из показателей на основе результатов выполнения Этапа 8. В результате выполнения этого этапа для каждого из показателей устанавливается перечень атрибутов таблиц исходных БД и правило агрегации, согласно которому вычисляется значение этого показателя. Пример синтеза сбалансированного показателя показан на рис. 5.

Етап 10. Корректировка и сохранение ССП, синтезированной в результате выполнения Этапа 9.

Етап 11. Автоматическая корректировка модифицированной онтологической модели автоматизированного БП по результатам синтеза его аналитического представления путем дополнения и уточнения содержимого шины метаданных ИТ данными, полученными в результате выполнения Этапа 10.

Етап 12. Автоматический синтез и визуализация схемы ВД автоматизированного БП как его информационного представления на основе результатов выполнения Этапа 11.

Етап 13. Корректировка и сохранение схемы ВД, сформированной в результате выполнения Этапа 12.

Етап 14. Автоматическая корректировка модифицированной онтологической модели автоматизированного БП по результатам синтеза его информационного представления путем дополнения и уточнения содержимого шины метаданных ИТ данными, полученными в результате выполнения Этапа 13.

Етап 15. Настройка модуля конвертирования данных из БД ИУС и АСУТП на процесс конвертации данных из фрагментов БД ИСУП и АСУТП, выделенных как источники оперативных данных о текущем состоянии наблюдаемого автоматизированного БП.

## ВЫВОДЫ

Предлагаемая структурная схема разрабатываемой ИТ мониторинга автоматизированных БП позволяет интегрировать данную ИТ в существующую совокупность средств информатизации управления предприятием без проведения реинжиниринга последних. Это позволяет сократить затраты времени и

финансов на подготовку объекта автоматизации к вводу разрабатываемой ИТ в действие.

Выполнение работ по настройке предложенной ИТ мониторинга БП предприятия в соответствии с данной методикой позволяет сократить время ввода в эксплуатацию предложенной ИТ с четырех-пяти месяцев до одной-двух недель.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Черняк, Л. На пути к предприятию, управляемому в реальном времени / Л. Черняк // Открытые системы. – 2002. – № 12. – С. 43–47.
- Євланов, М. В. Формалізований опис технології візуального моделювання автоматизованих бізнес-процесів промислового підприємства / М. В. Євланов, В. О. Антонов, Є. В. Корнєєва // Вісник Академії митної служби України. – 2007. – № 3 (35). – С. 95–100.
- Євланов, М. В. Формалізоване описание информационной модели бизнес-процесса / М. В. Євланов, Е. В. Корнєєва // Системи обробки інформації. – 2009. – Вип. 6(80). – С. 167–171.
- Антонов, В. А. Взаємне преобразование визуальных моделей бизнес-процессов промышленного предприятия / В. А. Антонов, Е. В. Корнєєва // Управління розвитком. Міжнародна науково-практична конференція «Стратегії ІТ-технологій в освіті, економіці та екології» 15–16 листопада 2007 р. – Харків : ХНЕУ, 2007. – № 7. – С. 20–21.
- Євланов, М. В. Применение системы сбалансированных показателей в информационной технологии мониторинга автоматизированных бизнес-процессов / М. В. Євланов, В. А. Антонов, Е. В. Корнєєва // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 5(86). – С. 211–216.
- Черняк, Л. Мониторинг бизнес-процессов [Електронний ресурс] / Л. Черняк // Сайт журнала «Открытые системы». – Режим доступу: [http://www.osp.ru/os/2005/10/380436/\\_p1.html](http://www.osp.ru/os/2005/10/380436/_p1.html), вільний. – Назва с экрана.
- Черняк, Л. Сложные события и мониторинг бизнеса / Л. Черняк // Сайт журнала «Открытые системы». – Режим доступу: [http://www.osp.ru/os/2005/02/185306/\\_p1.html](http://www.osp.ru/os/2005/02/185306/_p1.html), вільний. – Назва с экрана.
- Корнєєва, Е. В. Інтеграція моделей автоматизованого бизнес-процесса на основі шини метаданих / Е. В. Корнєєва // 14-й Міжнародний молодежний форум «Радіоелектроніка і молодежь в ХХІ столітті»: сб. матеріалів форуму. Ч. 2. – Харків : ХНУРЭ, 2010. – С. 125.
- Корнєєва, Е. В. Автоматизація бизнес-процесів з по-можою інформаційних технологій / Е. В. Корнєєва // Матеріали електронної техніки та сучасні інформаційні технології. Тези доповідей на Четвертій міжнародній науково-практичній конференції МЕТИТ-4: 19–21 травня 2010 р., Кременчук, Україна: збірник тез доповідей. – Кременчук: Кременчуцький університет економіки, інформаційних технологій і управління, 2010. – С. 237–238.

Надійшла 20.10.2010

Євланов М. В., Терещенко І. В., Штангей С. В.  
РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ПІДПРИЄМСТВА

Стаття присвячена розробці інформаційної технології моніторингу бізнес-процесів підприємства, які дозволяють автоматизувати процеси формування представлень даного бізнес-процесу. Розроблено структурну схему цієї технології і розглянуто призначення основних її елементів. Представлено методику настройки запропонованої інформаційної технології у залежності від особливостей конкретного бізнес-процесу.

**Ключові слова:** моніторинг, автоматизація, компонент, коригування, онтологічна модель, синтез.

Evlanov M. V., Terecshenko I. V., Shtangey S. V.  
DEVELOPMENT OF INFORMATION TECHNOLOGY  
OF ENTERPRISE BUSINESS PROCESSES MONITORING

The paper describes the information technology of enterprise business processes monitoring enabling automatic formation of given business process representations. The block diagram

of this technology is developed and the function of its basic elements is considered. The technique of information technology adjustment is presented taking into account the features of the specified business process.

**Key words:** monitoring, automation, component, adjustment, ontological model, synthesis.

УДК 681.324

Зинченко Ю. Е.<sup>1</sup>, Гриценко А. А.<sup>1</sup>, Зеленева И. Я.<sup>1</sup>, Войтов Г. В.<sup>2</sup>

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

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

## ПРОГРАММО-АППАРАТНАЯ БИБЛИОТЕКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ СИСТЕМ НА ПЛИС

В статье предлагается метод создания библиотеки математических функций для систем на ПЛИС (SoPC) и набора необходимых для работы с ней аппаратно-программных средств. Предлагаемая библиотека дает возможность варьировать структуру системы на ПЛИС в соответствии с требованиями пользователя и доступными аппаратными ресурсами.

**Ключевые слова:** ПЛИС, система на ПЛИС, процессор, периферийный модуль, библиотека.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производители ПЛИС предоставляют широкие возможности по созданию систем на ПЛИС с использованием различных микропроцессорных архитектур. В частности, речь идет об архитектурах Xilinx MicroBlaze [1] и Altera Nios II [2], которые подразумевают наличие центрального микропроцессора и набора периферийных модулей, взаимодействующих посредством предоставляемого процессором шинного интерфейса.

Программное обеспечение рассматриваемых систем создается с использованием современных высокуюровневых языков программирования, в частности С и С++ [3, 4]. Оба эти языка предоставляют доступ

к стандартной библиотеке математических функций. Необходимость использования функций математической библиотеки ведет к увеличению вычислительной нагрузки на центральный процессор.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваемые в данной работе системы на ПЛИС характеризуются наличием специфичных модулей, которые обеспечивают решение узкоспециализированных задач, позволяя центральному процессору переложить на них обязанности в области трудоемких вычислений (рис. 1), в частности в области вычисления математических функций.

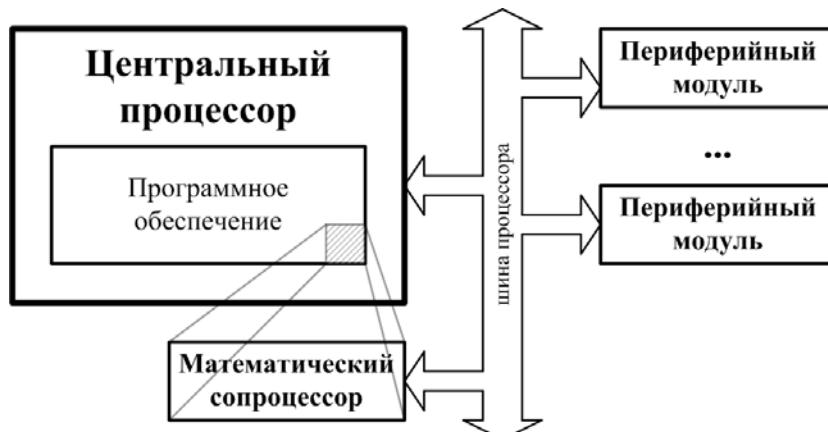


Рис. 1. Архитектура микропроцессорной системы на ПЛИС, включающей сопроцессор

© Зинченко Ю. Е., Гриценко А. А., Зеленева И. Я., Войтов Г. В., 2011

Важним вопросом, который возникает в процессе создания таких программно-аппаратных систем, является организация взаимодействия сопроцессоров и центрального процессора. С точки зрения архитектуры это подразумевает создание дополнительного программного модуля, обеспечивающего доступ к каждому из сопроцессоров, а также реализацию аппаратных модулей, используемых для подключения сопроцессоров к шине процессора. Для решения этого вопроса в данной работе предлагается подход, который позволяет изолировать логику математического сопроцессора от деталей его подключения к шине процессора, а логику программного обеспечения – от деталей взаимодействия с сопроцессором.

Использование аппаратного модуля для выполнения вычислений является, с одной стороны, производительным вариантом оптимизации, а с другой – ресурсоемким. Поэтому реализация таких модулей требует использования подхода, который позволяет получить лучшие значения обеих характеристик в конкретном случае. Описание соответствующего подхода является вторым важным вопросом, который рассматривается в данной работе. Предлагаемое решение этого вопроса базируется на организации диалога с экспертом, обладающим знаниями предметной области реализуемого системой приложения. Целью такого диалога является выявление ограничений использования тех вычислительных компонент системы, которые будут реализованы в форме математических сопроцессоров.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ БИБЛИОТЕКИ И АРХИТЕКТУРА ПОДКЛЮЧЕНИЯ СОПРОЦЕССОРОВ

Согласно [5], в процессе разработки программно-аппаратной системы пользователь не должен самостоятельно определять способ реализации отдельных компонент. Для обеспечения работы пользователя требуется, во-первых, иметь некоторую формальную методику разработки систем на ПЛИС, обеспечивающую автоматизированный анализ ее структуры и поиск путей ее оптимизации. Во-вторых, обеспечить пользователя набором средств, необходимых для того, чтобы, с одной стороны, позволить ему управлять процессами формирования структуры системы, с другой – обеспечить качественную его изоляцию от деталей выполнения этих процессов.

Исходными данными будем считать некоторую систему на ПЛИС, использующую функции математической библиотеки. Здесь следует отметить необходимость того, чтобы разработчик использовал не

стандартную математическую библиотеку, а специальный ее аналог, обеспечивающий дополнительную функциональность, которая необходима для дальнейшего анализа. В частности, речь идет о поддержке механизмов профилирования.

Первым этапом является предварительный анализ, который представлен на рис. 2 с использованием нотации UML [6]. На этом этапе выполняется получение результатов профилирования программной части. Эти результаты генерируются предоставляемым, специальным для конкретной архитектуры, вариантом математической библиотеки.

Анализ результатов показывает основные возможности оптимизации системы. Дальнейшие этапы могут повторяться циклически, для получения наиболее подходящего варианта относительно повышения производительности и расхода аппаратных ресурсов.

Вторым этапом является получение экспертных знаний о том, каким образом должны или могут выполняться вычисления математических функций, которые были отобраны на первом этапе. Точность и полнота экспертных знаний влияет на результаты оптимизации системы. В качестве таких знаний могут выступать, например:

– Способ представления чисел. Если необходимо использовать представление с плавающей запятой, то, скорее всего, нужно будет использовать сторонние ядра для выполнения арифметических операций; если можно использовать представление с фик-

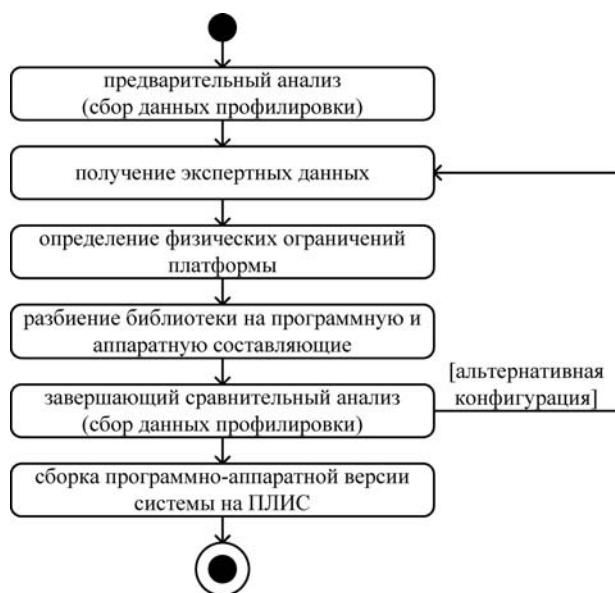
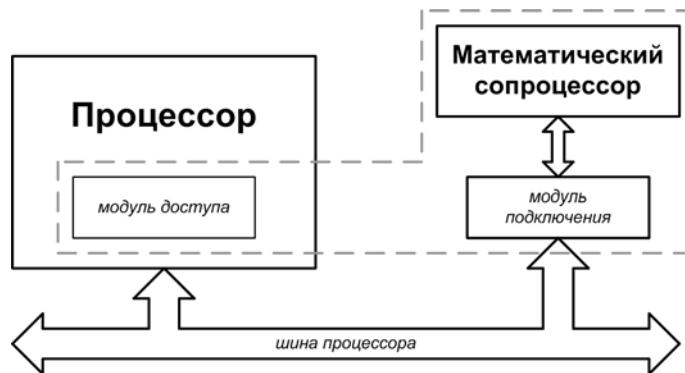


Рис. 2. Методика разработки системы на ПЛИС, использующей программно-аппаратную реализацию математической библиотеки



**Рис. 3.** Архітектура для підключення математичного сопроцесора

сированной запятой, то понадобятся соответствующие функции преобразования.

– *Необходимая точность результатов.* Допустим известно то, что требуемая точность не превышает некоторое количество разрядов после запятой. В этом случае можно сократить количество ресурсов, которые необходимы для размещения сопроцессора.

– *Допустимый диапазон входных значений.* Программная реализация часто отличается общностью, с другой стороны, аппаратная реализация позволяет повысить производительность и уменьшить затраты ресурсов за счет своей специфичности.

Увеличение объема информации дает возможность создавать более специфичные и, как следствие, более производительные и менее затратные по ресурсам сопроцессоры.

Следующим шагом является получение информации об используемой платформе. Эта информация позволяет выбрать наиболее подходящую для конкретной платформы реализацию аппаратного модуля, а также определить способ подключения модуля к шине процессора. Также появляется возможность определить механизмы доступа к модулю со стороны программного обеспечения.

Например, если известно, что будет использоваться ПЛИС FPGA Altera Cyclone II, то можно выбрать реализацию модуля, оптимизированную для архитектуры этой ПЛИС [7]. С другой стороны, подключение модуля к микропроцессору будет осуществляться через шину Avalon [8], что позволяет выбрать необходимый модуль сопряжения сшиной. Кроме того, можно однозначно определить способ взаимодействия с модулем со стороны программного обеспечения [3].

Предлагается использовать архитектуру подключения сопроцессоров, приведенную на рис. 3.

В предлагаемой архитектуре выделен модуль подключения. Этот модуль позволяет использовать один

неоптимизированный вариант сопроцессора для нескольких платформ. Он должен обеспечивать корректный протокол работы с сопроцессором. Например, в случае использования интерфейса отображения в памяти шины Avalon [8] модуль обеспечивает запись и чтение данных по соответствующим адресам.

Следующим этапом разработки является разбиение математической библиотеки на программную и аппаратную части. На этом этапе возникает необходимость в получении от пользователя информации о том, сколько и каких ресурсов ПЛИС можно использовать. К этому моменту точно известно, сколько ресурсов необходимо для размещения того или иного сопроцессора, поэтому, в зависимости от имеющихся ресурсов, можно определить все допустимые конфигурации системы.

Последним этапом является сравнительный анализ. На этом этапе используется профилирующая версия математической библиотеки, что позволяет оценить полученный в результате оптимизации прирост производительности. По необходимости разработчик получает возможность сравнить несколько альтернативных конфигураций системы.

## СТРУКТУРА ПРОГРАММО-АППАРАТНОЙ БІБЛІОТЕКИ

Следует отметить, что с точки зрения системы на ПЛИС, структура библиотеки в процессе разработки изменяется. При использовании языков C и C++ библиотека будет состоять изначально из двух, а позже из трех файлов. Заголовочный файл обеспечивает возможность взаимодействия с библиотекой, а два файла исходных кодов (или два объектных файла) содержат реализацию программной составляющей и модулей доступа к сопроцессорам (рис. 3). Аппаратная часть библиотеки зависит от того, какие функции и в какой конфигурации погружены в аппаратуру.



Рис. 4. Первоначальная структура библиотеки

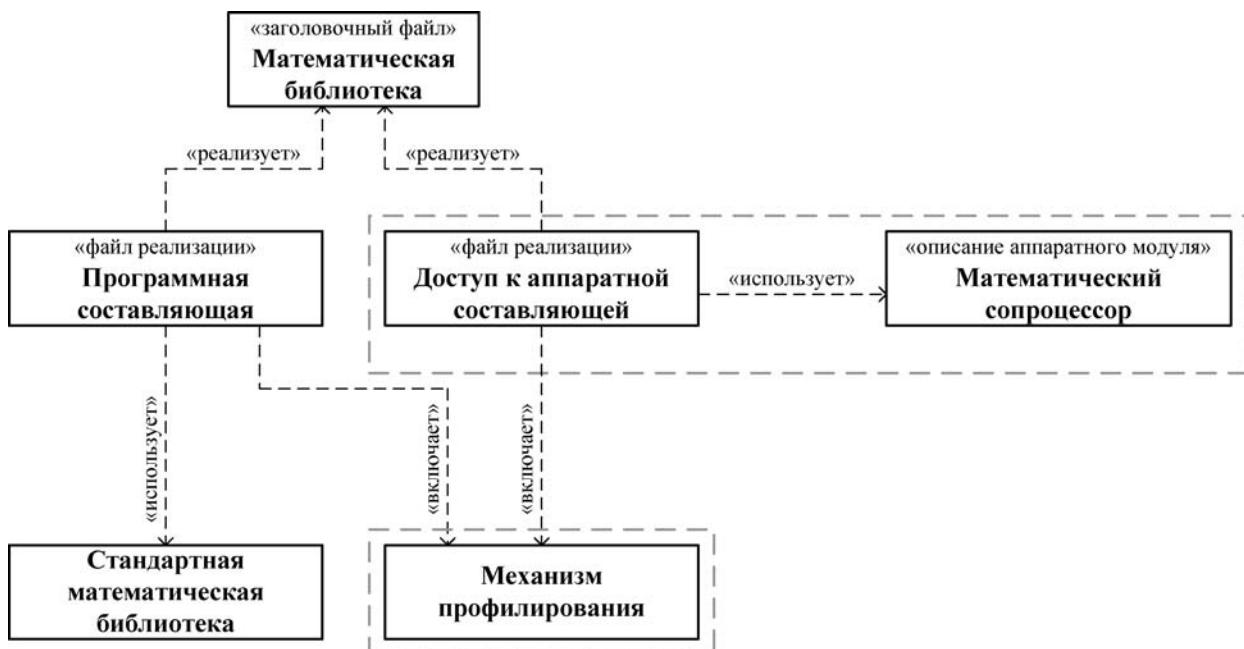


Рис. 5. Окончательный вариант структуры библиотеки

В процессе разработки начальной версии системы и на этапе предварительного анализа программино-аппаратная библиотека является оберткой стандартной библиотеки и имеет полностью программную реализацию. Ее основным отличием является то, что она позволяет осуществить получение результатов профилирования (рис. 4).

По завершении сбора экспертной информации и данных об используемой платформе выполняется генерация специализированной версии библиотеки, которая все же позволяет осуществить профилирование (рис. 5).

Это нужно для выполнения сравнительного анализа исходной и оптимизированной версий, а также, в

случае необходимости, нескольких разных оптимизированных версий.

Механизмы профилирования удаляются из библиотеки только после того, как будет выбрана подходящая пользователю конфигурация.

## ПРИМЕР РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

Допустим, что согласно результатам профилирования программного обеспечения для системы на ПЛИС значительная часть вычислительных ресурсов расходуется на вычисление экспоненциальной функции [9]. Согласно ранее предложенной методике, следующим этапом является получение огранич

```

double hs_math_exp (double x) {
    assert (0.0 <= x && x <= 2.0);
    Xuint32 x_fixed = to_fixed (x);

    XIo_Out32 (HS_MATH_EXP_NPU, x_fixed);
    Xuint32 y_fixed = XIo_In32 (HS_MATH_EXP_NPU);

    double y = from_fixed (y_fixed);
    assert (1.0 <= y && y <= 7.38906);
    assert (are_equal (y, exp (x), 5));
    return y;
}

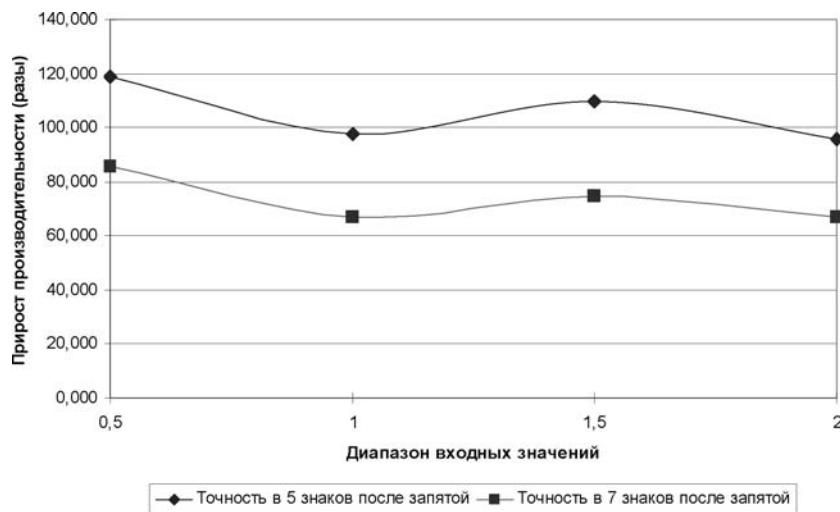
```

} Шаг 1. Контроль и подготовка исходных данных

} Шаг 2. Расчет с использованием сопроцессора

} Шаг 3. Контроль, подготовка и выдача результатов

**Рис. 6.** Пример реализации специализированного модуля доступа к сопроцессору, вычисляющему экспоненциальную функцию (для архитектуры Xilinx MicroBlaze [1])



**Рис. 7.** Прирост производительности при использовании аппаратного модуля

ний пользователя. Пусть пользователем задан диапазон для входных значений от нуля до двух включительно, точность в пять знаков после запятой и выбран формат с фиксированной запятой. В качестве платформы была выбрана ПЛИС FPGA Xilinx Spartan3AN.

На основе приведенной экспертной информации можно предложить следующий вариант реализации модуля доступа (рис. 6).

Следует обратить внимание на использование механизмов утверждений [3, 4]. Они позволяют, с одной стороны, контролировать экспертные утверждения об использовании функции, с другой – вхождение полученных результатов в допустимый диапазон. Кроме того, показанный исходный код содержит дополнительную проверку, гарантирующую сравнение результатов работы сопроцессора и ожидаемых результатов с учетом заданной точности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ ФУНКЦИИ

Даже в случае использования неоптимизированной реализации сопроцессора время работы варианта из стандартной библиотеки превышает время работы аппаратного модуля в 90 раз в лучшем случае (рис. 7), что доказывает эффективность предложенного подхода.

В качестве примера, который иллюстрирует важность качественной обработки экспертных данных, на диаграмме (рис. 8) показан прирост для точности в семь знаков. Следует отметить, что прирост аппаратных затрат в этом случае составил порядка 25 % относительно модуля с точностью в пять знаков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен метод создания библиотеки математических функций для систем на ПЛИС.

Даний метод позволяє виконувати якісну оптимізацію систем на ПЛІС, яка базується на двох важливих факторах – експертних знаннях о предметній області застосування та інформації про використовувану платформу.

Применение предложенного метода позволяет повысить производительность, что доказывают полученные результаты экспериментов.

Розробка бібліотеки, обираючої підтримку перечислених платформ, сьогодні ведеться на базі лабораторії «FPGA-технології та діагностики КС» ДонНТУ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. MicroBlaze Processor Reference Guide [Электронный ресурс] / XILINX. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.xilinx.com/support/documentation/sw\\_manuals\\_edk63i\\_mb\\_ref\\_guide.pdf](http://www.xilinx.com/support/documentation/sw_manuals_edk63i_mb_ref_guide.pdf), свободный. – Загл. с экрана. – Англ.
2. Nios II Processor Reference Handbook [Электронный ресурс] / Altera Corporation. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.altera.com/literature/hb/nios2/n2cpsi\\_nii5v1.pdf](http://www.altera.com/literature/hb/nios2/n2cpsi_nii5v1.pdf), свободный. – Загл. с экрана. – Англ.
3. Programming languages – C : ISO/IEC 9899:1999(E) – ISO/IEC 9899/1999(E). – [Чинний від 01.12.1999]. – ISO/IEC, 1999. – 538 р. – (Міжнародний стандарт).
4. Programming languages – C++ : ISO/IEC 14882:2003 – ISO/IEC 14882:2003. – [Чинний від 01.12.2003]. – ISO/IEC, 2003. – 650 р. – (Міжнародний стандарт).
5. Jerraya, A. A. Hardware/Software Interface Codesign for Embedded Systems / A. A. Jerraya, W. Wolf // Computer. – 2005. – № 38. – Р. 63–69.
6. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений / [Г. Буч, Р. Максимчук,

М. Энгл и др.]. – [3-е изд.]. – М. : Вильямс», 2008. – 720 с. : ил.

7. Cyclone II Device Handbook Volume 1 [Электронный ресурс] / Altera Corporation. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.altera.com/literature/hb/cycl2/cycl2\\_cii5v1.pdf](http://www.altera.com/literature/hb/cycl2/cycl2_cii5v1.pdf), свободный. – Загл. с экрана. – Англ.
8. Avalon Interface Specifications [Электронный ресурс] / Altera Corporation. – Электрон. дан. – Режим доступа: [http://www.altera.com/literature/manual/mnl\\_avalon\\_spec.pdf](http://www.altera.com/literature/manual/mnl_avalon_spec.pdf), свободный. – Загл. с экрана. – Англ.
9. Ильин, В. А. Математический анализ. Начальный курс / Ильин В. А., Садовничий В. А., Сендович Б. Ч. – [2-е изд., перераб.]. – М. : Изд-ва МГУ, 1985. – 662 с.

Надійшла 10.11.2010

Зінченко Ю. Є., Гриценко А. О., Зеленьова І. Я., Войтов Г. В.

## ПРОГРАМНО-АПАРАТНА БІБЛІОТЕКА МАТЕМАТИЧНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ СИСТЕМ НА ПЛІС

У статті пропонується метод створення бібліотеки математичних функцій для систем на ПЛІС (SoPC) і набору необхідних для роботи з нею апаратно-програмних засобів. Запропонована бібліотека надає можливість варіювати структурою системи на ПЛІС відповідно до вимог користувача та доступних апаратних ресурсів.

**Ключові слова:** ПЛІС, системи на ПЛІС, процесор, периферійний модуль, бібліотека.

Zinchenko Y. E., Grytsenko A. A., Zelenyova I. J., Voytov G. V.

## HARDWARE-SOFTWARE MATH LIBRARY FOR SOPC

The authors propose a method of creation of a math library for SoPC and a set of the required tools. Using this library, it is possible to vary the SoPC structure according to the user's requirements and available hardware resources.

**Key words:** FPGA, SOPC, CPU, peripheral module, library.

УДК 004.416.03

Поздняков А. А.<sup>1</sup>, Пархоменко А. В.<sup>2</sup>, Тамрас Н. И.<sup>3</sup>, Чижик Е. В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Директор по консалтингу ООО «Бриг-Ритейл»

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент Запорожского национального технического университета

<sup>3</sup>Инженер-технолог ОАО «Мотор Сич»

<sup>4</sup>Инженер-программист ОАО «Мотор Сич»

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТОМ ВНЕДРЕНИЯ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ

В статье приведены результаты интеграции современных программных продуктов с целью эффективного управления проектом внедрения системы SAP ERP.

**Ключевые слова:** методология внедрения ERP-системы, система управления проектом, интеллект-карта, иерархическая структура работ, интеграция программного обеспечения.

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из известных концепций построения информационной системы предприятия на современном этапе являются ERP-системы. Enterprise Resour-

ce Planning – это методология эффективного планирования и управления всеми ресурсами предприятия, которые необходимы для осуществления продаж, производства, закупок и учета при исполнении заказов

клиентов в сферах производства, дистрибуции и оказания услуг. Мировой опыт свидетельствует, что умело выбранная и внедренная ERP-система существенно улучшает управляемость предприятием и повышает эффективность его работы [1].

## 1. АКТУАЛЬНОСТЬ И ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ ERP-СИСТЕМ

В декабре 2009 года руководством ОАО «Мотор Сич» было принято решение автоматизировать деятельность предприятия по процессам закупок и хранения материалов, продаж готовой продукции, ведения бухгалтерского, налогового учета путем внедрения функциональных модулей системы SAP ERP (R/3 4.0b): «Финансы» (Finance, FI), «Управление материальными потоками» (Materials Management, MM), «Продажи и дистрибуция» (Sales and Distribution, SD) консалтинговой компанией BrigRetail.

Выбор предприятием данной системы обусловлен тем, что R/3 имеет мощный функционал и наибольшее количество внедрений среди ERP-систем на территории стран СНГ и в Украине. Наличие широкого спектра модульных приложений, позволяющих использовать их совместно, а также в комбинации с внешними элементами, открывает большие возможности по реализации операций в области финансов, логистики и управления персоналом [2].

Внедрение на предприятии такой системы, как R/3, дает возможность объединить производство, сбыт, бухгалтерский учет и учет затрат в единое целое, способствует рационализации производства, предоставляет возможность оперативного получения производственно-экономических данных и позволяет точно планировать и управлять производственными процессами.

Как известно, внедрение ERP-системы требует тщательного планирования в рамках длительного (от трех месяцев до нескольких лет) и дорогостоящего

проекта. Основные сложности внедрения возникают по следующим причинам: слабая поддержка проектов со стороны владельцев предприятий; нежелание предоставлять конфиденциальную информацию; недостаточное инвестирование в обучение персонала; недоработанность политики занесения и поддержки актуальности данных в ERP.

Тем не менее, проблемы, возникающие при внедрении подобных систем, уже достаточно хорошо изучены, и в настоящее время созданы эффективные методики их решения, объединенные в соответствующих стандартах (методологиях). Методологии внедрения обычно разрабатываются ведущими производителями информационных систем с учетом особенностей их программных продуктов, а также сферы внедрения.

Методология ASAP – это структурный подход, рекомендуемый компанией SAP AG при внедрении своей системы SAP ERP. На всех этапах методологии ASAP (подготовка проекта, концептуальное проектирование, реализация, окончательная подготовка, запуск и поддержка системы) активно решаются задачи, связанные с планированием и управлением проектом [3].

## 2. СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ (СУП)

### 2.1. Анализ функциональных возможностей современных СУП

Для автоматизированного управления проектами сегодня широко применяются системы управления проектами. СУП позволяют обеспечить информационную поддержку жизненного цикла проектов, эффективное планирование и управление ходом работ, соответствие заранее определенным стандартам и требованиям [4].

Все системы управления проектами делятся на два класса – старший и средний (рис. 1). Принадлеж-

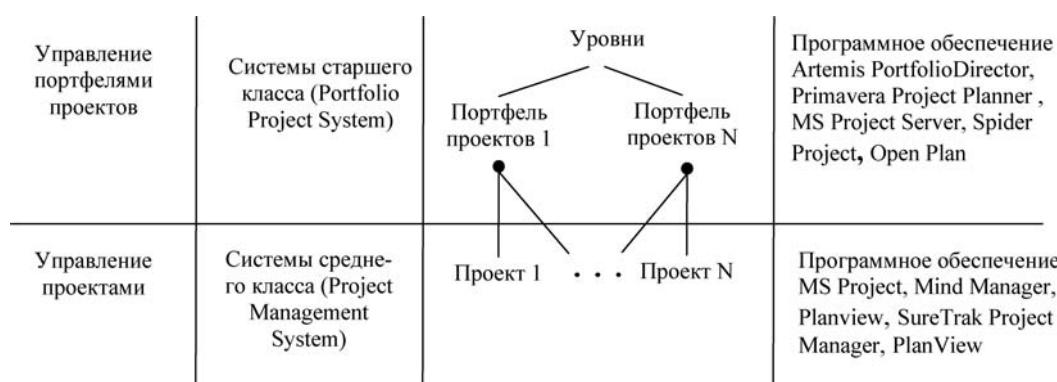


Рис. 1. Уровни управления проектами и используемое программное обеспечение

ность программной системы к тому или иному уровню определяется возможностью группировать проекты в портфели [5].

Как показал обзор [6, 7], практически все популярные инструменты «доросли» до того уровня, когда их возможности почти не отличаются. Поэтому при выборе СУП аналитики советуют принимать во внимание три вещи: зрелость существующих в компании практик управления проектами; типы инвестиций, проектов и работ, которые будут выполняться; специфические отраслевые требования и необходимость в дополнительной функциональности.

## 2.2. Выбор системы управления проектом

Для того, чтобы начать работу над проектом внедрения программной системы, необходимо сформулировать цели внедрения, подготовить стратегию внедрения, масштабировать и оценить предстоящий проект. Авторы предлагают руководителю проекта вначале сгенерировать свои идеи, структурировать и визуально их представить при помощи интеллект-карт (карты ума, ментальной карты). Интеллект-карта – это эффективный инструмент структурирования и анализа информации, позволяющий ускорить разработку бизнес-проектов [8].

Из существующих систем для визуального представления мыслей человека в виде интеллект-карты была выбрана программа Mindjet MindManager, которая представляет собой удобный инструмент, облегчающий планирование и контроль проектов [9]. Диаграмма идеи, которая создается с помощью MindMan-

ager, имитирует ход мысли автора, а также предлагает возможности интерактивной работы, в том числе встраивание в диаграмму разного рода данных, гиперссылок, инструментов коллективной работы с информацией и др.

Для последующей более детальной работы над проектом была выбрана система Microsoft Project, которая предлагает качественную реализацию стандартных функций управления проектом за умеренную цену [10]. Достоинствами этой системы являются простота эксплуатации, интуитивность управления и настройки. Между выбранными системами легко осуществляется передача данных, причем в обоих направлениях.

## 3. МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТОМ

### 3.1. Совместное применение MindManager и MS Project для планирования и управления проектом

Для эффективного планирования проекта внедрения системы SAP ERP (R/3) на ОАО «Мотор Сич» авторами предложена следующая методика.

**1-й этап.** Выполнить создание ментальной карты, которая отображает укрупненный план внедрения системы. На ней создаются: Центральная тема (Внедрение системы R/3) – соответствует понятию Проект в Microsoft Project, подтемы 1-го уровня (Подготовка проекта, Концептуальное проектирование, Реализация) – соответствуют Иерархической Структуре Работ (ИСР), подтемы 2-го уровня – соответствуют Итоговым задачам (рис. 2).

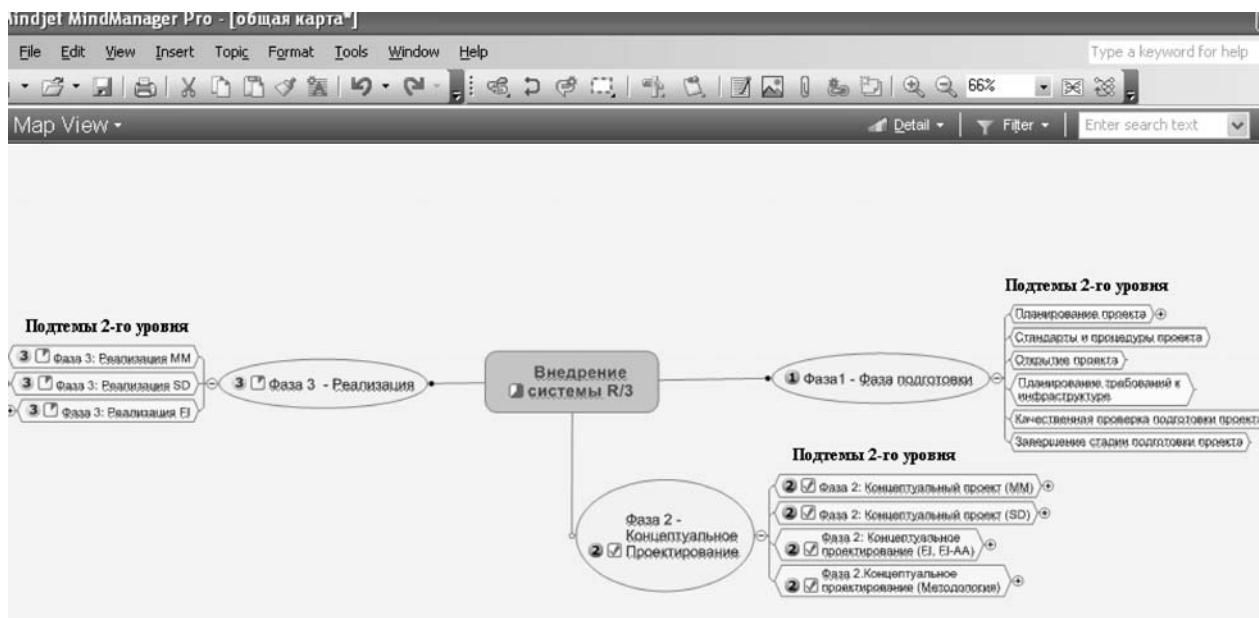
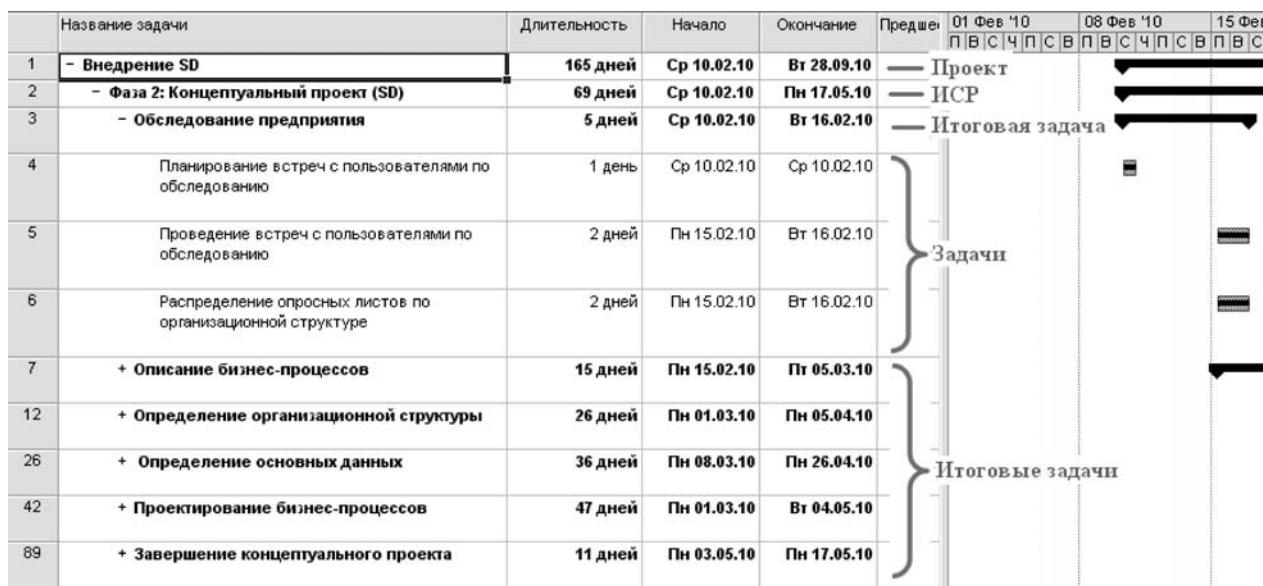


Рис. 2. Разработка ментальной карты в MindManager



**Рис. 3.** Результат передачи данных из MindManager в MS Project

**2-й этап.** Экспорт данных из MindManager в MS Project. Все, что присутствует на ментальной карте, передается в MS Project в виде: Проект, ИСР, Итоговые задачи (рис. 3).

**3-й этап.** Произвести в MS Project детализацию укрупненного плана, т. е. разбить Итоговые задачи на Задачи. Перечислить все ресурсы, которые будут задействованы в проекте, определить их тип (трудовой, материальный), сгруппировать их. Для задач наиболее низкого уровня определить длительность, назначить для них ресурсы. Установить связи между задачами и ограничения на задачи. Провести анализ и оптимизацию плана. Выполнить подготовку отчетов.

**4-й этап.** Если есть необходимость наглядно представить данные, например, запаздывающие задачи, то создать соответствующую выборку таких задач и передать их обратно в MindManager, где в свою очередь будет создана наглядная ментальная карта. При необходимости сохранить график ресурсов в файл GIF и прикрепить его к ментальной карте.

Предложенная методика базируется на интеграции выбранных программных продуктов, что обеспечивает необходимый функционал и представляет хорошую альтернативу более дорогостоящим и сложным в использовании системам управления проектами.

### 3.2. Разработка программного обеспечения для расширения функциональных возможностей MS Project

Как известно, основная задача руководителя проекта – обеспечить выполнение работ в установлен-

ные сроки, в рамках выделенных средств и с соответствующим качеством [11].

Для успешной реализации проекта необходимо не только составить подробный план, учитывающий требования по использованию ресурсов, но и оперативно контролировать выполнение работ, отслеживать сроки и соблюдать ограничения по объему финансирования, своевременно внося необходимые корректизы. Это и является сутью процесса управления.

Для упрощения этого процесса в среде MS Project были разработаны две формы: «Работа с задачами» и «Работа с ресурсами». Необходимость создания этих форм обуславливается тем, что руководителю проекта ежедневно приходится осуществлять анализ следующих данных: какие задачи выполнены, планируются, запаздывают, при этом всегда под контролем должны быть критические задачи. Также необходимо контролировать выполнение задач группами ресурсов или отдельными ресурсами и т. д. Поэтому, для экономии времени руководителя проекта и избавления его от рутинной работы (всевозможного применения фильтров, сортировок, группировок), авторами были разработаны формы, на которых отображены наиболее часто используемые команды. Разработанные формы обладают интуитивно понятным интерфейсом и используются для получения объективной оценки хода выполнения проекта.

Для разработки форм в MS Project использовался VBA (Visual Basic for Applications), являющийся инструментальным средством разработки приложений в среде основных компонентов Office.



Рис. 4. Форма «Работа с задачами»

Разработанная форма «Работа с задачами» (рис. 4) позволяет пользователю:

- в блоке «Задачи» получить сведения о ходе выполнения всех задач проекта;
- в блоке «Критические задачи» получить сведения о ходе выполнения критических задач;
- в блоке «Группы ресурсов» получить сведения о задачах, выполняемых определенной группой ресурсов;
- в блоке «Отчеты» просмотреть и распечатать сведения о задачах.

Разработанная форма «Работа с ресурсами» позволяет пользователю:

- в блоке «Ресурсы» получить сведения о ресурсах, задействованных в выполнении проекта;
- в блоке «Группа ресурсов» получить сведения о выполнении задач конкретной группы ресурсов;
- в блоке «Отчеты» автоматизировать процесс формирования отчетов.

### 3.3. Возможности интеграции СУП с системой SAP ERP (R/3)

Необходимо отметить, что в составе системы R/3 имеется прикладной модуль «Управление проектами» (Project System, PS), который поддерживает планирование, управление и мониторинг долгосрочных проектов с высоким уровнем сложности.

В случае дальнейшего внедрения на предприятии данного модуля авторами предлагается совместное использование программ MindManager, MS Project для расширения функциональности модуля PS. Это связано с тем, что модуль PS не поддерживает всех функций календарного планирования, однако позволяет вводить уже разработанный план проекта или загружать, например, из MS Project (рис. 5).

После получения при помощи модуля PS фактических затрат по проекту осуществляется их обратная передача в MS Project для получения отклонения между плановыми и фактическими показателями. На основе этих сведений выполняется анализ возможного влияния отклонений в выполненных объемах работ на ход реализации проекта в целом и выработка соответствующих управленческих решений.

## ВЫВОДЫ

В работе предложена методика эффективного управления проектом внедрения системы SAP ERP (R/3), которая базируется на методологии ASAP, а также принципе открытости программных систем. Интеграция выбранных программных продуктов обеспечивает необходимый функционал и представляет хорошую альтернативу более дорогостоящим и сложным в использовании системам управления проектами. Разработанные в среде MS Project формы «Работа с задачами» и «Работа с ресурсами» могут использоваться для получения объективной оценки хода выполнения проекта. Практическая ценность разработки заключается в экономии времени руководителя проекта и избавлении его от рутинной работы. Перспективным является дальнейшее совместное применение модуля PS системы SAP ERP совместно с программами MindManager и MS Project.

Автоматизированное управление проектом внедрения системы R/3 на предприятии «Мотор Сич» позволило контролировать выполнение проекта в установленные сроки, с учетом утвержденного бюджета и с соответствующим качеством.

## ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Поздняков, О. А. Особенности создания системы управления предприятием на основе MYSAP ERP / О. А. Поздняков и др. // Материалы Международной НТК «Компьютерное моделирование и интеллектуальные системы». – Запорожье : ЗНТУ, 2007. – С. 240–247.
2. Кобыляцкий, А. Г. Адаптация системы R/3 для решения задач пользователя / А. Г. Кобыляцкий и др. // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – № 1, 2009. – С. 124–128.
3. Кале, В. Внедрение SAP R/3. Руководство для менеджеров и инженеров : пер. с англ. П. А. Панов / В. Кале. – М. : Компания АйтИ, 2006. – 511 с.

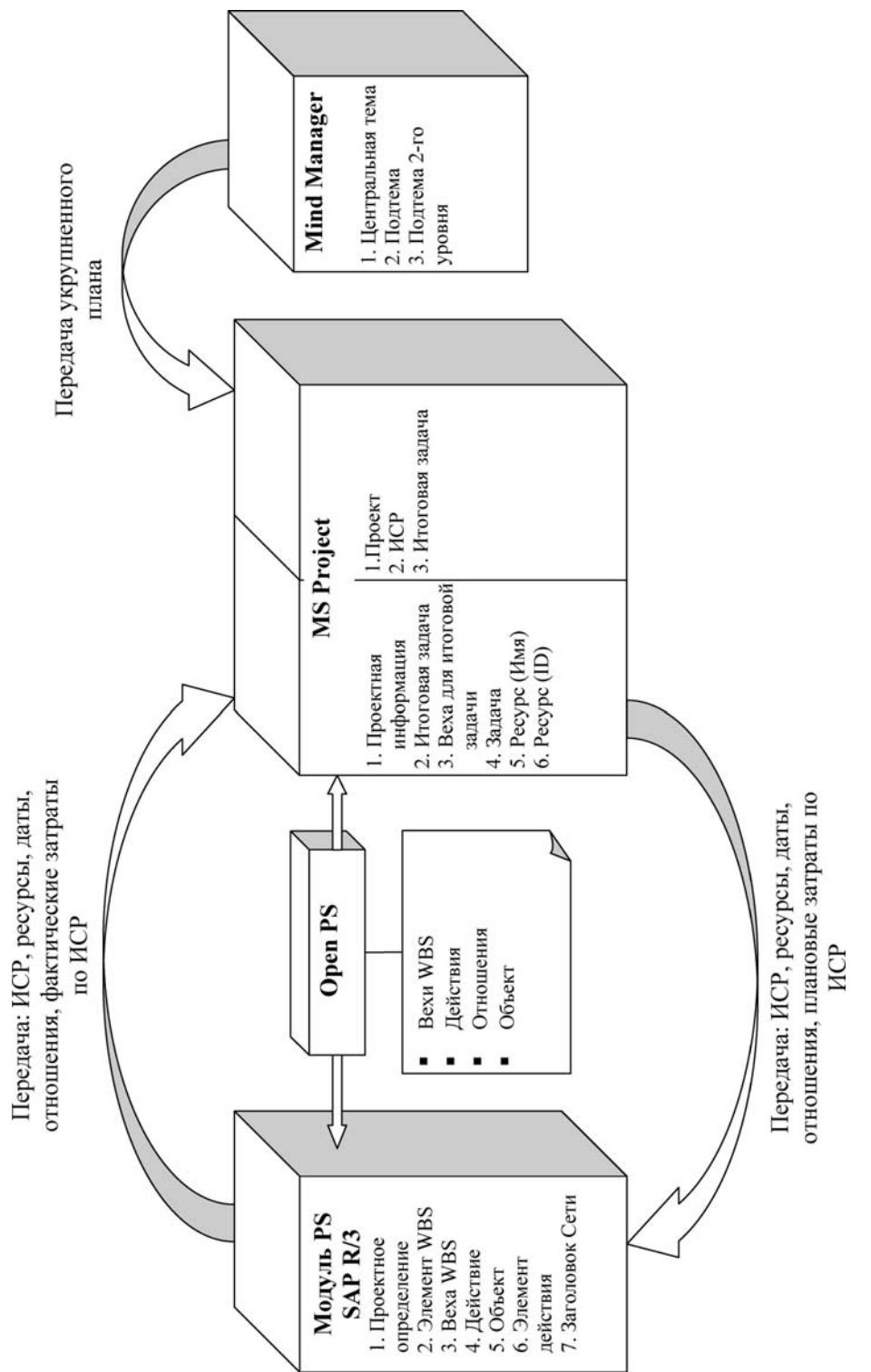


Рис. 5. Взаимодействие программных продуктов

4. Вязовой, В. Системы управления проектами [Электронный ресурс] / Валерий Вязовой. – Електрон. дані. – Режим доступу: <http://www.cfin.ru/software/project/pms-review.shtml>, вільний. – Назва з екрану.
5. Матвеев, А. А. Модели и методы управления портфелями проектов / А. А. Матвеев, Д. А. Новиков, А. В. Цветков. – М. : ПМСОФТ, 2005. – 206 с.
6. Обзор современного программного обеспечения управления проектами [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.biblioond.ru/view.aspx?id=66417>, свободный. – Назв. с экрана.
7. Кухар, А. Инструментальная поддержка PPM / А. Кухар // Компьютерное обозрение. – 2009. – № 36. – С. 26–29.
8. Мюллер, Х. Составление ментальных карт. Метод генерации и структурирования идей / Хорст Мюллер. – М. : Омега-Л, 2007. – 356 с.
9. Копыл, В. И. Карты ума. MindManager / В. И. Копыл – Минск : Харвест, 2007. – 64 с.
10. Кудрявцев, Е. М. Microsoft Project. Методы сетевого планирования и управления проектом / Е. М. Кудрявцев. – М. : ДМК Пресс, 2005. – 240 с.
11. Арчибалд, Р. Д. Как улучшить управление проектами в организации / Рассел Д. Арчибалд // Методы менеджмента качества.– № 8, 2004.– С. 17–23.

Надійшла 14.10.2010

Поздняков А. А., Пархоменко А. В., Тамрас Н. І., Чижик О. В.

#### АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ

У статті наведено результати інтеграції сучасних програмних продуктів з метою ефективного управління проектом впровадження системи SAP ERP.

**Ключові слова:** методологія впровадження ERP-систем, система управління проектом, інтелект-карта, ієрархічна структура робіт, інтеграція програмного забезпечення.

Pozdnyakov A. A., Parkhomenko A. V., Tamras N. I., Chizhik O. V.

#### AUTOMATIZED MANAGEMENT OF PROGRAM SYSTEM INTRODUCTION PROJECT

The results of modern software integration for the purpose of SAP ERP-system introduction project effective management are presented in this paper.

**Key words:** ERP-systems introduction methodology, project management system, mind map, Work Breakdown Structure, software integration.

УДК 658.512.011:681.326:519.713

Хаханов В. И.<sup>1</sup>, Чумаченко С. В.<sup>1</sup>, Литвинова Е. И.<sup>2</sup>, Гузь О. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент Харьковского национального университета радиоэлектроники

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент Донецкой академии автомобильного транспорта

## МУЛЬТИПРОЦЕССОР ДЛЯ АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА

Предлагается инфраструктура быстродействующего мультипроцессора параллельного анализа информации, представленной в виде аналитических, графовых и табличных форм ассоциативных отношений, для поиска, распознавания и принятия решений в  $n$ -мерном векторном дискретном пространстве. Рассматриваются векторно-логические процесс-модели актуальных прикладных задач, качество решения которых оценивается введенной интегральной не-арифметической метрикой взаимодействия булевых векторов.

**Ключевые слова:** мультипроцессор, анализ информации, логическое ассоциативное отношение, процесс-модель.

### ВВЕДЕНИЕ

Идея исследования заключается в том, чтобы убрать из компьютера «тяжеловесную» арифметику и трансформировать освободившиеся ресурсы в (мозгоподобную) инфраструктуру ассоциативной логики, моделирующей функциональность мозга, которая позволяет опытному человеку ежеминутно принимать правильные решения. Мозг и компьютер имеют единую технологическую основу в виде примитивных логических операций: and, or, not, xor. По мере приобретения опыта мозг и компьютер создают более сложные функциональные пространствен-

но-временные логические преобразователи, использующие упомянутые выше примитивные операции. Специализация компьютерного изделия, ориентированная на использование только логических операций, дает возможность приблизиться к ассоциативно-логическому мышлению человека и тем самым существенно ( $\times 100$ ) повысить быстродействие решения неарифметических задач. Исключение арифметических операций, использование параллелизма алгебры векторной логики, мультипроцессорность архитектуры создают эффективную инфраструктуру, которая объединяет математическую и технологическую

культуру для решения прикладных задач. Мозгоподобность мультипроцессорной цифровой системы на кристалле есть концепция создания архитектуры и моделей вычислительных процессов для реализации свойственных мозгу неарифметических ассоциативно-логических функциональностей на современной цифровой платформе путем использования векторных логических операций и критериев в задачах поиска, распознавания и принятия решений. Рыночная привлекательность логического ассоциативного мультипроцессора (Logical Associative MultiProcessor – LAMP) определяется тысячами старых и новых логических по своей природе задач, которые в настоящее время решаются не эффективно на избыточных универсальных компьютерах с мощным арифметическим процессором. Вот некоторые актуальные для ИТ-рынка проблемы:

1. Анализ, синтез и коррекция синтаксических и семантических языковых конструкций (реферирование, исправление ошибок, оценивание качества текстов).

2. Распознавание видео- и аудио-образов путем их представления векторными моделями существенных параметров в дискретном пространстве.

3. Сервисное обслуживание сложных технических изделий и восстановление работоспособности в процессе их функционирования.

4. Тестирование знаний и экспертное обслуживание объектов или субъектов для определения их валидности.

5. Идентификация объекта или процесса для принятия решения в условиях неопределенности.

6. Точный поиск заданной вектором параметров информации в Internet.

7. Целеуказание в истребителе или в автоматической системе посадки лайнера, работающей в реальном микросекундном диапазоне времени.

8. Разведение объектов во времени и в пространстве для диспетчерской службы аэропорта или оптимизация инфраструктуры городского транспорта в целях исключения коллизий.

Практически все упомянутые задачи решаются в реальном масштабе времени, являются изоморфными по логической структуре процесс-моделей, использующих совокупность взаимосвязанных ассоциативных таблиц. Для их решения необходима быстродействующая и специализированная аппаратная платформа (LAMP), ориентированная на параллельное выполнение процедур поиска, распознавания и принятия решений, оцениваемых путем использования интегрального неарифметического критерия качества.

Целью работы является существенное ( $\times 100$ ) повышение быстродействия процедур поиска, распознавания и принятия решений путем мультипроцессорной и параллельной реализации ассоциативно-логических векторных операций для анализа графовых и табличных структур данных в дискретном булевом пространстве без использования арифметических операций.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать неарифметическую метрику оценивания ассоциативно-логических решений;
- 2) сформировать структуры данных и процесс-модели решения актуальных задач;
- 3) создать архитектуру логического ассоциативного мультипроцессора;
- 4) определить практическое использование LAMP.

Сущность исследования заключается в разработке инфраструктуры экспертного обслуживания запросов в реальном масштабе времени, интегрирующей мультипроцессорную систему на кристалле с аппаратом ассоциативно-логических структур данных для получения детерминированного решения, валидность (состоительность) которого оценивается неарифметическим интегральным критерием качества взаимодействия запроса с заданным дискретным пространством.

Объект исследования – инфраструктура поиска, распознавания и принятия решений в дискретном булевом пространстве на основе использования алгебры векторной логики, мультипроцессорной платформы анализа ассоциативно-логических структур данных и неарифметического интегрального критерия качества.

Предмет исследования – ассоциативно-логические структуры данных и процесс-модели поиска, распознавания и выбора решения на основе неарифметического интегрального критерия качества путем использования мультипроцессорной системы на кристалле, оперирующей векторными логическими операциями.

Источники: аппаратная платформа ассоциативно-логического анализа информации [1–4]; ассоциативно-логические структуры данных для решения информационных задач [5–8]; модели и методы дискретного анализа и синтеза [9–12]; мультипроцессорные средства решения информационно-логических задач [13–19]; мозгоподобные и интеллектуальные логические вычисления [20–25].

## 1. ИНТЕГРАЛЬНАЯ МЕТРИКА ОЦЕНИВАНИЯ РЕШЕНИЯ

Инфраструктура мозгоподобного мультипроцессора включает модели, методы и ассоциативно-логичес-

кие структуры данных, ориентированные на аппаратную поддержку процессов поиска, распознавания и принятия решений [22–24] на основе векторных неарифметических операций. Оценка решения задачи определяется векторно-логическим критерием качества взаимодействия запроса (вектора  $m$ ) с системой ассоциативных векторов (ассоциаторов), в результате которого сгенерируется конструктивный ответ в виде одного или нескольких ассоциаторов, а также пока еще численной характеристики степени принадлежности (функции качества) входного вектора  $m$  к найденному решению:  $\mu(m \in A)$ . Входной вектор  $m = (m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_q)$ ,  $m_i \in \{0, 1, x\}$  и матрица  $A$  ассоциаторов  $A_{ij} (\in A_{ij} \in A_i \in A) = \{0, 1, x\}$  имеют одинаковую размерность, равную  $q$ . Далее степень принадлежности  $m$ -вектора к вектору  $A$  будет обозначаться как  $\mu(m \in A)$ .

Существует 5 типов теоретико-множественного (логического)  $\Delta$ -взаимодействия двух векторов  $m \cap A$ , определенных на рис. 1. Они формируют все примитивные варианты реакции обобщенной ПРП-системы (Поиска, Распознавания и Принятия решения) на входной вектор-запрос. В технологической отрасли знаний – технической диагностике (Design & Test) – указанная последовательность действий изоморфна маршруту: поиск дефектов, их распознавание, принятие решения на восстановление работоспособности. Все три стадии технологического маршрута нуждаются в метрике оценивания решений для выбора оптимального варианта.

**Определение.** Интегральная теоретико-множественная метрика для оценивания качества запроса есть функция взаимодействия многозначных векторов  $m \cap A$ , которая определяется средней суммой трех нормированных параметров: кодового расстояния  $d(m, A)$ , функции принадлежности  $\mu(m \in A)$  и функции принадлежности  $\mu(A \in m)$ :

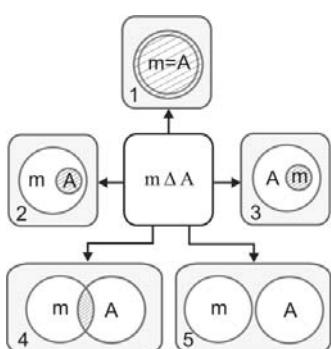


Рис. 1. Результаты пересечения двух векторов

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{1}{3}[d(m, A) + \mu(m \in A) + \mu(A \in m)], d(m, A) = \\
 &= \frac{1}{n} \left[ n - \text{card} \left( \bigcap_{i=1}^n A_i = \emptyset \right) \right]; \\
 \mu(m \in A) &= 2^{\text{card}(m \cap A) - \text{card}(A)} \leftarrow \text{card}(m \cap A) = \\
 &= \text{card} \left( \bigcap_{i=1}^n A_i = x \right) \& \text{card}(A) = \text{card} \left( \bigcup_{i=1}^n A_i = x \right); \\
 \mu(A \in m) &= 2^{\text{card}(m \cap A) - \text{card}(m)} \leftarrow \text{card}(m \cap A) = \\
 &= \text{card} \left( \bigcap_{i=1}^n A_i = x \right) \& \text{card}(m) = \text{card} \left( \bigcup_{i=1}^n m_i = x \right). \quad (1)
 \end{aligned}$$

**Пояснения.** Нормирование параметров позволяет оценить уровень взаимодействия векторов в интервале  $[0, 1]$ . Если зафиксировано предельное максимальное значение каждого параметра, равное 1, то векторы равны между собой. Минимальная оценка,  $Q = 0$ , фиксируется в случае полного несовпадения векторов по всем  $n$  координатам. Если мощность пересечения  $m \cap A = m$  равна половине пространства вектора  $A$ , то функции принадлежности и качества соответственно равны:

$$\begin{aligned}
 \mu(m \in A) &= \frac{1}{2}; \mu(A \in m) = 1; d(m, A) = 1; \\
 Q(m, A) &= \frac{5}{2 \times 3} = \frac{5}{6}.
 \end{aligned}$$

Аналогичное значение будет иметь параметр  $Q$ , если мощность пересечения  $m \cap A = A$  равна половине пространства вектора  $m$ . Если мощность пересечения  $\text{card}(m \cap A)$  равна половине мощностей пространств векторов  $A$  и  $m$ , то функции принадлежности имеют следующие значения:

$$\begin{aligned}
 \mu(m \in A) &= \frac{1}{2}; \mu(A \in m) = \frac{1}{2}; \\
 d(m, A) &= 1; \\
 Q(m, A) &= \frac{4}{2 \times 3} = \frac{4}{6} = \frac{2}{3}.
 \end{aligned}$$

Следует заметить, если пересечение двух векторов равно пустому множеству, то степень двойки от символа «пусто» равна нулю:  $2^{\text{card}(m \cap A) = \emptyset} = 2^\emptyset = 0$ . Это действительно означает, что количество общих точек при пересечении двух пространств равно нулю.

Цель введения векторно-логического критерия качества решения заключается в существенном повышении быстродействия при подсчете качества  $Q$  взаимодействия компонентов  $m$  и  $A$  при анализе ассоциативных структур данных путем использования только векторных логических операций. Арифметический критерий (1) без усреднения функций при-

надлежности и кодового расстояния можно трансформировать к виду

$$\begin{aligned} Q &= d[m, A_{i(j)}] + \mu[m \in A_{i(j)}] + \mu[A_{i(j)} \in m], \\ d(m, A_{i(j)}) &= \text{card}[m \bigoplus_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1]; \\ \mu(m \in A_{i(j)}) &= \text{card}[A_{i(j)} = 1] - \text{card}[m \wedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1]; \\ \mu(A_{i(j)} \in m) &= \text{card}[m = 1] - \text{card}[m \wedge_{i(j)=1}^{n(m)} A_{i(j)} = 1]. \quad (2) \end{aligned}$$

Первый компонент, составляющий критерий, формирует степень несовпадения  $n$ -мерных векторов – кодовое расстояние, путем выполнения операции хор, второй и третий определяют степень непринадлежности результата конъюнкции к числу единиц каждого из двух взаимодействующих векторов. Понятия принадлежности и непринадлежности являются взаимодополняющими, но в данном случае технологичнее вычислять непринадлежность. Таким образом, идеальный критерий качества равен нулю, когда два вектора равны между собой. Оценка качества взаимодействия двух двоичных векторов убывает по мере роста критерия от 0 к 1. Чтобы окончательно уйти от арифметических операций при подсчете уже век-

торного критерия качества, необходимо выражения (2) преобразовать к виду

$$\begin{aligned} Q &= d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m), \\ d(m, A) &= m \oplus A; \\ \mu(m \in A) &= A \in \overline{m \wedge A}; \\ \mu(A \in m) &= m \in \overline{m \wedge A}. \quad (3) \end{aligned}$$

Здесь критерии представлены уже не числами, а векторами, которые оценивают взаимодействие компонентов  $m, A$ . При этом увеличение числа нулей в трех векторах качества повышает критерий, а наличие единиц индицирует ухудшение качества взаимодействия. Для сравнения оценок необходимо определять мощность единиц в каждом векторе без выполнения операций суммирования. Это можно сделать с помощью регистра [4] (рис. 2), который позволяет за один такт выполнить сдвиг влево и уплотнить все единичные координаты  $n$ -разрядного двоичного вектора.

После процедуры сжатия номер правого единично-го бита уплотненной серии единиц формирует индекс качества взаимодействия векторов. Для двоичных наборов  $m = (110011001100)$ ,  $A = (000011110101)$  определение качества их взаимодействия по формулам (3) представлено в следующем виде (нулевые координаты отмечены точками):

$m$	1 1 . . 1 1 . . 1 1 . .
$A$	. . . . 1 1 1 1 . 1 . 1
$m \wedge A$	. . . . 1 1 . . . 1 . .
$\overline{m \wedge A}$	1 1 1 1 . . 1 1 1 . 1 1
$d(m, A) = m \oplus A$	1 1 . . . . 1 1 1 . . 1
$\mu(A \in m) = m \wedge \overline{m \wedge A}$	1 1 . . . . . . 1 . . .
$\mu(m \in A) = A \wedge \overline{m \wedge A}$	. . . . . . 1 1 . . . 1
$Q = d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m)$	1 1 . . . . 1 1 1 . . . 1
$Q(m, A) = (6/12)$	1 1 1 1 1 1 . . . . .

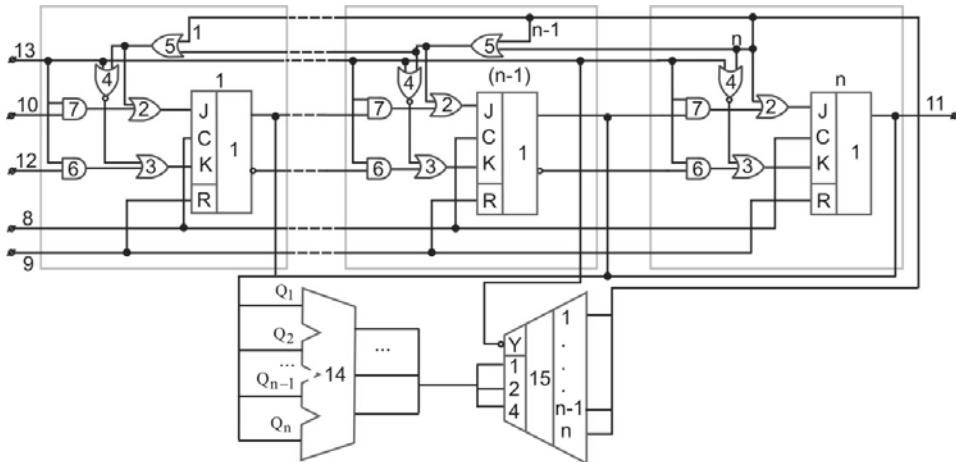


Рис. 2. Регистр сдвига и уплотнения единиц

Здесь сформирована не только оценка взаимодействия векторов, равная  $Q(m, A) = (6/12)$ , но, что самое главное, единичные координаты строки  $Q = d(m, A) \vee \mu(m \in A) \vee \mu(A \in m)$  идентифицируют все существенные переменные, по которым имеется некачественное взаимодействие векторов. Для сравнения двух решений, полученных в результате логического анализа, используются сжатые векторы качества  $Q$ , над которыми выполняется процедура, включающая следующие векторные операции:

$$Q(m, A) = \begin{cases} Q_1(m, A) \leftarrow \text{or}[Q_1(m, A) \wedge Q_2(m, A) \oplus Q_1(m, A)] = 0; \\ Q_2(m, A) \leftarrow \text{or}[Q_1(m, A) \wedge Q_2(m, A) \oplus Q_1(m, A)] = 1. \end{cases} \quad (4)$$

Вектор-бит ог-оператор девекторизации формирует двоичное битовое решение на основе применения логической операции or к  $n$  разрядам вектора существенных переменных критерия качества. Схемотехническое решение процедуры выбора

$$Q = \begin{cases} Q_1 \leftarrow Y = 0 \\ Q_2 \leftarrow Y = 1 \end{cases}$$

и аналитическая процесс-модель имеют три операции, которые представлены на рис. 3.

Для двоичных векторов, представляющих собой критерии качества, ниже выполнена процедура выбора лучшего из них на основании выражения, представленного в (4):

$Q_1(m, A) = (6, 12)$	1 1 1 1 1 1 . . . . .
$Q_2(m, A) = (8, 12)$	1 1 1 1 1 1 1 1 . . . .
$Q_1(m, A) \wedge Q_2(m, A)$	1 1 1 1 1 1 . . . . .
$Q_1(m, A) \oplus Q_1(m, A) \wedge Q_2(m, A)$	. . . . . . . . . . .
$Q(m, A) = Q_1(m, A)$	1 1 1 1 1 1 . . . . .

Векторные логические критерии качества взаимодействия ассоциативных наборов позволяют получать оценку поиска, распознавания и принятия решения с высоким быстродействием логических параллельных операций, что особенно существенно для критических систем реального времени.

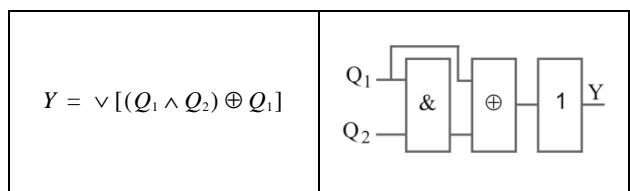


Рис. 3. Процесс-модель выбора решения

## 2. ПРОЦЕСС-МОДЕЛЬ ПОИСКА, РАСПОЗНАВАНИЯ И ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Метрика качества, представленная в (3), дает возможность оценивать близость пространственных объектов друг к другу, а также взаимодействие векторных пространств. Представленная ниже процесс-модель  $P(m, A)$  сопровождается интегральным критерием качества, который оценивает не только кодовое расстояние по Хэммингу, но и эффективность взаимодействия объектов. Аналитическая запись обобщенной процесс-модели для выбора лучшего взаимодействия входного запроса  $m$  с системой логических ассоциативных отношений представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} P(m, A) &= \min_i Q_i(m \Delta A_i) = \\ &= \vee[(Q_i \wedge_{j=1, n} Q_j) \oplus Q_i] = 0; \\ Q(m, A) &= (Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n); \\ A &= (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n); \\ \Delta &= \{\text{and}, \text{or}, \text{xor}, \text{not}, \text{slc}, \text{nop}\}; \\ A_i &= (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{is}); \\ A_{ij} &= (A_{ij1}, A_{ij2}, \dots, A_{ijr}, \dots, A_{msq}); \\ m &= (m_1, m_2, \dots, m_r, \dots, m_q). \\ Q_i &= d(m, A_i) \vee \mu(m \in A_i) \vee \mu(A_i \in m), \\ d(m, A_i) &= m \oplus A_i; \\ \mu(m \in A_i) &= A_i \wedge \overline{m \wedge A_i}; \\ \mu(A_i \in m) &= m \wedge \overline{m \wedge A_i}. \end{aligned} \quad (5)$$

Комментарии: 1) функциональность  $P(m, A)$  задает аналитическую модель вычислительного процесса в виде высказывания, минимизирующего интегральный критерий качества; 2) структуры данных представлены в виде вершин-таблиц графа  $A = (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m)$ , логически взаимодействующих между собой; 3) вершина графа задается упорядоченной совокупностью вектор-строк ассоциативной таблицы  $A_i = (A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{is})$  явных решений, где строка  $A_{ij} = (A_{ij1}, A_{ij2}, \dots, A_{ijr}, \dots, A_{msq})$  представляет собой истинное высказывание. Поскольку функционал, представленный в виде таблицы, не имеет постоянных во времени входных и выходных переменных, то данная структура отличается от последовательной машины фон Неймана, задаваемой конечными автоматами Мили и Мура. Равнозначность всех переменных в векторе  $A_{ij} = (A_{ij1}, A_{ij2}, \dots, A_{ijr}, \dots, A_{msq})$  создает одинаковые условия их существования, что означает инвариантность решения задач прямой и обратной импликации

в пространстве  $A_i \in A$ . Ассоциативный вектор  $A_{ij}$  определяет собой явное решение, где каждая переменная задается в конечном, многозначном и дискретном алфавите  $A_{ijr} \in \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_k\} = \beta$ . Взаимодействие  $P(m, A)$ , входного вектора-запроса  $m = (m_1, m_2, \dots, m_r, \dots, m_q)$  с графом  $A = (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m)$ , формирует множество решений с выбором лучшего из них по минимальному критерию качества:

$$P(m, A) = \min Q_i[m \wedge (A_1 \vee A_2 \vee \dots \vee A_i \vee \dots \vee A_m)].$$

Конкретное взаимодействие вершин графа между собой создает функциональность  $A = (A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m)$ , которая может быть оформлена в следующие структуры:

1) единственная ассоциативная таблица, содержащая все решения логической задачи в явном виде. Преимущество – максимальное быстродействие параллельного ассоциативного поиска решения по таблице. Недостаток – максимально высокая аппаратурная сложность размещения таблицы большой размерности;

2) древовидная (графовая) структура бинарных отношений между функциональными примитивами, каждый из которых формирует таблицу истинности для незначительного количества переменных. Преимущество – максимально низкая аппаратурная сложность решения задачи. Недостаток – минимальное быстродействие последовательного ассоциативного поиска решения по дереву;

3) компромиссная графовая структура логически понятных для пользователя отношений между примитивами, каждый из которых формирует таблицу истинности для логически сильно взаимосвязанных переменных. Преимущество – высокое быстродействие параллельного ассоциативного поиска решений по минимальному числу таблиц, составляющих граф, а также сравнительно невысокая аппаратурная сложность решения задачи. Недостаток – снижение быстродействия из-за последовательной логической обработки графовой структуры явных решений, найденных в таблицах. Разбиение одной таблицы (ассоциативной памяти) на  $k$  частей приводит к уменьшению аппаратных затрат, выраженных в компонентах (логических таблицах) (LUT – Look Up Table) программируемой логической матрицы [15, 16]. Каждая ячейка памяти создается с помощью четырех лутов. Учитывая, что ассоциативную матрицу можно представить квадратом со стороной  $n$ , то суммарные аппаратные затраты  $Z(n)$  памяти для хранения данных и времени  $T(n)$  анализа логического ассо-

циативного графа функционально зависят от числа  $n$  разбиений таблицы или числа вершин графа:

$$\begin{aligned} Z(n) &= k \times \frac{1}{4} \times \left( \frac{n}{k} \right)^2 + h = \frac{n^2}{4 \times k} + h, \quad (h = \{n, \text{const}\}); \\ T(n) &= \frac{4 \times k}{t_{clk}} + \frac{4}{t_{clk}} = \frac{4}{t_{clk}} (k+1), \quad (t_{clk} = \text{const}). \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь  $h$  – затраты на общую схему управления системой ассоциативных памятей. Платой за уменьшение аппаратуры является снижение быстродействия обработки структуры памятей или увеличение периода анализа компонентов системы. Период обработки одной ассоциативной памяти представлен циклом из четырех синхроимпульсов. Число разбиений  $k$  пропорционально увеличивает количество тактов в худшем варианте последовательного соединения памятей. Слагаемое  $\frac{4}{t_{clk}}$  задает время, необходимое для подготовки данных на входе системы, а также для их декодирования на выходе вычислительной структуры. Функциональные зависимости аппаратных затрат и времени анализа графа ассоциативных памятей от числа вершин или разбиений представлены на рис. 4.

Обобщенная функция эффективности графовой структуры от числа вершин

$$\begin{aligned} f[Z(n), T(n)] &= Z(n) + T(n) = \\ &= \left( \frac{n^2}{4 \times k} + h \right) + \left( \frac{4}{t_{clk}} (k+1) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

позволяет определить оптимальное разбиение совокупного и наперед заданного объема ассоциативной памяти [10–12]. В случае, представленном на рис. 4, лучшее разбиение есть минимум аддитивной функции, который определяется значением  $k$ , обращающим производную функции в нуль:  $n \times n = 600 \times 600$ ,  $h = 200$ ,  $t_{clk} = 4$ ,  $k = 4$ .



Рис. 4. Функции аппаратуры и времени от числа разбиений

Предложенная процесс-модель анализа графа ассоциативных таблиц, а также введенные критерии качества получаемых решений являются основой для разработки специализированной мультипроцессорной архитектуры, ориентированной на параллельное выполнение векторных логических операций.

### 3. АРХИТЕКТУРА ЛОГИЧЕСКОГО АССОЦІАТИВНОГО МУЛЬТИПРОЦЕССОРА

Для анализа больших информационных объемов логических данных существует несколько практически ориентированных технологий:

1. Использование рабочей станции для последовательного программирования задачи, где стоимость ее решения, а также временные затраты очень высоки.

2. Разработка специализированного параллельного процессора на основе ПЛМ. Высокий параллелизм обработки информации компенсирует сравнительно низкую по сравнению с CPU тактовую частоту. Такое схемотехническое решение с возможностью перепрограммирования является по производительности выигрышным вариантом. Недостаток – отсутствие гибкости, характерной программным методам решения логических задач, и высокая стоимость реализации системы на кристалле ПЛМ при больших объемах промышленного выпуска изделия.

3. Лучшее решение связано с объединением достоинств ЦПЭ, ПЛМ и заказных СБИС [15, 16]. Это – гибкость программирования, возможность корректирования исходных кодов; минимальная мощность команд и простые схемотехнические решения аппаратной реализации мультипроцессора; распараллеливание логических процедур на структуре однобитовых процессоров. Имплементация мультипроцессора в кристалл заказной СБИС дает возможность получать максимальную тактовую частоту, минимальную стоимость микросхемы при больших объемах выпуска изделия, низкое энергопотребление.

Объединение преимуществ перечисленных технологий определяет базовую конфигурацию LAMP, который имеет сферическую структуру мультипроцессора (рис. 5), состоящую из 16 векторных секвенсоров (устройств последовательного управления), каждый из которых, включая граничные элементы, соединен с восемью соседними. Структура LAMP имеет прототип в виде процессора PRUS [17], разработанного доктором Stanley Hyduke (CEO Aldec, USA).

Занесение информации в процессор подобно классической схеме (design flow), за исключением того, что стадия размещения и трассировки заменяется фазой распределения программ и данных между всеми логическими бит-процессорами, работающими параллельно. Компилятор обеспечивает размещение данных по процессорам, задает время формирования решения на выходе каждого из них, а также планирует передачу полученных результатов другому процессору. LAMP есть эффективная сеть процессоров, которая обрабатывает данные и обеспечивает обмен информацией между компонентами сети в процессе их решения. Простая схемотехника каждого процессора позволяет эффективно обрабатывать сверхбольшие массивы, насчитывающие миллионы бит информации, затрачивая на это в сотни раз меньше времени по сравнению с универсальным процессором. Базовая ячейка – векторный процессор для LAMP – может быть синтезирован на 200 вентилях, что дает возможность сеть, содержащую 4096 вычислителей, легко реализовать в виде заказных СБИС, используя современную кремниевую технологию. Учитывая, что затраты памяти для хранения данных весьма незначительны, LAMP может представлять интерес для проектирования систем управления в таких областях человеческой деятельности, как индустрия, медицина, защита информации, геология, прогнозирование погоды, искусственный интеллект, космонавтика. LAMP представляет особый интерес для

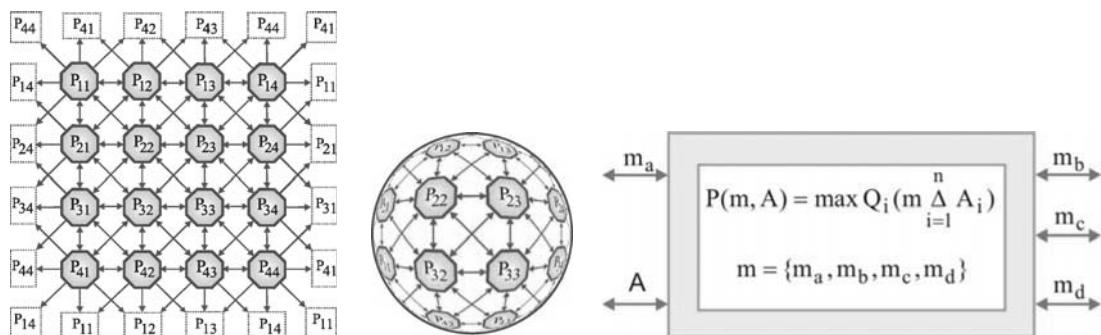


Рис. 5. Макроархитектура LAMP и интерфейс

цифровой обработки данных, распознавания образов и криptoанализа.

Если говорить о функционировании (системы) LAMP, то ее основная цель есть получение квазиоптимального решения в интегрированной задаче поиска и/или распознавания путем использования компонентов инфраструктуры, ориентированных на выполнение векторных логических операций:  $P(m, A) = \min Q_i(m \Delta A_i)$ ,  $m = \{m_a, m_b, m_c, m_d\}$ . Интерфейс системы, соответствующий данному функционалу, представлен на рис. 5. Все компоненты  $\{A, m_a, m_b, m_c, m_d\}$  могут быть как входными, так и выходными. Двунаправленная детализация интерфейса связана с инвариантностью отношения всех переменных, векторов, А-матрицы и компонентов к входам и/или выходам инфраструктуры. Поэтому структурная модель системы LAMP может быть использована для решения любых задач прямой и обратной импликации в дискретном логическом пространстве, чем подчеркивается ее отличие от концепции автоматной модели вычислительного устройства с выраженным входами и выходами. Компоненты или регистры  $m =$

$= (m_a, m_b, m_c, m_d)$  используются для получения решения в виде буферных, входных и выходных векторов, а также для идентификации оценки качества удовлетворения входного запроса.

Одним из возможных вариантов архитектуры мультипроцессора LAMP может служить структура, представленная на рис. 6. Основным компонентом структуры является мультипроцессорная матрица  $P = [P_{ij}]$ ,  $\text{card}(4 \times 4)$ , содержащая 16 вектор-процессоров, каждый из которых предназначен для выполнения пяти логических векторных операций над содержимым памяти данных, представленной в виде таблицы, размерностью  $A = \text{card}(m \times n)$ .

Интерфейсный блок служит для обмена данными и загрузки программы обработки данных в соответствующую память команд. Блок управления осуществляет инициализацию выполнения команд логической обработки данных и синхронизирует функционирование всех компонентов мультипроцессора. Блок Infrastructure IP [1] предназначен для сервисного обслуживания всех модулей, диагностирования дефектов и восстановления работоспособности компонентов и устройства в целом. Элементарный



Рис. 6. Архитектура LAMP и структура секвенсора

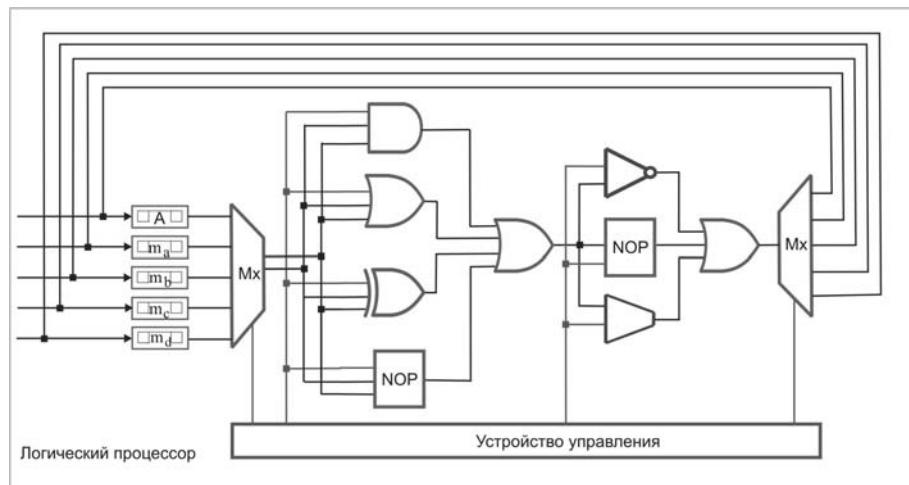


Рис. 7. Структура блока логических вычислений

логіческий асоціативний процесор, або секвенсор (см. рис. 6), входящий в склад мультипроцесора, містить: логічний процесор (LP); асоціативну (пам'ять) А-матрицю для паралельного виконання базових операцій; блок векторів  $m$ , призначений для паралельного обслуговування рядків та стовпчиків А-матриці, а також обміну даними в процесі обчислень; пам'ять прямого доступу (СМ), зберігаючу команди програми обробки інформації; автомат (CU) управління виконанням логіческих операцій; інтерфейс (I) зв'язку секвенсора з іншими елементами та засобами мультипроцесора.

Логічний процесор (LP) (рис. 7) виконує п'ять операцій: and, or, not, xor, slc (shift left bit crowding – уплотнення одиниць зліва з сдвигом), – які є базою для створення алгоритмів та процедур інформаційного пошуку та оцінювання розв'язків.

Модуль LP має мультиплексор на вході для вибору двох з п'яти операндів, які подаються на обраний логічний векторний операцій. Сформований результат через мультиплексор (елемент or) заноситься в один з п'яти операндів (пам'ять: вектор або матриця), який вибирається відповідним адресом.

Особливості реалізації логічного процесора зводяться до наявності трьох бінарних (and, or, xor) та двох унарних (not, slc) операцій. Останні можна присоединити до такта обробки регистрових даних путем вибору однієї з трьох операцій: not, slc, por (нет операція). Для підвищення ефективності роботи логічного пристроя вводяться два елементи з пустою операцією. Якщо, необхідно виконати лише унарну операцію, то на рівні бінарних команд слід вибирати por, що практично означає передачу даних через повторювач до другому рівню унарних операцій. Всі операції в LP – регистрові або регистрово-матричні. Останні призначенні для аналізу вектор-строк таблиці при використанні входного  $m$ -вектора як запиту для точного пошуку інформації. В блокі логіческих обчислень дозволено використовувати наступне сполучення операцій та операндів:

$$C = \begin{cases} \{m_a, m_b, m_c, m_d\} \Delta A_i; \\ \{m_a, m_b, m_c, m_d\} \Delta \{m_a, m_b, m_c, m_d\}; \\ \{\text{not}, \text{nop}, \text{slc}\} \{m_a, m_b, m_c, m_d, A_i\}. \end{cases}$$

$$\Delta = \{\text{and}, \text{or}, \text{xor}\}.$$

Реалізація всіх векторних операцій блока логіческих обчислень для одного секвенсора в среде

Verilog з наступною послесинтезною імплементацією в кристалл программуваної логіки дає результати:

Logic Block Utilization:

Number of 4 input LUTs: 400 out of 9,312 4%

Logic Distribution:

Number of occupied Slices: 200 out of 4,656 4%

Number of Slices only related logic: 200 out of 200 100 %

Total Number of 4 input LUTs: 400 out of 9,312 4%

Number of bonded IOBs: 88 out of 320 29%

Total equivalent gate count for design: 2400

Тактова частота виконання регистрових операцій в кристаллі Virtex 4, Xilinx, дорівнює 100 МГц, що значно вище аналогічних процедур на комп'ютері з частотою 1 ГГц.

## ВЫВОДЫ

Существующие программные аналоги не предлагают чисто ассоциативно-логических маршрутов поиска, распознавания и принятия решений в дискретном информационном пространстве [21, 22, 25]. Практически все они используют универсальную систему команд современного дорогостоящего процессора с математическим сопроцессором. С другой стороны, аппаратные специализированные средства логического анализа, которые могут выступать прототипами [4, 5], как правило, ориентированы на побитовую или невекторную обработку информации.

Для устранения недостатков программных аналогов и аппаратных прототипов в работе предложен новый подход векторно-логической обработки ассоциативных данных с полным исключением арифметических операций, влияющих на быстродействие и аппаратную сложность, который оказался удачно реализуемым на основе использования современной микроэлектронной аппаратуры в виде мультипроцессорной цифровой системы на кристалле.

Фактическая реализация подхода основывается на использовании новой инфраструктуры, которая включает следующие компоненты:

1. Процесс-модели анализа ассоциативных таблиц на основе использования векторных логических операций для поиска, распознавания образов, принятия и оценивания решений в векторном дискретном булевом пространстве. Модели ориентированы на достижение высокого быстродействия параллельного векторного логического анализа информации и подсчета критеріїв якості розв'язків.

2. Мультипроцессорная архітектура параллельного розв'язання ассоциативно-логических задач з мінімальним множеством векторних логіческих операцій та полним виключенням арифметических ко-

манд, что обеспечивает высокое быстродействие, минимальную стоимость и незначительное энергопотребление LAMP, имплементированного в кристалл программируемой логики.

Достоверность и практическая значимость полученных результатов подтверждается созданием инфраструктуры мультипроцессора для диагностирования и восстановления работоспособности компонентов памяти в цифровой системе на кристалле. Дальнейшие исследования направлены на разработку прототипа логического ассоциативного мультипроцессора в целях решения актуальных задач поиска, распознавания и принятия решений с помощью предложенной инфраструктуры векторного логического анализа.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Zorian, Y. Test Strategies for System-in-Package / Y. Zorian // Plenary Paper of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDT'08), Lviv, Ukraine. – Lviv, 2008.
2. Smith, L. 3D Packaging Applications, Requirements, Infrastructure and Technologies / L. Smith // Fourth Annual International Wafer-Level Packaging Conference (San Jose, California, September, 2007). – San Jose, 2007.
3. The next Step in Assembly and Packaging: System Level Integration in the package (SiP) / editors: William Chen, W. R. Bottoms, Klaus Pressel, Juergen Wolf // SiP White Paper. International Technology Roadmap for Semiconductors. – 2007. – P. 17–23.
4. А. с. №1439682. 22.07.88. Регистр сдвига / Какурина Н. Я., Хаханов В. И., Лобода В. Г., Какурина А. Н. – 4 с.
5. Бондаренко, М. Ф. О мозгоподобных ЭВМ / М. Ф. Бондаренко, З. В. Дударь, И. А. Ефимова, В. А. Лещинский, С. Ю. Шабанов-Кушнаренко // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – № 2. – С. 89–105.
6. Бондаренко, М. Ф. Об алгебре предикатов / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко // Бионика интеллекта. – 2004. – № 1. – С. 15–26.
7. Бондаренко, М. Ф. Теория интеллекта : учебник / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко. – Харьков : СМИТ, 2006. – 592 с.
8. Бондаренко, М. Ф. Модели языка / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнаренко // Бионика интеллекта. – 2004. – № 1. – С. 27–37.
9. Акритас, А. Основы компьютерной алгебры с приложениями : пер. с англ. / А. Акритас.– М. : Мир, 1994. – 544 с.
10. Гилл, Ф. Практическая оптимизация. / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М. : Мир, 1985. – 509 с.
11. Аттетков, А. В. Методы оптимизации / А. В. Аттетков, С. В. Галкин, В. С. Зарубин.– М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 440 с.
12. Дегтярев, Ю. И. Методы оптимизации : учебное пособие для вузов / Ю. И. Дегтярев. – М. : Сов. радио, 1980. – 270 с.
13. Bergeron, J. Writing Testbenches Using SystemVerilog / J. Bergeron // Springer Science and Business Media, 2006. – 414 p.
14. Abramovici M. Digital System Testing and Testable Design / M. Abramovici, M.A. Breuer and A.D. Friedman.– Comp. Sc. Press, 1998. – 652 p.
15. Densmore, D. A Platform-Based taxonomy for ESL Design / Douglas Densmore, Roberto Passerone, Alberto Sangiovanni-Vincentelli // Design & Test of computers. – 2006. – P. 359–373.
16. Хаханов, В. И. Проектирование и тестирование цифровых систем на кристаллах / В. И. Хаханов, Е. И. Литвинова, О. А. Гузь. – Харьков : ХНУРЭ, 2009.– 484 с.
17. Hahanov, V. I. SIGETEST – Test generation and fault simulation for digital design / V.I. Hahanov, D. M. Gorbulnov, Y. V. Miroshnichenko, O. V. Melnikova, V. I. Obrizan, E. A. Kamenka // Proc. of Conf. «Modern SoC Design Technology based on PLD». – Kharkov, 2003. – P. 50–53.
18. Автоматизация диагностирования электронных устройств/ Ю. В. Малышенко и др. ; под ред. В. П. Чипулиса. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
19. Хаханов, В. И. Проектирование и верификация цифровых систем на кристаллах / В. И. Хаханов, И. В. Хаханова, Е. И. Литвинова, О. А. Гузь. – Харьков : Новое слово, 2010. – 528 с.
20. Cohen, A. A. Addressing architecture for Brain-like Massively Parallel Computers / A.A. Cohen // Euromicro Symposium on Digital System Design (DSD'04). – 2004. – P. 594–597.
21. Липаев, В. В. Программная инженерия. Методологические основы : учебник / В. В. Липаев.– М. : Тeis, 2006. – 608 с.
22. Трахтенгерц, Э. А. Компьютерные методы реализации экономических и информационных управлеченческих решений / Э. А. Трахтенгерц.– М. : СИНТЕГ, 2009. – 396 с.
23. Кузнецов, О. П. О моделировании быстрых интеллектуальных процессов обыденного мышления / О.П. Кузнецов // Интеллектуальные системы. – 1997. – Т. 2, вып. 1–4. – Стр. 52–57.
24. Кузнецов, О. П. Быстрые процессы мозга и обработка образов / О. П. Кузнецов // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – № 2.
25. Васильев, С. Н. Интеллектуальное управление динамическими системами / С. Н. Васильев, А. К. Жерлов, Е. А. Федосов, Б. Е. Федунов.– М. : Физ.-мат. лит-ра, 2000. – 352 с.

Надійшла 18.06.2010

Хаханов В. И., Чумаченко С. В., Литвинова Е. И., Гуз О. А.  
МУЛЬТИПРОЦЕСОР ДЛЯ АНАЛІЗУ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ

Запропоновано архітектуру швидкодіючого мультипроцесора паралельного аналізу інформації, представленаої у вигляді аналітичних, графових і табличних структур асоціативних відношень, для пошуку, розпізнавання та прийняття рішень у  $n$ -вимірному векторному дискретному просторі. Розглядаються векторно-логічні процес-моделі актуальних прикладних задач, якість рішення яких оцінюється введеною інтегральною неарифметичною метрикою взаємодії булевих векторів.

**Ключові слова:** мультипроцесор, аналіз інформації, логічне асоціативне відношення, процес-модель.

Hahanov V. I., Chumachenko S. V., Litvinova E. I., Guz O. A.  
MULTIPROCESSOR FOR INFORMATION SPACE ANALYZING

Novel process-models for analyzing information in the tabular form based on using vector logical operations to solve the problems of search, diagnosis, pattern recognition and decision-making in the vector discrete Boolean space are proposed. The models are focused on realization of high-performance vector concurrent logical analysis of information that in the limit completely excludes the use of arithmetic operations.

**Key words:** multiprocessor, information analyzing, logical associative relationship, process-model.

# ТЕОРІЯ І МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

## ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

### THEORY AND METHODS OF AUTOMATIC CONTROL

УДК 62-55:681.515

Гостев В. И.

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

#### ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ИДЕНТИЧНЫХ ГАУССОВЫХ ФУНКЦИЯХ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Получены аналитические выражения для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при идентичных гауссовых функциях принадлежности, изложены вопросы проектирования нечеткого регулятора и предложена практическая схема нечеткого регулятора.

**Ключевые слова:** автоматическое управление, нечеткий регулятор, MATLAB, нечеткая логика.

#### ВВЕДЕНИЕ

Метод проектирования нечетких регуляторов на основе пакета нечеткой логики системы MATLAB достаточно подробно изложен, например, в работах [1, 2]. В работе [3] предложен новый метод проектирования одного класса нечетких регуляторов, основанный на полученных аналитических выражениях для управляющих воздействий на выходе нечеткого регулятора при различных функциях принадлежности с двумя термами. Представлена функциональная схема нечеткого регулятора, на базе которой возможна реализация нечетких регуляторов программным или аппаратным способом. При проектировании нечетких регуляторов предложенным методом нет необходимости в использовании пакета нечеткой логики системы MATLAB, и процедура проектирования нечетких регуляторов упрощается. Нечеткий регулятор представляется в виде по-

следовательного соединения трех блоков (см. рис. 1): 1 – формирователя величин  $A(t)$  и  $B(t)$ , 2 – блока сравнения величин  $A(t)$  и  $B(t)$  и расчета  $u_c$  ( $u_c$  – не-нормированное управляющее воздействие на выходе нечеткого регулятора на оси универсального множества  $U = [0, 1]$ ), 3 – блока нормировки выходной величины.

Ниже изложено проектирование нечеткого регулятора при идентичных гауссовых функциях принадлежности.

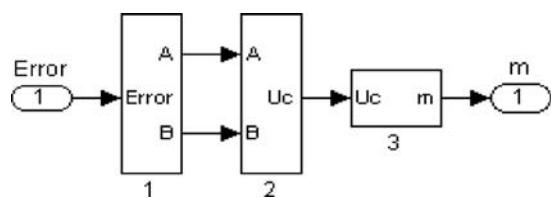


Рис. 1

## АНАЛІТИЧЕСКІ ВИРАЖЕННЯ ДЛЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВІЙ НА ВЫХОДЕ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ІДЕНТИЧНИХ ГАУССОВЫХ ФУНКЦІЯХ ПРИНАДЛЕЖНОСТІ

Рассмотрим нечеткий регулятор, на вход которого поступают ошибка системы  $\theta$ , первая производная ошибки  $\dot{\theta}$  и вторая производная ошибки  $\ddot{\theta}$ . Нечеткий регулятор практически реализуется на микроЭВМ (или микропроцессоре) и работает в дискретном режиме, поэтому на выходе регулятора включается аналогоцифровой преобразователь АЦП, а на выходе – цифроаналоговый преобразователь ЦАП. АЦП квантует непрерывную ошибку системы управления  $\theta(t) = u(t) - x(t)$  с шагом квантования  $h$ . В качестве первой и второй производных от ошибки вычисляем первую и вторую разность по формулам

$$\left. \begin{aligned} \dot{\theta}(k) &= [\theta(k) - \theta(k-1)]/h; \\ \ddot{\theta}(k) &= [\dot{\theta}(k) - \dot{\theta}(k-1)]/h = \\ &= [\theta(k) - 2\theta(k-1) + \theta(k-2)]/h^2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\theta(k)$  – квантованная ошибка на выходе АЦП. ЦАП представляет собой, как правило, фиксатор нулевого порядка с передаточной функцией  $H(s) = (1 - e^{-hs})/s$ .

Пусть на универсальном множестве  $U = [0, 1]$  заданы два нечетких подмножества, функции принадлежностей (ФП) которых для каждой лингвистической величины определяются по формулам (см. рис. 2):

$$\begin{aligned} \mu_1(u) &= \exp\left(-\frac{u^2}{2c^2}\right), \quad u \in [0, 1]; \\ \mu_2(u) &= \exp\left[-\frac{(u-1)^2}{2c^2}\right], \quad u \in [0, 1]. \end{aligned}$$

При поступлении на нечеткий регулятор в какой-то фиксированный момент времени значений входных переменных  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$  и  $\ddot{\theta}^*$  с шагом квантования  $h$  осуществляется пересчет входных переменных в пе-

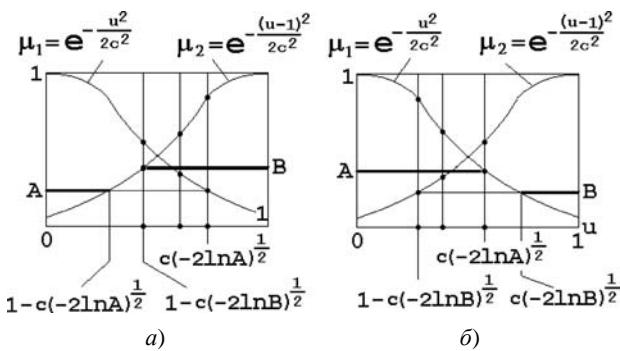


Рис. 2

ременные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  на универсальном множестве  $U = [0, 1]$  и расчет значений ФП для этих переменных (см. рис. 2). 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 сигналов (параметров нечеткого регулятора) принимаем симметричными:

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

Тогда формулы для нормировки (пересчета) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} u_1^* &= (\theta^* + A_m)/(2A_m); \\ u_2^* &= (\dot{\theta}^* + B_m)/(2B_m); \\ u_3^* &= (\ddot{\theta}^* + C_m)/(2C_m). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Лингвистическое правило управления нечеткого регулятора формулируется в виде

$$\text{Если } (\theta^* = a_1^j) \text{ и } (\dot{\theta}^* = a_2^j) \text{ и } (\ddot{\theta}^* = a_3^j), \text{ то } (m^* = a_c^j), \quad j = \overline{1, 2}, \quad (3)$$

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,  $j = \overline{1, 2}$ ;  $a_c^j$  – лингвистические оценки управляющего воздействия на объект, выбираемые из терм-множества переменной  $m$ . Лингвистические оценки выбираются из терм-множеств лингвистических переменных  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$ ,  $\ddot{\theta}^*$  и  $m^*$ :

$$a_c^j \in \{\text{отрицательная (1), положительная (2)}\}.$$

В соответствии с лингвистическими правилами управления функция принадлежности управляющего воздействия  $\mu_c^1(u)$  нечеткому множеству «отрицательный» ограничена сверху значением

$$A = \min[\mu_1(u_1^*), \mu_1(u_2^*), \mu_1(u_3^*)]; \quad (4)$$

функция принадлежности управляющего воздействия  $\mu_c^2(u)$  нечеткому множеству «положительный» ограничена сверху значением

$$B = \min[\mu_2(u_1^*), \mu_2(u_2^*), \mu_2(u_3^*)]. \quad (5)$$

Результирующая функция принадлежности для управляющего воздействия получается формированием максимума

$$\mu_c(u) = \max[\mu_c^1(u), \mu_c^2(u)]. \quad (6)$$

Для определения конкретного значения управляющего воздействия  $m^*$  формируется «результатирующая фигура», ограниченная результатирующей ФП, и производится поиск абсциссы «центра тяжести результатирующей фигуры»  $u_c$ .

Какие бы значения ни принимали переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  на универсальном множестве  $U = [0, 1]$  в зависимости от соотношений величин  $A$  и  $B$  «результатирующая фигура» может принимать только две конфигурации: при  $A \leq B$  первая конфигурация показана

$$u_c = \frac{\frac{A}{2} - cA\sqrt{-2\ln A} + cB\sqrt{-2\ln B} + c\sqrt{\frac{\pi}{2}}[\operatorname{erf}(\sqrt{-\ln A}) - \operatorname{erf}(\sqrt{-\ln B})] - c^2(B - A + A\ln A - B\ln B)}{A - cA\sqrt{-2\ln A} + cB\sqrt{-2\ln B} + c\sqrt{\frac{\pi}{2}}[\operatorname{erf}(\sqrt{-\ln A}) - \operatorname{erf}(\sqrt{-\ln B})]} \text{ при } A \leq B. \quad (8)$$

Абсцисса «центра тяжести результатирующей фигуры» при  $A \geq B$  определяется по формуле

$$u_c = \frac{\frac{B}{2} - c^2(B - A + A\ln A - B\ln B)}{B + cA\sqrt{-2\ln A} - cB\sqrt{-2\ln B} + c\sqrt{\frac{\pi}{2}}[\operatorname{erf}(\sqrt{-\ln B}) - \operatorname{erf}(\sqrt{-\ln A})]} \text{ при } A \geq B. \quad (9)$$

Полученное значение  $u_c$  затем преобразуется в значение управляющего воздействия на объект управления (при симметричном диапазоне изменения выходного сигнала  $D_m = m_{\max} = -m_{\min}$ ):

$$m^* = m_{\min}(1 - 2u_c) = 2D_m u_c - D_m. \quad (10)$$

В качестве примера приведем следующие результаты расчетов.

При  $A = 0,02$ ,  $B = 0,4$ ,  $c = 0,3 \Rightarrow u_c = 0,695$ . При  $A = 0,4$ ,  $B = 0,02$ ,  $c = 0,3 \Rightarrow u_c = 0,305$ .

### ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА С ИДЕНТИЧНЫМИ ГАУССОВЫМИ ФУНКЦИЯМИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

Выполненная с использованием интерактивной системы MATLAB принципиальная схема нечеткого регулятора с идентичными гауссовыми функциями принадлежности представлена на рис. 3.

Формирователь величин  $A(t)$  и  $B(t)$  реализован на основе формул (1), (2), (4) и (5). Элементами ограничения (Saturation) моделируем универсальное множество  $U = [0, 1]$ , на которое поступают переменные  $u_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . В блоках Fcn, Fcn1, Fcn2 записываем аналитические выражения для функций принадлежности  $\mu_1(u)$ , а в блоках Fcn3, Fcn4, Fcn5 – аналитические выражения для функций принадлежности  $\mu_2(u)$ . На выходе блоков Fcn, Fcn1, Fcn2 получаем переменные  $\mu_2(u_i)$  (соответственно  $\mu_1(u_1)$ ,  $\mu_1(u_2)$ ,

на рис. 2,  $a$ ; при  $A \geq B$  вторая конфигурация показана на рис. 2,  $b$ .

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

$$u_c = \int_0^1 u \mu(u) du / \int_0^1 \mu(u) du. \quad (7)$$

Абсцисса «центра тяжести результатирующей фигуры» при  $A \leq B$  определяется по формуле

$\mu_1(u_3))$ , а на выходе блоков Fcn3, Fcn4, Fcn5 получаем переменные  $\mu_2(u_i)$  (соответственно  $\mu_2(u_1)$ ,  $\mu_2(u_2)$ ,  $\mu_2(u_3)$ ).

Блок сравнения величин  $A(t)$  и  $B(t)$  и расчета  $u_c$  (отдельно показан на рис. 4) реализован на основе формул (8) и (9). На выходе верхнего сумматора формируется числитель, а на выходе нижнего сумматора формируется знаменатель выражения (8) и на выходе делителя Product4 формируется величина  $u_c$  при  $A \leq B$ . Аналогичным способом на выходе верхнего сумматора формируется числитель, а на выходе нижнего сумматора формируется знаменатель выражения (9) и на выходе делителя Product5 формируется величина  $u_c$  при  $A \geq B$ . Переключатель Switch замыкает верхний контакт при условии  $A \leq B$  (когда на среднем контакте сигнал положительный, в блоке Switch параметр Threshold = 0,000001). При условии  $A \geq B$ , когда на среднем контакте переключателя Switch сигнал отрицательный, переключатель замыкает нижний контакт. На выходе переключателя Switch получаем значение  $u_c$ .

В средстве моделирования и исследования систем управления с обратной связью Simulink функция erf в блоке User-Defined Functions моделируется не блоком Fcn, а блоком MATLAB Fcn, поэтому блок сравнения величин  $A$  и  $B$  и расчета  $u_c$ , показанный на рис. 3, представлен моделью с блоками MATLAB Fcn1 – MATLAB Fcn8, в которых записа-

ны те же выражения, что и в соответствующих блоках на рис. 4.

Функции принадлежности в формирователе величин  $A(t)$  и  $B(t)$  называются *входными*, а в блоке сравнения

величин  $A(t)$  и  $B(t)$  и расчета  $u_c$  называются *выходными*. Для данного регулятора эти функции идентичны.

Блок нормировки выходной переменной реализован на основе формулы (10).

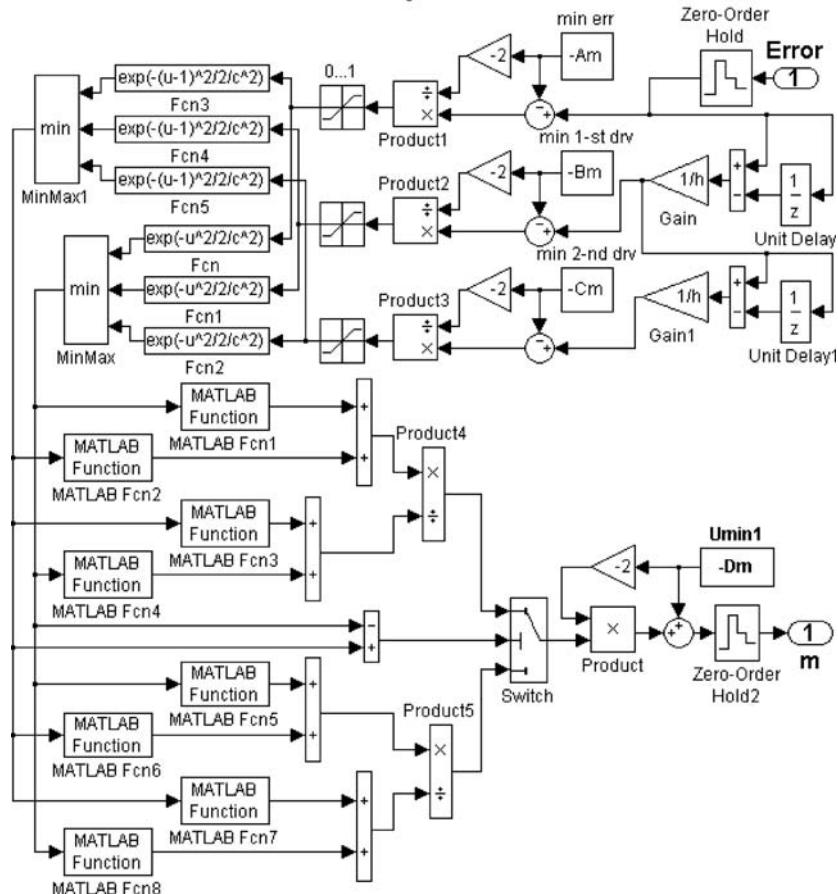


Рис. 3

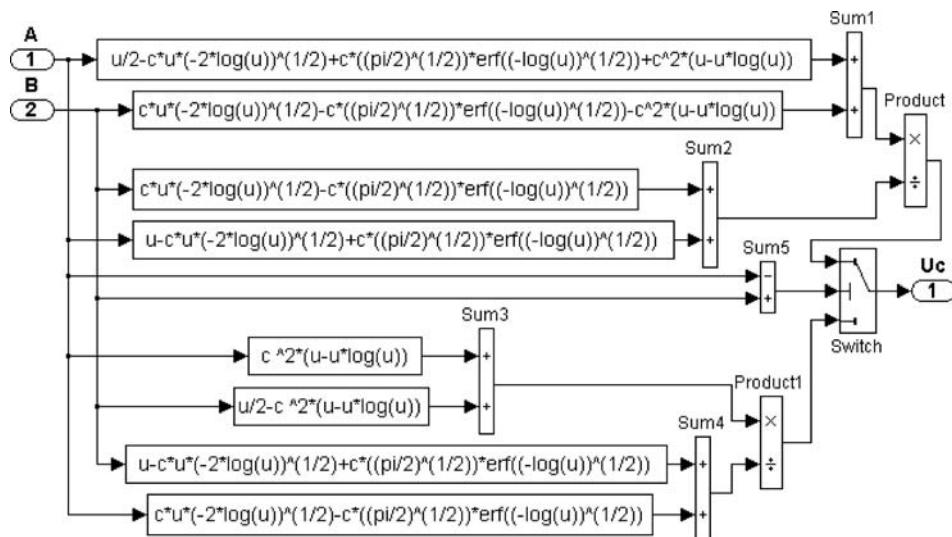


Рис. 4

## ЛОГІКА РАБОТЫ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА

Логика работы нечеткого регулятора (см. рис. 3) для фиксированного момента времени отображена на рис. 5.

В формирователе величин  $A(t)$  и  $B(t)$  на входе нечеткого регулятора ошибка системы ( $\text{Errgor}$ )  $\theta^*$  квантуется АЦП (Zero-Older Hold), вычисляются первая (1-st drv)  $\dot{\theta}^*$  и вторая (2-nd drv)  $\ddot{\theta}^*$  разности от ошибки с шагом квантования  $h$ , и значения входных переменных  $\theta^*$ ,  $\dot{\theta}^*$  и  $\ddot{\theta}^*$  пересчитываются в переменные  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  по формулам (2). Производится расчет значений *входных* функций принадлежности (см. рис. 5, а, б)

$$\mu_1(u) = \exp\left(-\frac{u^2}{2c^2}\right), u \in [0, 1];$$

$$\mu_2(u) = \exp\left[-\frac{(u-1)^2}{2c^2}\right], u \in [0, 1].$$

для переменных  $u_1^*$ ,  $u_2^*$ ,  $u_3^*$  и на выходе блоков Min-Max и MinMax1 на основе алгоритма Мамдани определяются соответственно величины  $A$  и  $B$  по формулам (4), (5).

Величины  $A$  и  $B$  поступают на блок сравнения величин  $A(t)$  и  $B(t)$  и расчета  $u_c$ , в котором производится расчет ненормированного выхода регулятора по фор-

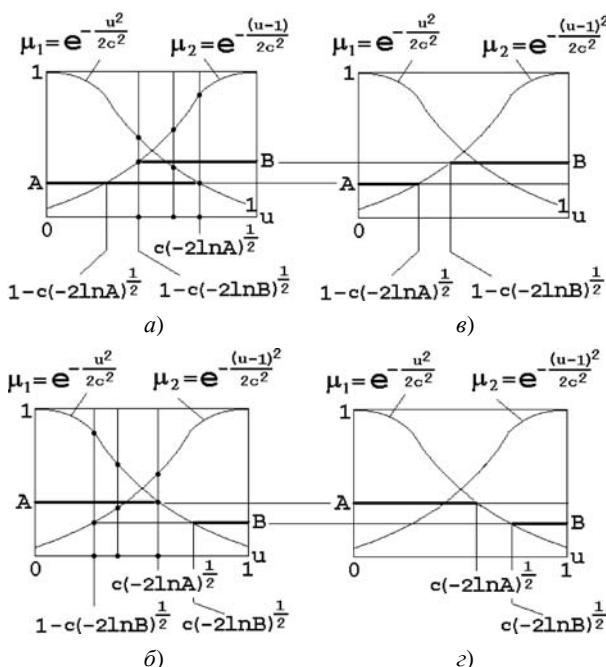


Рис. 5

мулам (8) и (9) для *выходных* функций принадлежности, которые идентичны *входным* (см. рис. 5, в, г). Далее полученное значение  $u_c$  в блоке нормировки выходной переменной пересчитывается в выходное напряжение регулятора по формуле (10).

В динамике на выходе блоков Product, Product1, Product2 структурной схемы формирователя величин  $A(t)$  и  $B(t)$  получаем переменные  $u_i$  (соответственно  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ ). Выражения (4) и (5) на каждом шаге  $h$  вычисляются в блоках MinMax и MinMax1, на выходе которых получаются значения переменных  $A(t)$  и  $B(t)$ , и в блоке сравнения по формулам (8) и (9) вычисляются значения переменной  $u_c(t)$ , которые преобразуются блоком нормировки выходной переменной в значение управляющего воздействия на объект управления  $m(t)$ .

В схеме формирователя величин  $A(t)$  и  $B(t)$  при настройке нечеткого регулятора перестраиваются граничные значения диапазонов  $A_m = \theta_{\max} = -\theta_{\min}$ ,  $B_m = \dot{\theta}_{\max} = -\dot{\theta}_{\min}$ ,  $C_m = \ddot{\theta}_{\max} = -\ddot{\theta}_{\min}$ . В блоке нормировки выходной переменной перестраиваются граничные значения диапазона  $D_m = m_{\max} = -m_{\min}$ .

## ВЫВОД

Изложенная теория и практическая схема нечеткого регулятора с идентичными гауссовыми функциями принадлежности дают возможность использовать такой регулятор в различных системах автоматического управления и путем настройки параметров регулятора добиваться высокого качества систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов, В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник / Дьяконов В., Круглов В. – СПб. : Питер, 2001. – 480 с.
2. Гостев, В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / Гостев В. И. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708 с.
3. Гостев, В. И. Новый метод проектирования одного класса нечетких цифровых регуляторов / Гостев В. И. // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 6. – С. 73–84.

Надійшла 16.09.2010

Гостев В. И.

ПРОЕКТУВАННЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ ІДЕНТИЧНИХ ГАУССОВИХ ФУНКІЯХ ПРИНАЛЕЖНОСТІ

Отримано аналітичні вирази для керуючих впливів на виході нечіткого регулятора при ідентичних гауссовых функціях принадлежності, викладено питання проектування нечіткого регулятора та запропоновано практичну схему нечіткого регулятора.

**Ключові слова:** автоматичне керування, нечіткий регулятор, MATLAB, нечітка логіка.

Gostev V. I.

## DESIGNING OF A FUZZY CONTROLLER AT IDENTICAL GAUSS MEMBERSHIP FUNCTIONS

Analytical expressions for control actions at the fuzzy controller output at identical gauss membership functions ha-

ve been obtained, fuzzy controller designing procedure is described, and the practical scheme of a fuzzy controller is proposed.

**Key words:** automatic control, fuzzy controller, MATLAB, fuzzy logic.

УДК 62-50

Кудин В. Ф.<sup>1</sup>, Колесниченко С. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, старший преподаватель Национального технического университета Украины  
«Киевский политехнический институт»

# СУБОПТИМАЛЬНОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО КРИТЕРИЮ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА БЕЛЛМАНА – ЛЯПУНОВА

Рассматривается общетеоретическая задача синтеза субоптимального нелинейного управления на примере двухмассовой электромеханической системы управления крановым механизмом передвижения с учетом гашения колебаний транспортного груза. Задача решается на базе метода Беллмана – Ляпунова с использованием концепции «инвариантного погружения» по критерию быстродействия. Проведено исследование динамики замкнутой системы с синтезированным субоптимальным регулятором.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, аналитическое конструирование регуляторов, критерий быстродействия, нелинейное управление, метод Беллмана – Ляпунова.

## ВВЕДЕНИЕ

Задачи синтеза алгоритмов управления, оптимальных по быстродействию, остаются актуальными для проектирования автоматических систем управления различными транспортными механизмами производственных цехов, следящих систем различного назначения, систем управления колебаниями, манипуляторами и др. [1–4]. Известно, что в практике проектирования систем максимального быстродействия синтез алгоритмов выполняется, как правило, методом фазовой плоскости. Возможности применения этого метода ограничены объектами третьего порядка, передаточные функции которых не имеют комплексно-сопряженных полюсов, а фазовые траектории являются монотонными кривыми.

В настоящее время уделяется большое внимание проблеме синтеза оптимального управления двухмассовой электромеханической системой (ЭМС) механизма перемещения крана с гашением колебаний подвешенного груза [1]. При этом рассматривается довольно широкий спектр математических моделей управляемой ЭМС, которая учитывает нелинейность объекта управления и электромагнитную инерционность электропривода. Математические модели подобных управляемых систем наряду с апериодическими звенями зачастую содержат и колебательные. Синтез оптимальных по быстродействию управлений такими системами, как показывают выполненные в

[5, 6] исследования, представляют трудную, возможно, даже неразрешимую задачу.

В целом исследуемая модель ЭМС является нелинейной по переменным состояния и управляющему воздействию. Кроме того, минимизируемые функционалы, используемые при построении оптимальных двухмассовых ЭМС, являются, обычно, неквадратичными, что усложняет процедуру аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР).

В данной статье предлагается приближенное решение нелинейной задачи АКОР по быстродействию на основе метода Беллмана – Ляпунова в сочетании с концепцией «инвариантного погружения» [7–10]. Метод обладает вычислительной эффективностью и легко распространяется на нелинейные системы высокой размерности.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задана математическая модель колебаний подвешенного груза в виде консервативного звена с электроприводом, создающим динамический момент (рис. 1) [3].

На рис. 1 используются следующие обозначения:  $m_1$  – масса тележки (моста);  $m_2$  – масса груза;  $\varphi$  – угол отклонения груза от вертикали;  $F$  – динамическое усилие, приложенное к тележке (мосту);  $M$  – динамический момент электропривода;  $r$  – радиус приведения.

© Кудин В. Ф., Колесниченко С. П., 2011

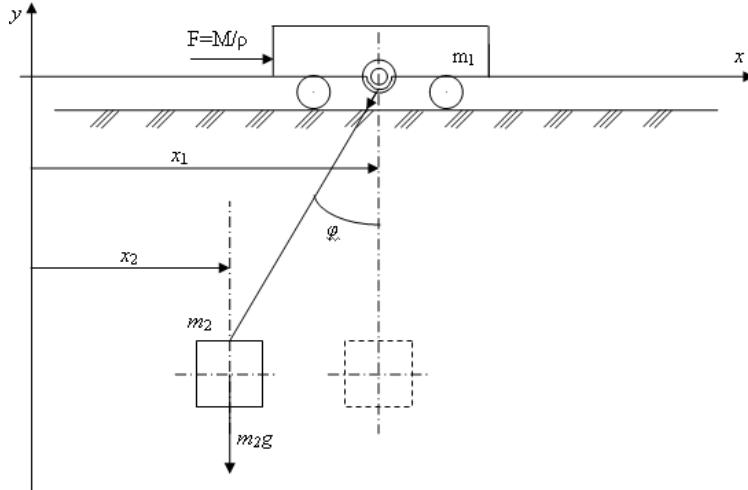


Рис. 1. Подъемно-транспортный механизм с маятниковой подвеской груза

При малых отклонениях груза от вертикали движение двухмассовой системы «тележка – груз» описывается системой линейных уравнений [3]

$$\begin{aligned} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \omega_0^2\varphi &= b_1F, \\ \frac{dF}{dt} &= -\frac{1}{T_a}F + b_2u, \quad [u] \leq \bar{u}, \end{aligned}$$

где  $\omega_0 = 1,33 \text{ с}^{-1}$  – частота собственных колебаний системы «тележка – груз»;  $T_a = 0,05 \text{ с}$  – электромагнитная постоянная момента электропривода;  $b_1 = 6,54 \times 10^{-4}$ ,  $b_2 = 7,6 \times 10^4$  – коэффициенты;  $u$  – управление.

Запишем заданную систему дифференциальных уравнений в форме Коши:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 & x_1 &= \varphi \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0^2x_1 + b_1x_3, \text{ здесь } x_2 = \dot{\varphi} & & \\ \dot{x}_3 &= -a_{31}x_3 + b_2u & x_3 &= F, \quad u = f(\sigma) = \sigma^{1/5}. \end{aligned} \quad (1)$$

*Примечание.* Учет ограничения на управление  $u$  с помощью некоторой функции  $u = f(\sigma)$  был впервые предложен А. Miele [11]. Здесь роль управляющего воздействия переходит уже к  $\sigma$ , на которое не наложено ограничение. Поэтому формировать подынтегральную функцию  $w(\sigma)$ , которая определяет вид  $u = f(\sigma)$ , гораздо легче. При этом зависимость вида  $u = \sqrt[n]{\sigma}$  ( $n = 2, 3, 4, \dots$ ) позволяет при достаточно больших  $n$  аппроксимировать релейную характеристику с большой точностью на классе гладких функций.

Ставится задача отыскания управления  $\sigma = \gamma(x_1x_2x_3)$ , обеспечивающего переход изображающей точки пространства состояний в начало координат

при произвольных начальных условиях, на решениях системы (1), исходя из минимизации функционала вида

$$\min_{\sigma} J = \int_0^{\infty} (W(x_1, x_2, x_3) + c\sigma^2) dt. \quad (2)$$

Рассмотрим сначала процедуру АКОР, учитывая ограничение на управление, используя нелинейное преобразование А. Miele, не уточняя вид функции  $W(x_1, x_2, x_3)$ .

Метод динамического программирования Беллмана дает следующее функциональное уравнение:

$$\begin{aligned} \min_{\sigma} \left[ W(x_1, x_2, x_3) + c\sigma^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \right. \\ \left. + \frac{\partial V}{\partial x_2}(-\omega_0^2x_1 + b_1x_3) + \right. \\ \left. + \frac{\partial V}{\partial x_3}(-a_{31}x_3 + b_2\sigma^{1/5}) \right] = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

После дифференцирования получаем

$$\begin{aligned} 2c\sigma + \frac{b}{5}\frac{\partial V}{\partial x_3}\sigma^{-4/5} &= 0; \quad \sigma^{6/5} + \frac{b_2}{10c}\frac{\partial V}{\partial x_3} = 0; \\ \sigma &= -\left(\frac{b}{10c}\frac{\partial V}{\partial x_3}\right)^{5/9}; \quad u = -\sqrt[9]{\frac{b_2}{10c}\frac{\partial V}{\partial x_3}}. \end{aligned}$$

Исключая  $\sigma$  из функционального уравнения (3), получаем уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана (ГЯБ) вида

$$\begin{aligned} W(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2}(-\omega_0^2x_1 + b_1x_3) + \\ + \frac{\partial V}{\partial x_3}(-a_{31}x_3) = 9c\left(\frac{b_2}{10c}\frac{\partial V}{\partial x_3}\right)^{10/9}. \end{aligned} \quad (4)$$

Разлагая правую часть в цепную дробь [12], получаем

$$W(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2}(-\omega_0^2x_1 + b_1x_3) - \frac{\partial V}{\partial x_3}a_{31}x_3 = \frac{\mu_{11}\sigma_1^2 + \mu_{12}\sigma_1^4 + \mu_{13}\sigma_1^6}{1 + \mu_{21}\sigma_1^2 + \mu_{22}\sigma_1^4}, \quad (5)$$

где  $\sigma_1 = \frac{b_2}{6c} \frac{\partial V}{\partial x_3}$ ,  $\mu_{11}, \mu_{12}, \dots$  – постоянные коэффициенты разложения.

Приближенное решение этого уравнения находится в виде последовательности степенных форм от переменных состояния.

$$V(x) = v^2(x) + v^4(x) + v^6(x) \dots \quad (6)$$

Здесь  $v^2(x)$  – квадратичная форма от переменных  $x_1, x_2, x_3$ ,  $v^4(x)$  – форма четвертой степени и т. д. Параметры квадратичной формы определяются системой уравнений Риккати, а параметры четвертичной формы – системой линейных алгебраических уравнений.

В точках позиционирования тележки перемещаемый груз занимает произвольное положение. Возникает типичная задача АКОР по отработке начальных условий, исходя из условия быстрейшего затухания переходного процесса [или критерия  $\min_{\sigma} \max_t x(t)$ ].

В этом случае критерий оптимальности и подынтегральные функции приобретают следующий вид:

$$\min J = \int_0^T [W(x_1, x_2, x_3) + cu^2] dt, \quad (7)$$

где  $W_1(x_1, x_2, x_3) = 1$ .

Уравнение ГЯБ для функционала быстродействия с учетом ограничения на управление будет иметь следующий вид при  $u = f(\sigma) = \sigma^{1/5}$ :

$$1 + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2}(-\omega_0^2x_1 + b_1x_3) - \frac{\partial V}{\partial x_3}ax_3 = 9c \left( \frac{b_2}{10c} \frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^{10/9}. \quad (8)$$

По утверждению М. Атанса, П. Фалба, решение задачи синтеза по критерию быстродействия на базе метода динамического программирования, которое сводится к решению уравнения ГЯБ, практически невозможно.

Один из возможных путей – переход к аналитическому выражению подынтегральной функции критерия быстродействия в функции переменных состояния.

Подынтегральную функцию  $W_1(x_1, x_2, x_3) = 1$  можно аппроксимировать соотношением  $W_1(x_1, x_2, x_3) =$

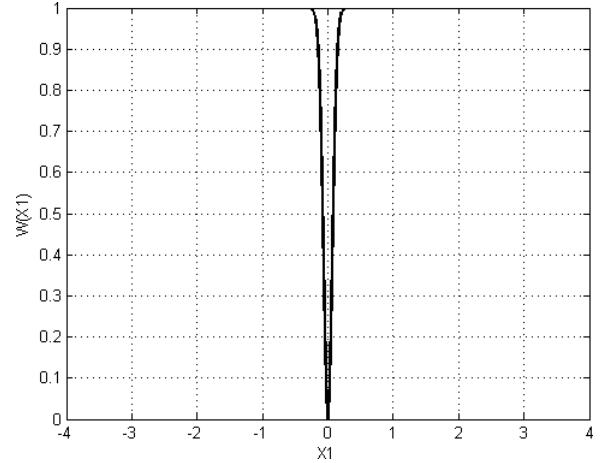


Рис. 2. Аппроксимированная подынтегральная функция  $W_1(x_1)$

$= 1 \approx 1 - e^{-\alpha x_1^2}$ . Данная функция при  $a = 100$  представлена на рис. 2.

Аппроксимированная подынтегральная функция уже является аналитической. Поэтому решение задачи синтеза (уравнение ГЯБ) можно искать в виде многомерного степенного ряда. Тогда для системы дифференциальных уравнений (1) и функционала (7) уравнение ГЯБ будет иметь вид

$$\begin{aligned} & \frac{(\alpha x)^2 + 1/2(\alpha x)^4 + 1/6(\alpha x)^6}{1 + (\alpha x)^2 + 1/2(\alpha x)^4 + 1/6(\alpha x)^6} + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \\ & + \frac{\partial V}{\partial x_2}(-\omega_0^2x_1 + b_1x_3) - \frac{\partial V}{\partial x_3}ax_3 = \\ & = 9c \left( \frac{b_2}{10c} \frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^{10/9}. \end{aligned} \quad (9)$$

После разложения правой части уравнения в цепную дробь решение уравнения ГЯБ ищется в виде последовательности степенных форм. Однако процедура решения уравнения ГЯБ достаточно сложна в вычислительном отношении. Поэтому используем процедуру синтеза субоптимального управления на базе метода Беллмана – Ляпунова в сочетании с принципом «инвариантного погружения» [6–9].

## 2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ АКОР

Преобразуем подынтегральную функцию минимизируемого функционала

$$W_1(x_1x_2) = 1 = \alpha(x_1)x_1^2,$$

где  $\alpha(x_1) = \frac{1}{x_1^2}$  – весовая константа.

В итоге получаем критерий оптимальности вида

$$\min_{\sigma} I = \int_0^{\infty} (\alpha(x_1)x_1^2 + c\sigma^2) dt, \quad (10)$$

т. е. неквадратичный функционал сведен к квадратичному функционалу, весовая константа которого  $\alpha(x_1)$  является функцией переменной  $x_1$ . Тогда для системы дифференциальных уравнений (1) и функционала (10) получаем уравнения ГЯБ в частных производных для фиксированной области фазового пространства.

$$\begin{aligned} \alpha(x_1)x_1^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1}x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2}(-\omega_0^2x_1 + b_1x_3) - \\ - \frac{\partial V}{\partial x_3}ax_3 = \frac{q^2(a)b_2^2}{4c}\left(\frac{\partial V}{\partial x_3}\right)^2. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь  $q(a)$  есть постоянная величина для фиксированной области фазового пространства.

Трансформация уравнения ГЯБ (8) в (11) обусловлена тем, что управляющее воздействие есть  $u = f(\sigma)$ , где  $f(\sigma)$  – функция нелинейного преобразования A. Miele, представленная в виде  $u = q(a)\sigma = \frac{f(\sigma)}{\sigma}\sigma$ . Здесь  $q(a)$  – коэффициент гармонической линеаризации для затухающих переходных процессов [13, 14]. Этот коэффициент является приближенным эквивалентом коэффициента линеаризации по методу секущей, поскольку  $q(a)$  также можно получить методом среднеквадратичного приближения [15].

Система уравнений Риккетти имеет вид

$$\begin{aligned} \alpha(x_1) - 2k_{21}\omega_0^2 &= \frac{q^2(a)b_2^2}{c}k_{31}^2, \\ 2k_{12} &= \frac{q^2(a)b_2^2}{c}k_{23}^2, \\ 2b_1k_{13} &= \frac{q^2(a)b_2^2}{c}k_{33}^2, \\ k_{13} - b_1k_{12} - a_{31}k_{32} &= \frac{q^2(a)b_2^2}{c}k_{31}k_{32}, \\ k_{13} - bk_{12} - a_{31}k_{32} &= \frac{q^2(a)b_2^2}{c}k_{32}k_{33}, \\ k_{12}b_1 - \omega_0^2k_{23} - a_{31}k_{31} &= \frac{q^2(a)b_2^2}{c}k_{13}k_{33}. \end{aligned} \quad (12)$$

Далее осуществляем решение задачи АКОР «в малом» при  $\alpha(x_1) = \alpha_1(x_1) = 400$ ,  $q(a) = q_1(a) = 6$ ,  $c = c_1 = 1$ .

На этом этапе получаем закон управления

$$\begin{aligned} \sigma_1(x) &= -\frac{q_1(x)}{c_1}(k_{31}x_1 + k_{32}x_2 + k_{33}x_3) = \\ &= -(k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3) = \\ &= -(19,75x_1 + 2,382x_2 + 0,00x_3). \end{aligned}$$

На втором этапе получаем решение задачи АКОР «в большом» при  $\alpha(x_1) = \alpha_2(x_1) = 4$ ,  $q(a) = q_2(a) = 0,8$ ,  $c = c_2 = 1/(50)^2$ :

$$\begin{aligned} \sigma_2(x) &= -\frac{q_2(x)}{c_2}(k_{31}x_1 + k_{32}x_2 + k_{33}x_3) = \\ &= -(k_1'x_1 + k_2'x_2 + k_3'x_3) = \\ &= -(98,28x_1 + 13,88x_2 + 0,000x_3). \end{aligned}$$

Таким образом, получена последовательность «мгновенных» оптимальных управлений для некоторых совокупностей начальных условий. Далее возникает необходимость сшивания «мгновенных значений» оптимального управления  $u_1$  и  $u_2$ . Находим вариации параметров  $\Delta k_i$ , возникающих при переходе из одной области в другую, и рассматриваем их как управляющие воздействия.

Тогда

$$u_2 = -\text{sign}\sigma_2 = -\text{sign}[k_1x_1 + k_2x_2 + k_3x_3 + \Delta k_1x_1 + \Delta k_2x_2 + \Delta k_3x_3], \quad (13)$$

где  $\Delta k_1$ ,  $\Delta k_2$  и  $\Delta k_3$  определяем из соотношения

$$\begin{aligned} \Delta\sigma(x) &= \sigma_2(x) - \sigma_1(x) = \\ &= (k_1' - k_1)x_1 + (k_2' - k_2)x_2 + (k_3' - k_3)x_3 = \\ &= \Delta k_1x_1 + \Delta k_2x_2 + \Delta k_3x_3. \end{aligned}$$

Дальнейшая процедура синтеза производится в соответствии с методикой, изложенной в [9, 10]. Ставится задача минимизации функционала

$$\min_{\Delta k_1, \Delta k_2} J = \int_0^{\infty} \left( \sum_{i=1}^{n=3} \alpha_i x_i^2 + c_1 \Delta k_1^2 + c_2 \Delta k_2^2 \right) dt \quad (14)$$

на решениях системы дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= -\omega_0^2 x_1 + b_1 x_3, \\ \dot{x}_3 &= -a_{31} x_3 + b_2 u, \\ u &= -f(\sigma) = -\text{sign} \left[ \sum_{i=1}^3 k_i x_i + \Delta k_1 x_1 + \Delta k_2 x_2 \right]. \end{aligned} \quad (15)$$

Процесс определения допустимого управления по переменной состояния  $x_3$  приводит к ничтожно малому значению эффективности управления, что позволяет в (14) и (15), соответственно, пренебречь слагаемыми  $c_3 \Delta k_3^2$  и  $\Delta k_3 x_3$ .

Получаем функциональное уравнение Беллмана для системы (15) и функционала (14):

$$\begin{aligned} \min_{\Delta k_1, \Delta k_2} & \left| \sum_{i=1}^{n=3} \alpha_i x_i^2 + c_1 \Delta k_1^2 + c_2 \Delta k_2^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \right. \\ & + \frac{\partial V}{\partial x_2} (-\omega_0^2 x_1 + a_i x_3) + \frac{\partial V}{\partial x_3} (-a_{31} x^3 + b_2 q_3(a)) \times \\ & \left. \times \left( \sum_{i=1}^{n=3} k_i x_i + \Delta k_1 x_1 + \Delta k_2 x_2 \right) \right] = 0. \quad (16) \end{aligned}$$

После дифференцирования получаем

$$\begin{aligned} \Delta k_1 &= -\frac{b_2 q_2(a)}{c_1} \frac{\partial V}{\partial x_3} x_1; \\ \Delta k_2 &= -\frac{b_2 q_2(a)}{c_2} \frac{\partial V}{\partial x_3} x_2. \end{aligned} \quad (17)$$

Подставляя (17) в (16), получаем в итоге модифицированное уравнение Гамильтона – Якоби – Беллмана вида

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n=3} \alpha_i x_i^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial V}{\partial x_2} (-\omega_0^2 x_1 - k_\phi x_3) - \\ - \frac{\partial V}{\partial x_3} (a_{31} x_3 + b q_2(a)) \sum_{i=1}^{n=3} k_i x_i = \\ = \sum_{i=1}^{n=2} \frac{x_i^2}{4c_2} \left[ b_2 q_2(a) \frac{\partial V}{\partial x_3} \right]^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Решение этого уравнения аппроксимируется последовательностью степенных форм

$$V(x) = \sum_{q=1}^{\infty} v^{2q}(x) = v^2(x) + v^4(x) + v^6(x) \dots \quad (19)$$

Параметры квадратичной и последующих форм определяются из системы линейных алгебраических уравнений. Окончательно получаем субоптимальный закон управления:

$$\begin{aligned} u &= -\text{sign}[k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + \\ &+ q_2(a) \sum_{i=1}^{n=2} \frac{x_i}{2c} \frac{\partial V}{\partial x_3}]. \end{aligned}$$

Используя только квадратичную форму последовательности степенных форм (10), получаем нелинейный закон управления:

$$\begin{aligned} u &= -\text{sign}[k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3 + (k_{21} x_1^2 + k_{22} x_2^2) \times \\ &\times (k_{31} x_1 + k_{32} x_2 + k_{33} x_3)]. \end{aligned} \quad (20)$$

Исследование динамики замкнутого контура с синтезированным регулятором произведено методом цифрового моделирования. На рис. 3 представлены переходные процессы изменения угла  $\phi$  и управления  $u$  при отработке начального отклонения в 0,5 рад и ограничении на управление.

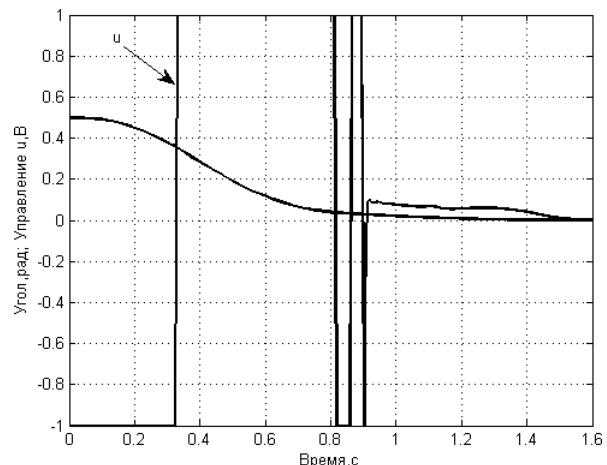


Рис. 3. Результаты моделирования

## ЗАКЛЮЧЕННЯ

Таким образом, исходная нелинейная задача АКОР для функционала (7) и системы (1) свелась к решению задачи минимизации квадратичного функционала (10) на решении линеаризованной системы (1), т. е. к решению ряда линейных задач АКОР. Дальнейшие исследования по синтезу систем управления желательно осуществить для нелинейной модели транспортируемого груза по фазовым координатам при ограничении управления. Предложенная методика позволяет существенно усилить вычислительную эффективность процедуры АКОР, что крайне важно при решении прикладных задач высокой размерности.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Динамика машин и управление машинами / под ред. Крейнина Г. В. – М. : Машиностроение, 1988. – 240 с.
2. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов / Терехов, В. М., Осипов О. И. – М. : Академия, 2005. – 240 с.
3. Герасимяк, Р. П. Электроприводы крановых механизмов / Герасимяк Р. П., Параил В. А. – М. : Энергия, 1970. – 136 с.
4. Герасимяк, Р. П. Анализ и синтез крановых электромеханических систем / Герасимяк Р. П., Лещев В. А. – Одесса: СНІЛ, 2008. – 192 с.
5. Федунов, Б. Е. Синтез оптимального по быстродействию управления колебательным звеном /Б. Е. Федунов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2000. – № 3. – С. 78–84.
6. Крутко, П. Д. Исследование динамики субоптимальных по быстродействию автоматических систем / П. Д. Крутко // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2004. – № 2. – С. 16–33.
7. Беллман, Р. Методы вычислений : избранные главы // Автоматика и телемеханика. – 1993. – № 8. – С. 3–39 ; № 9. – С. 3–51; № 10. – С. 3–43.
8. Булатов, В. Н. Методы погружения в задачах оптимизации / Булатов В. Н. – Новосибирск : Наука, 1977. – 154 с.
9. Кудин, В. Ф. Аналитическое конструирование нелинейных регуляторов с помощью метода гармоничес-

- кой лінеаризації // Електромеханіка. Ізвестия ВУЗов. – 1989. – № 9. – С. 60–66.
- 10. Kudin, V. Synthesis of suboptimal nonlinear regulator by immersion method / Kudin V., Kolachny I. // Jour. Electrical engineering. – 1998. – Vol. 49, № 1–2. – Pp. 11–15.
  - 11. Miele, A. General variational theory of the flight paths of rocket-powered aircraft, missiles and satellite carriers / Miele A. // Astronaut Acta. – 1958. – Vol.4. – Pp. 264–288.
  - 12. Хованський, А. Н. Приложение цепных дробей и их обобщений к вопросам приближенного анализа / Хованский А.Н. – М. : Гостехиздат, 1956.– 203 с.
  - 13. Попов, Е. П. Прикладная теория процессов управления в нелинейных системах / Попов Е. П. – М. : Наука, 1973. – 584 с.
  - 14. Пальтов, И. П. Качество процессов и синтез корректирующих устройств в нелинейных автоматических системах / Пальтов И. П. – М. : Наука, 1975. – 367 с.
  - 15. Кринецкий, И. И. Расчет нелинейных автоматических систем / Кринецкий И. И. – Киев : Техника, 1968. – 312 с.

Надійшла 07.10.2010

Кудін В. Ф., Колесніченко С. П.

**СУБОПТИМАЛЬНЕ НЕЛІНІЙНЕ КЕРУВАННЯ ЗА КРИТЕРІЄМ ШВИДКОДІЇ НА ОСНОВІ МЕТОДУ БЕЛЛМАНА – ЛЯПУНОВА**

Розглядається загальнотеоретична задача синтезу субоптимального нелінійного керування на прикладі двомасової електромеханічної системи керування крановим механізмом пересування з урахуванням гасіння коливань

УДК 629.424.2

Орловський І. А.

Канд. техн. наук, доцент Запорожського національного технічного університета

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ  
В ВИДЕ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ  
И НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
С СЕРИЕСНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ**

Синтезированы математические модели электропривода с серийным двигателем в виде полиномиальных рекуррентных нейронных сетей (ПРНС) по данным режима его работы. Исследованы способы идентификации параметров привода и зависимости момента сопротивления от скорости двигателя при задании специальных режимов работы и разных видов уравнений, описывающих нелинейности параметров. Выполнена настройка ПИ-регулятора скорости на полученной модели в виде ПРНС.

**Ключевые слова:** математическая модель, двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, рекуррентная нейронная сеть, регулятор скорости, идентификация параметров.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время имеется возможность применить в электроприводе (ЭП) с микропроцессорной системой управления (СУ) методы синтеза математических моделей электромеханических систем в виде нейронных сетей [1, 2] с последующей оптимальной настройкой регуляторов на этих моделях [3, 4]. Поиск с помощью различных алгоритмов оптимальных параметров регуляторов с помощью математических

транспортного вантажу. Задача вирішується на базі методу Беллмана – Ляпунова з використанням концепції «інваріантного занурення» за критерієм швидкодії. Проведено дослідження динаміки замкнутої системи із синтезованим субоптимальним регулятором.

**Ключові слова:** електромеханічна система, аналітичне конструювання регуляторів, критерій швидкодії, нелінійне керування, метод Беллмана – Ляпунова.

Kudin V. F., Kolesnichenko S. P.

**SUBOPTIMUM NONLINEAR CONTROL BY OPERATION SPEED CRITERION BASED ON BELLMAN-LYAPUNOV METHOD**

A general-theoretical task of suboptimal nonlinear control algorithm synthesis is discussed. As an example, a two-mass electromechanical control system of a crane moving mechanism is examined taking into account load oscillations damping. The task is solved on the basis of Bellman–Lyapunov method using the concept of «invariant immersion» by operation speed criterion. The dynamics of a closed-loop system with a synthesized suboptimal regulator is investigated.

**Key words:** electromechanical system, analytical regulator synthesis, operation speed criterion, nonlinear control, Bellman–Lyapunov method.

моделей предъявляют повышенные требования к точности моделей и их обобщающим свойствам. В работах [5, 6] разработан метод синтеза математических моделей нелинейных электромеханических объектов в виде полиномиальных рекуррентных нейронных сетей (ПРНС), однако отсутствует методика идентификации с высокой точностью с помощью полученных моделей параметров объекта (как линейных, так и нелинейных). В работе [7]

исследована возможность идентификации параметров двигателя постоянного тока последовательного возбуждения (ДПТПВ) по его обученным моделям в виде ПРНС. При этом на обучающих наборах обеспечивалась высокая точность всей модели, однако точность идентификации нескольких параметров ЭП была низкой. Такой двигатель является основным элементом тягового ЭП, идентификация параметров которого и настройка СУ ЭП в реальном времени являются актуальными и сложными задачами.

Математическая модель ЭП в виде ПРНС, полученная по данным режима его работы при разных видах нелинейностей параметров, имеет различную точность. В научной литературе отсутствуют исследования настройки регуляторов ЭП с помощью таких моделей.

Цель статьи – повышение точности идентификации нелинейных параметров ДПТПВ по его рассчитанным по данным режима работы математическим моделям в виде ПРНС, а также настройка регуляторов на полученных моделях.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно предложенному в работе [5] методу, структура математической модели нелинейных объектов определяется по известной информации о структуре их математической модели и характере имеющихся нелинейностей параметров. Поэтому для синтеза математической модели в виде ПРНС воспользуемся следующим описанием процессов в ДПТПВ с нелинейной зависимостью момента сопротивления от скорости [6, 7]:

$$\left. \begin{aligned} L(I) \frac{dI}{dt} + I \cdot R_d &= U - c\Phi(I) \cdot \omega, \\ J \frac{d\omega}{dt} &= c\Phi(I) \cdot I - M_C(\omega), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $R_d$  – эквивалентное активное сопротивление цепи постоянного тока;  $L(I)$  – эквивалентная индуктивность цепи постоянного тока, зависящая от тока якоря двигателя;  $c\Phi(I)$  – произведение конструктивной постоянной « $c$ » двигателя на значение магнитного потока  $\Phi$ , зависящего от тока якоря;  $J$  – суммарный момент инерции на валу двигателя;  $M_C(\omega)$  – момент сопротивления, зависящий от угловой скорости двигателя  $\omega$ .

Для данного объекта вектором состояния является  $x = [I, \omega]^T$ ; вектором входных сигналов –  $u = [U, 1]^T$ . Второй элемент вектора  $u$  взят равным единице для обеспечения общности выражений при описании момента сопротивления в виде нелинейно-

го коэффициента  $M_C(\omega)$ . С учетом сделанных обозначений система (1) может быть представлена в матричном виде:

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (2)$$

где матрицы нелинейных коэффициентов  $A$  и  $B$  имеют вид

$$\left. \begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -R_d L^{-1}(I) & -L^{-1}(I)c\Phi(I) \\ J^{-1}c\Phi(I) & 0 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} L^{-1}(I) & 0 \\ 0 & -J^{-1}M_C(\omega) \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для получения общих выражений расчета весовых коэффициентов ПРНС (с использованием которых формируются полиномы имеющихся в объекте нелинейностей) запишем систему уравнений (2) в виде

$$\dot{x} = CY, \quad (4)$$

где  $Y = [I, \omega, U_d, 1]^T$  – вектор, объединяющий векторы состояния объекта и входных сигналов. Матрица  $C$  объединяет матрицы  $A$  и  $B$ .

Структурная схема модели ДПТПВ в виде ПРНС с использованием полиномиальных блоков [5, 7] дана на рис. 1. Полиномиальные блоки POL формируют произведения (с единичными коэффициентами) по-

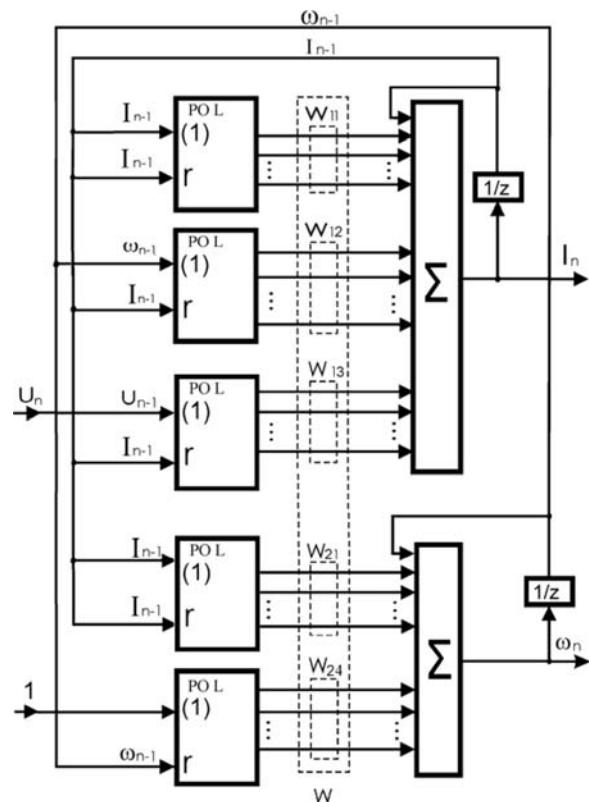


Рис. 1. Структура модели ДПТПВ в виде ПРНС

полиномиальних членов степені  $r$  от сигналов, поступаючих на входы « $r$ », на сигналы, поступающие на входы « $(1)$ ». Входы блоков POL для первого и второго нейронов, соответственно, обозначим векторами  $h_j$  и  $f_j$  с такими же индексами  $j$ , как у элементов векторов весовых коэффициентов  $w_{ij}$  и элементов  $c_{ij}$  матрицы  $C$ . Для дискретной системы с тактом счета  $T$  при аппроксимации нелинейностей полиномами второго порядка вектора  $h$  и  $f$ , соответственно, для первого и второго нейронов, в  $n$ -м такте определяются уравнениями

$$\left. \begin{aligned} h_n &= [I_{n-1}, I_{n-1}^2, I_{n-1}^3, \omega_{n-1}, \omega_{n-1} I_{n-1}, \\ &\quad \omega_{n-1} I_{n-1}^2, U_n, U_n I_{n-1}, U_n I_{n-1}^2]^T, \\ f_n &= [I_{n-1}, I_{n-1}^2, I_{n-1}^3, 1, \omega_{n-1}, \omega_{n-1}^2]^T. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

С учетом приведенных выше обозначений, систему (2) представим в разностном виде:

$$\left. \begin{aligned} I_n &= I_{n-1} + w_{11} h_{1n} + w_{12} h_{2n} + w_{13} h_{3n}, \\ \omega_n &= \omega_{n-1} + w_{21} f_{1n} + w_{14} f_{4n}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

или более компактно следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} w_1 h_n &= \Delta I_n, \\ w_2 f_n &= \Delta \omega_n, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $w_1 = [w_{11}, w_{12}, w_{13}]$ ,  $w_2 = [w_{21}, w_{24}]$ ,  $h = [h_1, h_2, h_3]^T$ ,  $f = [f_1, f_4]^T$ ,  $\Delta I_n = I_n - I_{n-1}$ ,  $\Delta \omega_n = \omega_n - \omega_{n-1}$ .

При выполнении  $M$  измерений входных сигналов и вектора состояния объекта каждое из уравнений системы (7) дает  $M$  уравнений:

$$w_1^* h^* = \Delta I_n^*, \quad w_2^* f^* = \Delta \omega_n^*,$$

где  $w_1^* = [w_1, \dots, w_1]^T$ ,  $w_2^* = [w_2, \dots, w_2]^T$  – векторы, каждый размером ( $M \times 1$ ),  $h^* = [h_n, \dots, h_{n-M+1}]$ ,  $f^* = [f_n, \dots, f_{n-M+1}]$ ,  $\Delta I_n^* = [\Delta I_n, \dots, \Delta I_{n-M+1}]^T$ ,  $\Delta \omega_n^* = [\Delta \omega_n, \dots, \Delta \omega_{n-M+1}]^T$ . Определение весовых коэффициентов выполняется путем расчета минимального среднеквадратичного отклонения для всех уравнений с помощью псевдообратных матриц  $(h^*)^+$  и  $(f^*)^+$  по выражениям [6]

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= \Delta I_n^* (h^*)^+, \\ w_2 &= \Delta \omega_n^* (f^*)^+. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Весовые коэффициенты ПРНС, исходя из уравнения (4), могут быть вычислены по математическим моделям ДЛПВ по формуле [7]

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} & 0 \\ w_{21} & 0 & 0 & w_{24} \end{bmatrix} = \text{Pol}_r(TC), \quad (9)$$

где  $w_{ij} = \text{Pol}_r(Tc_{ij})$ ;  $\text{Pol}_r(\cdot)$  – функция, определяющая вектор коэффициентов полинома степени  $r$  для выражения, находящегося в скобках. При этом

$$\left. \begin{aligned} w_{11} &= T\text{Pol}(-R_d L^{-1}(I)), \\ w_{12} &= T\text{Pol}(-L^{-1}(I)c\Phi(I)), \\ w_{13} &= T\text{Pol}(L^{-1}(I)), \\ w_{21} &= T\text{Pol}(J^{-1}c\Phi(I)), \\ w_{24} &= T\text{Pol}(-J^{-1}M_C(\omega)). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

При расчете модели по данным режима работы одновременно находятся все весовые коэффициенты нейрона (выход нейрона формируется с учетом нескольких элементов матрицы  $C$ ), обеспечивающие минимум среднеквадратичной ошибки его выходного сигнала для конкретного набора данных режима. При этом в общем случае возникают ошибки идентификации параметров объекта по его модели в виде ПРНС, вызванные тем, что критерий точной идентификации каждого отдельного нелинейного элемента матрицы  $C$  не ставится.

Общее решение задачи одновременной идентификации нескольких параметров нелинейных объектов в научной литературе в настоящее время отсутствует. Поэтому исследовались три случая идентификации для нескольких специальных режимов электропривода и для нелинейностей заданного вида, а именно:

1. Нелинейности в пределах изменения переменных режима работы точно описываются полиномами заданной степени.

2. Использование дополнительной информации о математических преобразованиях, учитывающих структуру модели объекта. С этой целью выполняются дополнительные функциональные преобразования того же набора измеряемых данных, например дифференцирование дифференциального уравнения. Используется также задание режимов, в которых мгновенные значения части координат объекта повторяются при разных мгновенных значениях остальной части координат.

3. Задание режимов, когда часть элементов вектора состояния равна нулю, например, остановка двигателя на свободном выбеге, разрыв якорной цепи двигателя (ток якоря равен нулю); угловая скорость двигателя равна нулю (фиксация ротора двигателя при пониженном напряжении).

Для первого случая, когда нелинейность точно задана полиномами степени  $r$ , значения полиномиаль-

ных коефіцієнтів обратного значення індуктивності находяться із третього рівняння системи (10):

$$\begin{aligned} L_0^{-1} &= T^{-1} \cdot w_{130}, L_1^{-1} = T^{-1} \cdot w_{131}, \dots, \\ L_r^{-1} &= T^{-1} \cdot w_{13r}. \end{aligned} \quad (11)$$

При відомому моменті інерції поліноміальні коефіцієнти момента сопротивлення і магнітного потока визначаються по наступним залежостям:

$$\left. \begin{aligned} M_{c0} &= -T^{-1} \cdot J \cdot w_{240}, \\ M_{c1} &= -T^{-1} \cdot J \cdot w_{241}, \\ &\dots \\ M_{cr} &= -T^{-1} \cdot J \cdot w_{24r}, \\ c\Phi_0 &= T^{-1} \cdot J \cdot w_{210}, \\ c\Phi_1 &= T^{-1} \cdot J \cdot w_{211}, \\ &\dots \\ c\Phi_r &= T^{-1} \cdot J \cdot w_{21r}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де  $w_{ijk}$  – вагові коефіцієнти ПРНС, формуючі коефіциєнти поліноміального розкладу нелинейностей.

В общем случае произведение  $c\Phi$  может быть вычислено делением полинома из второго уравнения системы (10) на полином из третьего уравнения. Сопротивление  $R_d$  находится делением полиномов первого уравнения системы (10) на полином третьего уравнения. Суммарный момент инерции на валу ДПТПВ находится делением полинома  $c\Phi(I)$  на полином  $w_{21}(I)$ . Для исследования первого случая нелинейности магнитного потока от тока  $c\Phi(I)$  и момента сопротивления от угловой скорости  $M_c(\omega)$  задавались в виде полиномов второй степени  $c\Phi = c\Phi_0 + c\Phi_1 I + c\Phi_2 I^2$  и  $M_c = M_{c0} + M_{c1}\omega + M_{c2}\omega^2$ .

В втором случае для сближения критериев, обеспечивающих точный выход нейрона и точное формирование отдельных нелинейных параметров, введена дополнительная информация при расчете ПРНС в виде математической модели вычисления производных измеряемых сигналов. Для вывода уравнений расчета вагових коефіцієнтів проделаем следующее.

Запишем разностные уравнения (7) через элементы  $c_{11}$ ,  $c_{12}$  и  $c_{13}$  матрицы  $C$  в виде степенных зависимостей

$$\left. \begin{aligned} (I_n - I_{n-1})/T &= (c_{110} + c_{111} \cdot I_{n-1}^1 + c_{112} \cdot I_{n-1}^2) \cdot I_{n-1} + \\ &+ (c_{120} + c_{121} \cdot I_{n-1}^1 + c_{122} \cdot I_{n-1}^2) \cdot \omega_{n-1} + \\ &+ (c_{130} + c_{131} \cdot I_{n-1}^1 + c_{132} \cdot I_{n-1}^2) \cdot U_n, \\ (\omega_n - \omega_{n-1})/T &= (c_{210} + c_{211} I_{n-1}^1 + c_{212} I_{n-1}^2) I_{n-1} + \\ &+ (c_{240} + c_{241} \omega_{n-1}^1 + c_{242} \omega_{n-1}^2). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

После дифференцирования уравнений системы (13) и обозначения вторых разностей  $\delta I_n = I_n - 2I_{n-1} + I_{n-2}$  и  $\delta\omega_n = \omega_n - 2\omega_{n-1} + \omega_{n-2}$  получим

$$\left. \begin{aligned} \delta I_n/T &= c_{110}(I_{n-1} - I_{n-2}) + c_{111}(2I_{n-1}^2 - 2I_{n-1} \cdot I_{n-2}) + \\ &+ c_{112}(3I_{n-1}^3 - 3I_{n-1}^2 \cdot I_{n-2}) + c_{120}(\omega_{n-1} - \omega_{n-2}) + \\ &+ c_{121}(2I_{n-1} \cdot \omega_{n-1} - I_{n-2} \cdot \omega_{n-1} - I_{n-1} \cdot \omega_{n-2}) + \\ &+ c_{122}(3I_{n-1}^2 \cdot \omega_{n-1} - 2I_{n-1} \cdot I_{n-2} \cdot \omega_{n-1} - I_{n-1}^2 \cdot \omega_{n-2}) + \\ &+ c_{130}(U_n - U_{n-1}) + c_{131}(2I_{n-1} \cdot U_n - I_{n-2} \cdot U_n - I_{n-1} \cdot U_{n-1}) + \\ &+ c_{132}(3I_{n-1}^2 \cdot U_n - 2I_{n-1} \cdot I_{n-2} \cdot U_n - I_{n-1}^2 \cdot U_{n-1}), \\ \delta\omega_n/T &= c_{210}(I_{n-1} - I_{n-2}) + \\ &+ c_{211}(I_{n-1}^2 - I_{n-1} \cdot I_{n-2} + I_{n-1}^2 - I_{n-1} \cdot I_{n-2}) + \\ &+ c_{212}(2I_{n-1}^3 - 2I_{n-1}^2 \cdot I_{n-2} + I_{n-1}^3 - I_{n-1}^2 \cdot I_{n-2}) + \\ &+ c_{241}(\omega_{n-1} - \omega_{n-2}) + c_{242}(2\omega_{n-1}^2 - 2\omega_{n-1} \cdot \omega_{n-2}). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Обозначим векторами  $H_n$  и  $F_n$  сигналы функционального разложения при дифференцировании на входах первого и второго нейронов соответственно:

$$\left. \begin{aligned} H_n &= \begin{bmatrix} I_{n-1} - I_{n-2} \\ 2I_{n-1}^2 - 2I_{n-1} \cdot I_{n-2} \\ 3I_{n-1}^3 - 3I_{n-1}^2 \cdot I_{n-2} \\ \omega_{n-1} - \omega_{n-2} \\ 2I_{n-1} \cdot \omega_{n-1} - I_{n-2} \cdot \omega_{n-1} - I_{n-1} \cdot \omega_{n-2} \\ 3I_{n-1}^2 \cdot \omega_{n-1} - 2I_{n-1} \cdot I_{n-2} \cdot \omega_{n-1} - I_{n-1}^2 \cdot \omega_{n-2} \\ U_n - U_{n-1} \\ 2I_{n-1} \cdot U_n - I_{n-2} \cdot U_n - I_{n-1} \cdot U_{n-1} \\ 3I_{n-1}^2 \cdot U_n - 2I_{n-1} \cdot I_{n-2} \cdot U_n - I_{n-1}^2 \cdot U_{n-1} \end{bmatrix}, \\ F_n &= \begin{bmatrix} I_{n-1} - I_{n-2} \\ 2I_{n-1}^2 - 2I_{n-1} \cdot I_{n-2} \\ 3I_{n-1}^3 - 3I_{n-1}^2 \cdot I_{n-2} \\ 0 \\ \omega_{n-1} - \omega_{n-2} \\ 2\omega_{n-1}^2 - 2\omega_{n-1} \cdot \omega_{n-2} \end{bmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Вагові коефіцієнти  $w_1 = [w_{110}, w_{111}, w_{112}, w_{120}, w_{121}, w_{122}, w_{130}, w_{131}, w_{132}]$  і  $w_2 = [w_{210}, w_{211}, w_{212}, w_{240}, w_{241}, w_{242}]$  для моделей з допоміжним і без допоміжного дифференціювання однакові, тоді уравнения (13) і (14) можна записати в виде

$$\left. \begin{aligned} \Delta I_n &= w_1 \cdot h_n, \\ \delta I_n &= w_1 \cdot H_n, \\ \Delta\omega_n &= w_2 \cdot f_n, \\ \delta\omega_n &= w_2 \cdot F_n. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

При использовании  $M$  измерений вектора  $\Delta I$ ,  $\delta I$ ,  $h$ ,  $H$  и  $\Delta\omega$ ,  $\delta\omega$ ,  $f$ ,  $F$  получат дополнительную размерность и примут вид

$$\left. \begin{array}{l} \Delta I = (\Delta I_n, \Delta I_{n-1}, \dots, \Delta I_{n-M+1})^T, \\ \delta I = (\delta I_n, \delta I_{n-1}, \dots, \delta I_{n-M+1})^T, \\ h = [h_n, h_{n-1}, \dots, h_{n-M+1}]^T, \\ H = [H_n, H_{n-1}, \dots, H_{n-M+1}]^T, \\ \Delta\omega = (\Delta\omega_n, \Delta\omega_{n-1}, \dots, \Delta\omega_{n-M+1})^T, \\ \delta\omega = (\delta\omega_n, \delta\omega_{n-1}, \dots, \delta\omega_{n-M+1})^T, \\ f = [f_n, f_{n-1}, \dots, f_{n-M+1}]^T, \\ F = [F_n, F_{n-1}, \dots, F_{n-M+1}]^T. \end{array} \right\} \quad (17)$$

Для выполнения расчета весовых коэффициентов, соответствующих общему решению уравнений системы (16), обозначим для первого нейрона через  $DI$  вектор, объединяющий  $\Delta I$  и  $\delta I$ , и через  $DH$  вектор, объединяющий  $h$  и  $H$ , аналогично для второго нейрона  $D\omega$  – вектор, объединяющий  $\Delta\omega$  и  $\delta\omega$  и  $DF$  – вектор, объединяющий  $f$  и  $F$ :

$$\left. \begin{array}{l} DI = [\Delta I_n, \Delta I_{n-1}, \dots, \Delta I_{n-M+1}, \delta I_n, \delta I_{n-1}, \dots, \delta I_{n-M+1}]^T, \\ DH = [h_n, h_{n-1}, \dots, h_{n-M+1}, H_n, H_{n-1}, \dots, H_{n-M+1}]^T, \\ D\omega = [\Delta\omega_n, \Delta\omega_{n-1}, \dots, \Delta\omega_{n-M+1}, \delta\omega_n, \delta\omega_{n-1}, \dots, \delta\omega_{n-M+1}]^T, \\ DF = [f_n, f_{n-1}, \dots, f_{n-M+1}, F_n, F_{n-1}, \dots, F_{n-M+1}]^T. \end{array} \right\} \quad (18)$$

Общая система уравнений принимает вид

$$\left. \begin{array}{l} DI = w_1 \cdot DH, \\ D\omega = w_2 \cdot DF, \end{array} \right\} \quad (19)$$

а их решения определяются через псевдообратные матрицы

$$\left. \begin{array}{l} w_1 = DI \cdot DH^+, \\ w_2 = D\omega \cdot DF^+. \end{array} \right\} \quad (20)$$

Следующий метод (третий случай) разработан для идентификации весовых коэффициентов второго нейрона для режима, когда часть элементов вектора состояния равна нулю, для этого при вращении двигателя с заданной скоростью происходит разрыв якорной цепи двигателя (ток якоря равен нулю) и осуществляется свободный выбег двигателя. Тогда второе уравнение системы (1) принимает вид

$$J \frac{d\omega}{dt} = -M_C(\omega). \quad (21)$$

Рассчитаем весовые коэффициенты второго нейрона в два этапа. На первом этапе разгоняется двигатель до номинальных значений и разрывается якор-

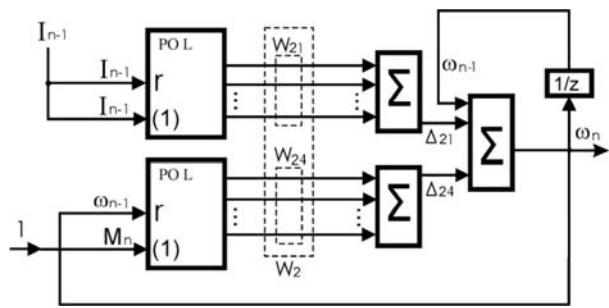


Рис. 2. Структура 2-го нейрона модели ДПТПВ в виде ПРНС

ная цепь, тогда сигналы части ПРНС, где формируется слагаемое  $\Delta_{21}$  (рис. 2), равны нулю. В этом случае выход второго нейрона зависит только от одного нелинейного коэффициента (формируемого вектором весовых коэффициентов  $w_{24}$ ), который вычисляется по данным режима.

На втором этапе используются данные режима разгона двигателя, по которым находим  $w_{21}$  по формуле

$$\Delta_{21} = \Delta\omega_n - \Delta_{24}. \quad (22)$$

Далее по второй формуле системы (20) рассчитываются весовые коэффициенты  $w_{21}$ . Аналогично для идентификации внутренних параметров первого уравнения системы (1) (весовых коэффициентов первого нейрона) необходимо задание двух следующих режимов: в первом режиме напряжение  $U$  и угловая скорость  $\omega$  равны нулю (например, при подаче и отключении напряжения и фиксации ротора двигателя), во втором – только напряжение  $U$  равно нулю.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет модели в виде ПРНС и идентификация нелинейных параметров выполнялись для ДПТПВ типа МП-62, имеющего следующие параметры [8]:  $U_h = 220$  В;  $I_h = 260$  А;  $w_h = 53,4$  с<sup>-1</sup>;  $c = 78,5$ ; момент инерции, приведенный к валу двигателя,  $J_d = 1,36$  кг·м<sup>2</sup>. Моделирование выполнялось с шагом  $T = 0,0001$  с. Переменными режима являлись: напряжение, подаваемое на двигатель, ток и угловая скорость двигателя.

Задавалось напряжение питания двигателя в виде, показанном на рис. 3. При такой форме напряжения существуют моменты времени, когда мгновенные значения угловой скорости одинаковы, а мгновенные значения токов двигателя разные. Происходит многократное прохождение одних и тех же мгновенных значений части координат объекта, что повышает точность идентификации.

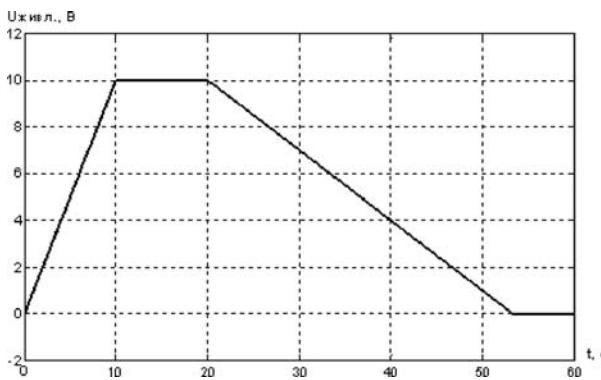


Рис. 3. Напряжение питання двигателя

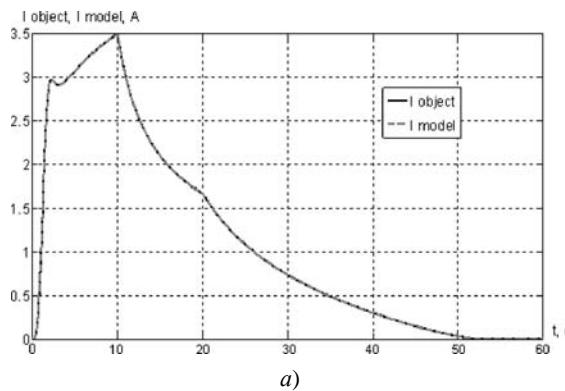
По данным режима работы двигателя по уравнениям системы (8) рассчитывались весовые коэффициенты его модели в виде ПРНС. Графики токов и угловых скоростей для объекта  $I_{object}$ ,  $\omega_{object}$  и его модели  $I_{model}$ ,  $\omega_{model}$  приведены на рис. 4. Достигалась высокая точность математической модели (максимальная погрешность не превышает 1 %). В математической модели с высокой точностью отрабатывался каждый из нелинейных членов диффе-

ренциального уравнения. Изменения во времени идентифицированных с помощью ПРНС  $c\Phi(I)$  и  $M_c(\omega)$ , согласно рис. 5, практически совпадают с изменениями этих величин в объекте. Максимальная ошибка также не превышает 1 %.

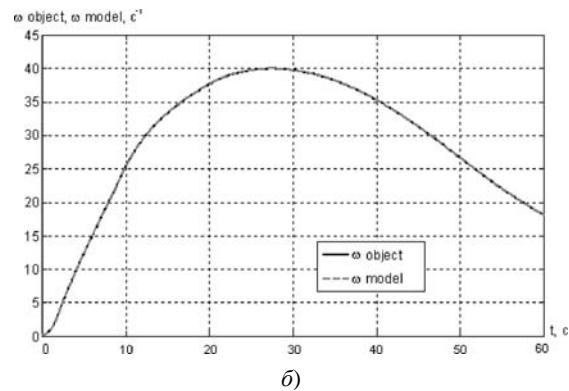
Для исследования второго случая нелинейные зависимости момента сопротивления от скорости  $M_c(\omega)$  задавались табл. 1. Нелинейности  $\Phi(I)$  и  $L(I)$  задавались в виде табл. 2 [8].

Графики тока и скорости для объекта и его модели в виде ПРНС приведены на рис. 6. Максимальная погрешность не превышала 5 %. Для сравнения на рис. 7 приведены нелинейные графики изменения  $c\Phi(I)$  и  $M_c(\omega)$  в объекте и его модели в виде ПРНС. Погрешность идентификации при угловой скорости более  $10 \text{ с}^{-1}$  не превышала 25 %.

Из рис. 6 и рис. 7 видно, что модель аппроксимирует нелинейности, но с большой погрешностью. Для повышения точности идентификации нужно повысить степень полинома. Если не использовать дополнительную информацию путем дифференцирова-

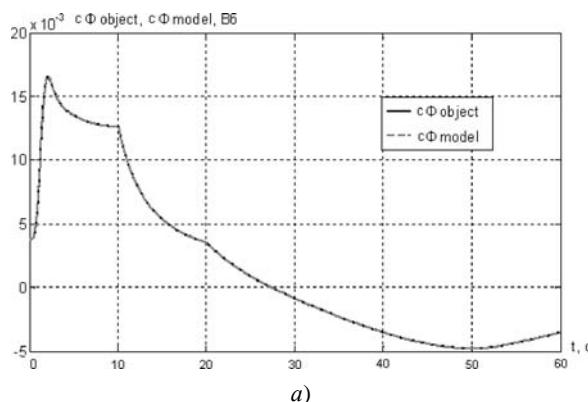


a)

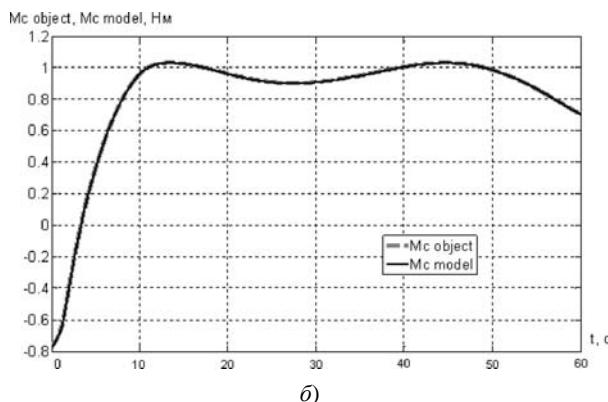


б)

Рис. 4. Токи и угловые скорости двигателя в объекте и в ПРНС (перший случай)



а)



б)

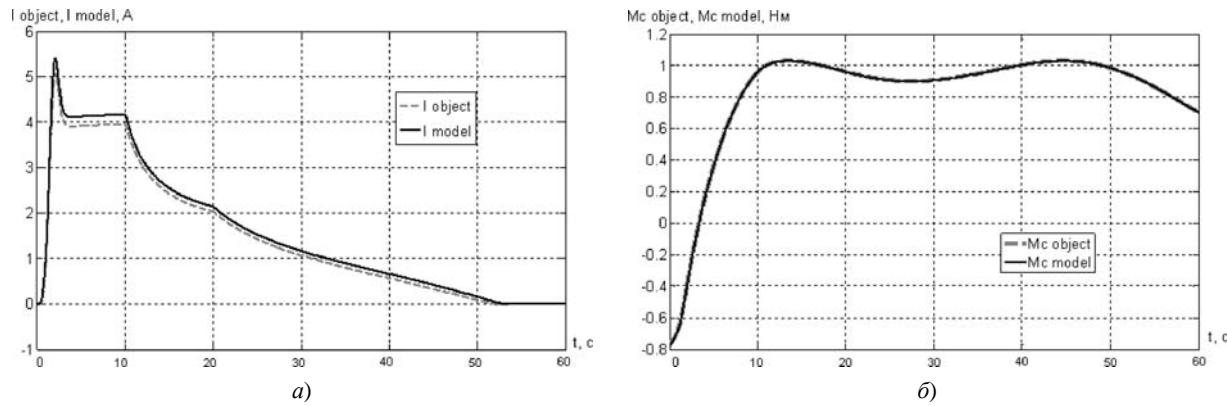
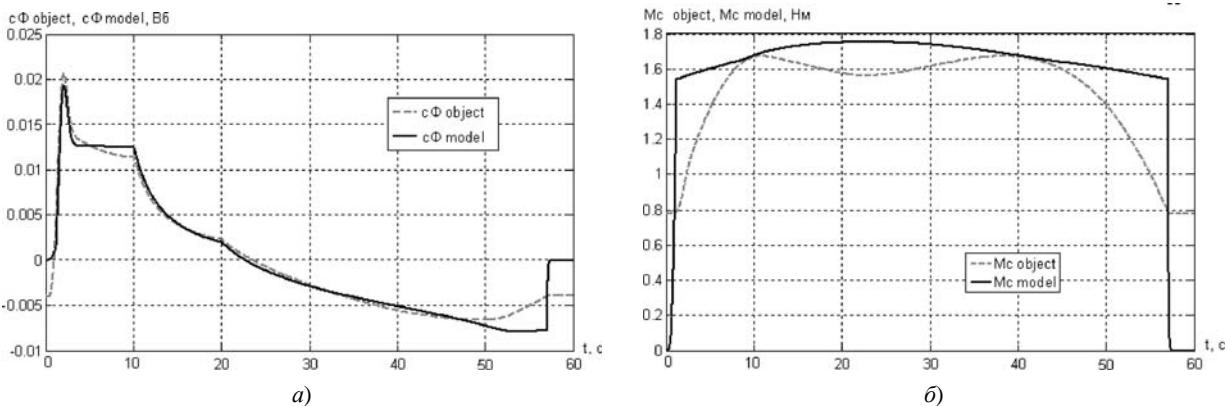
Рис. 5. Измінення  $c\Phi(I)$  і  $M_c(\omega)$  в обєкті і в ПРНС (перший случай)

**Таблица 1.** Зависимость момента сопротивления от скорости двигателя

Параметры, единицы измерения		Значения								
$\omega, \text{с}^{-1}$	0	0,1	20	40	60	80	100	120	140	150
$M_c, \text{Нм}$	0	0,7	0,75	0,82	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,35

**Таблица 2.** Зависимости  $\Phi(I)$  и  $L(I)$ 

$I, A$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320
$\Phi, \text{Вб} \cdot 10^{-3}$	7	13,5	20,4	26,4	31,6	35,1	37,9	41	42,6	44,1	45,5	46,8	48	49,1	50,1	51
$L, \text{Гн} \cdot 10^{-3}$	36	34,5	32	28,5	24	19,5	15	11	9	7,5	6,3	5,5	5	4,5	4,2	4

**Рис. 6.** Ток и угловая скорость двигателя в объекте и в ПРНС (второй случай)**Рис. 7.** Изменения  $c\Phi(I)$  и  $M_c(\omega)$  в объекте и в ПРНС (второй случай)

ния и осуществлять только запуск двигателя, ошибка идентификации нелинейностей значительно возрастает (до 50 % и выше).

Моделирование третьего случая выполнено для идентификации параметров второго уравнения системы (1) при нелинейных  $\Phi(I)$  и  $M_c(\omega)$ , заданных в виде табл. 1 и 2. Для осуществления движения при токе двигателя, равном нулю, после разгона разрывалась цепь питания двигателя. Весовые коэффи-

циенты  $w_{24}$  рассчитывались по данным режима при свободном выбеге двигателя. Весовые коэффициенты  $w_{21}$  рассчитывались по данным режима при разгоне двигателя с использованием уравнения (22). Идентифицированные из ПРНС нелинейности  $c\Phi(I)$  и  $M_c(\omega)$  (рис. 8) очень близки к нелинейностям, заданным в объекте. Максимальная погрешность идентификации не превышает 5 %.

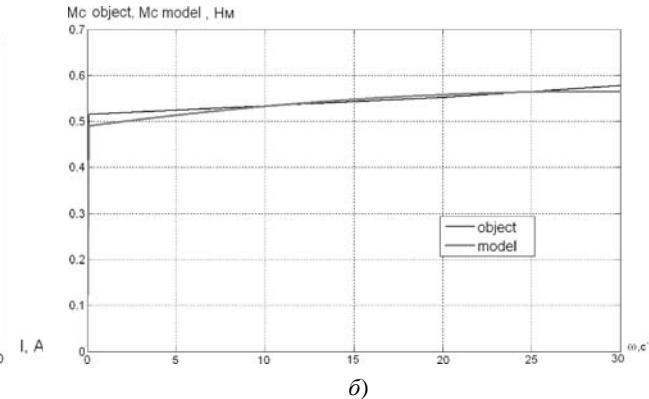
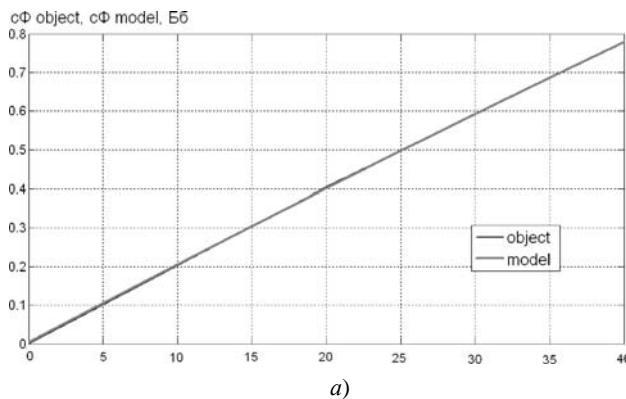


Рис. 8. Графики  $c\Phi(I)$  и  $M_c(\omega)$  в обєкті и их ідентифікація из ПРНС (третій случай)

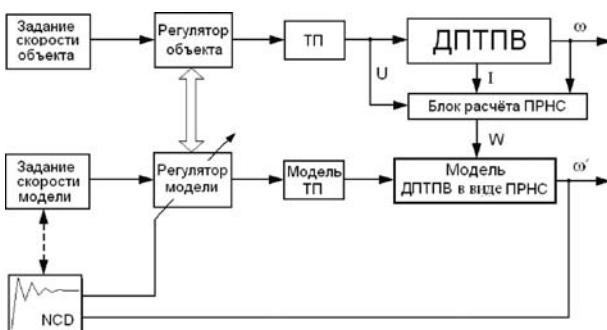


Рис. 9. Структурна схема настройки СУ ЭП с ДПТПВ

Таблиця 3. Ошибки отработки тока и угловой скорости

Наименование параметра	Максимальные ошибки, %	Ошибки в установившемся режиме, %
Ток якоря ( $I$ )	3	0,72
Скорость ( $\omega$ )	2	0,28

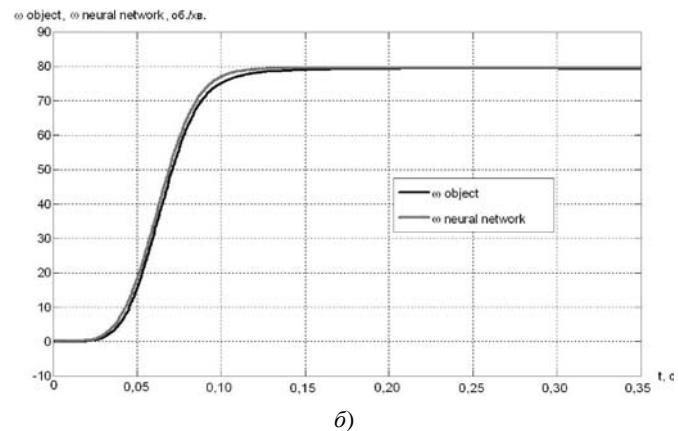
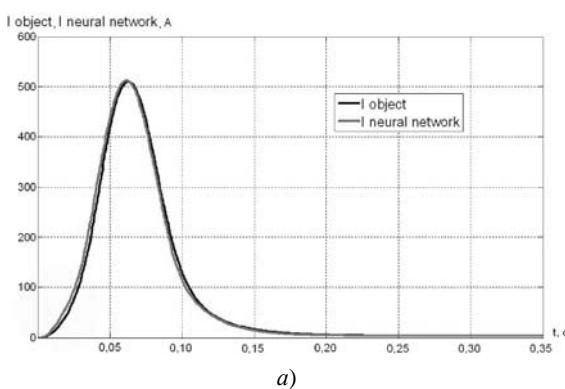


Рис. 10. Графики переходних процесів тока и угловой скорости после настройки регулятора скорости

### НАСТРОЙКА СУ ЭП ПО ЕГО МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ В ВИДЕ ПРНС

На синтезированной выше математической модели ДПТПВ в виде ПРНС, полученной для более общего второго случая, выполнялась настройка регулятора скорости ЭП. Последовательность настройки следующая (рис. 9): синтез математической модели ДПТПВ в виде ПРНС; настройка интегрального  $k_i$  и

дифференциального  $k_n$  параметров ПИ-регулятора на этой математической модели; подстановка найденных параметров  $k_i$  і  $k_n$  в регулятор об'єкта; проверка качества переходных процессов при отработке задания ЭП с найденными коэффициентами регулятора.

В блоке «Блок расчета ПРНС» (рис. 9) по данным режима работы двигателя рассчитываются весовые коэффициенты модели ДПТПВ в виде ПРНС. В блоке «NCD» [9] задаются границы желаемого переход-

ного процесса и настраиваются параметры регулятора на математической модели объекта в виде ПРНС. При изменении параметров объекта синтезируется новая модель в виде ПРНС и на ней перенастраивается регулятор, что обеспечивает работу ЭП с желаемыми характеристиками переходного процесса.

Ошибка отработки координат ЭП моделью в виде ПРНС на обучающих наборах не превышала 3 % (рис. 10). Переходные процессы тока и угловой скорости исследуемого объекта ( $I_{object}$ ,  $\omega_{object}$ ) и его модели в виде ПРНС ( $I_{neural\ network}$ ,  $\omega_{neural\ network}$ ) с найденными параметрами регуляторов не имеют перерегулирования и при этом практически одинаковые, из этого следует, что найденная модель ДПТПВ в виде ПРНС имеет необходимую точность и обобщающие свойства для настройки регуляторов.

В табл. 3 приведены максимальные значения ошибок и значения ошибок в установившемся режиме отработки тока и угловой скорости ЭП с моделью ДПТПВ в виде ПРНС.

Автор благодарен магистру Смирнову А. С. за совместную работу при выполнении моделирования.

## ВЫВОДЫ

1. По результатам исследований выполнено сравнение предложенных способов идентификации параметров ДПТПВ по его модели в виде ПРНС. Способ первый позволяет получить высокую точность идентификации (погрешность 1 %), но применяется при нелинейностях, точно аппроксимируемых полиномами заданной степени. Способ второй применяется для нелинейности, заданной произвольно (например, таблицей), однако требует усложнения вычислений и обеспечивает невысокую точность (погрешность 25 %). В третьем способе обеспечивается высокая точность (5 %), но требуется создание специальных режимов двигателя (разрыв цепи якоря).

2. Выполненная настройка параметров ПИ-регулятора скорости по полученной математической модели ДПТПВ в виде ПРНС позволила получить в ЭП желаемые переходные процессы, которые практически совпадают для модели и объекта, следовательно, синтезированная модель ДПТПВ в виде ПРНС имеет необходимую точность и обобщающие свойства для настройки регуляторов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бодянский, Е. В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения / Е. В. Бодянский, О. Г. Руденко // Харьков : ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 372 с.
2. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / Хайкин С. – 2-е издание. –М. : Вильямс, 2006. –1104 с.
3. Омату, С. Нейроуправление и его приложения. Кн. 2. / С. Омату, М. Халид, Р. Юсоф ; пер. с англ. Н. В. Батина. – М. : ИПРЖР, 2000. – 272 с. – (Нейрокомпьютеры и их применение).
4. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашов, С. А. Сергеев. – Харьков : ОСНОВА, 1997. – 112 с.
5. Орловский, И. А. Расчет моделей нелинейных электромеханических объектов на полиномиальных рекуррентных нейронных сетях из их известных математических моделей / И. А. Орловский // Технічна електродинаміка. – 2009. – № 1. – С. 20–31.
6. Орловский, И. А. Разработка моделей на нейронных сетях серийного двигателя постоянного тока по экспериментальным данным / И. А. Орловский, И. В. Блохин, А. С. Смирнов // Вісник Кременчуцького політехнічного університету. – Кременчук. – 2010. – Вип. 3 (62), част. 1. – С. 153–156.
7. Орловский, И. А. Обучение на рекуррентной нейронной сети модели серийного двигателя и идентификация его внутренних параметров. / И. А. Орловский, И. В. Блохин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» сборник наукових трудов «Проблемы автоматизированного привода. Теория и практика». – 2010. – № 28. – С. 566–568.
8. Андреев, В. П. Основы электропривода / В. П. Андреев, Ю. А. Сабинин. – М.-Л. : Госэнергоиздат, 1963. – 772 с.
9. Дьяконов, В. П. MATLAB 5.3.1 с пакетами расширений / под ред. проф. В. П. Дьяконова ; В. П. Дьяконов, Й. В. Абраменкова, В. В. Круглов. – М. : Нолидж, 2001. – 880 с.

Надійшла 15.07.2010

Орловський І. А.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ У ВИГЛЯДІ ПОЛІНОМІАЛЬНОЇ РЕКУРЕНТНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ТА НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРІВ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З СЕРІЕСНИМ ДВИГУНОМ

Синтезовано математичні моделі електропривода з серіесним двигуном у вигляді поліноміальних рекуррентних нейронних мереж (ПРНМ) за даними режиму його роботи. Досліджено способи ідентифікації параметрів приводу і залежності моменту опору від швидкості двигуна при заданні спеціальних режимів роботи і різних видів рівнянь, що описують нелінійності параметрів. Виконано настройку ПІ-регулятора швидкості на отриманій моделі у вигляді ПРНМ.

**Ключові слова:** математична модель, двигун постійного струму послідовного збудження, рекуррентна нейронна мережа, регулятор швидкості, ідентифікація параметрів.

Orlovsky I. A.

IDENTIFICATION OF MATHEMATICAL MODEL IN THE FORM OF POLYNOMIAL RECURRENT NEURAL NETWORK AND ADJUSTMENT OF ELECTRIC DRIVE WITH SERIES-WOUND MOTOR

Mathematical models of electric drive with a series-wound motor in the form of polynomial recurrent neural networks (PRNN) have been synthesized using its operational data. The methods of identification of drive parameters and drag torque dependence on motor speed were studied, setting special operating modes and different types of equations describing parameters non-linearity. A PI speed controller was adjusted according to the obtained model in the form of PRNN.

**Key words:** mathematical model, DC motor of series excitation, recurrent neural network, speed controller, parameters identification.

УДК 681.51:519.71

Тимченко В. Л.<sup>1</sup>, Кондратенко Ю. П.<sup>2</sup><sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев<sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор Национального университета кораблестроения им. адмирала Макарова, г. Николаев

## СИНТЕЗ СТРУКТУРНО ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ СИСТЕМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОМЕРНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

В статье рассматривается применение метода структурно переключаемых обратных связей для синтеза управляющих функций в замкнутых системах управления многомерными подвижными объектами. Сформированы принципы построения оптимальной траектории движения объекта и определения моментов переключения управляющих функций в цепях обратных связей, получены значения вектора управления для замкнутых систем различного типа.

**Ключевые слова:** многомерные подвижные объекты, структурно переключаемые обратные связи, замкнутые системы управления.

### ВВЕДЕНИЕ

Одним из базовых принципов синтеза систем управления подвижными объектами являются подходы, основанные на решении обратных задач динамики (ОЗД) объектов управления, т. к. динамика подвижных объектов, например, морских подвижных объектов, достаточно исследована и, таким образом, на базе математической модели установлена структурно-параметрическая связь между фазовыми координатами объекта, что позволяет максимально использовать это знание при синтезе управления.

ОЗД формировались и решались еще У. Гамильтоном, Ж. Лагранжем в задачах аналитической механики, позже в работах по механике управляемого полета и других приложениях Н. Еругина, А. Галиуллина, а также в работах последнего времени при синтезе систем с обратными связями [1, 2]. Систематизировано и детально рассмотрено решение ОЗД управляемых систем в работах [3, 4] для линейных и нелинейных моделей, в т. ч. при синтезе робастно устойчивых структур управляемых систем высокой динамической точности [5].

При всем многообразии требований, которые предъявляются к системам управления, можно при одинаковых требованиях к точности управления выделить два основных физических качества – минимум расхода энергии при управлении и максимальное быстродействие для переходного процесса управления [6]. Эти требования, естественно, являются экстремальными, а система, которая отвечает им, классически оптимальна в том смысле, как это определяется с момента возникновения теории оптимального управления.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для класса подвижных объектов наибольший интерес представляет создание инженерных методов исследования показателей качества многомерных динамических моделей и синтеза оптимальных управляющих воздействий. Аналитическое решение краевых задач при использовании классических методов оптимального управления с учетом многомерности объекта управления сложно и громоздко, а численное решение в ряде случаев не дает достаточно быстрой сходимости. В этой связи существует потребность в развитии инженерных методов оптимального управления, которые не нуждаются в непосредственном решении дифференциальных уравнений динамики объекта.

Метод структурно переключаемых обратных связей [7–9] позволяет решать практические задачи построения оптимальной траектории движения для разных критериев оптимальности и вида граничных условий. При этом движение по отрезкам оптимальной траектории обеспечивается управляющими функциями в цепях обратной связи, которые имеют возможность переключения для перехода с текущего отрезка траектории движения на заданный отрезок.

Данный метод состоит из следующих основных этапов [7]:

- планирование оптимальной траектории;
- определение моментов переключения управляющих функций в цепях обратной связи объекта;
- синтез управляющих функций в соответствующих цепях обратной связи многомерного объекта.

Планирование траектории перехода объекта для заданных критериев (условий) оптимальности и граничных условий заключается в определении необхо-

димого количества отрезков траектории с постоянными значениями соответствующих производных фазовых переменных, а также моментов времени переключения управляющих функций в цепях обратных связей при переходе с начального отрезка на заданный отрезок траектории. Переключение управляющих функций изменяет структурную конфигурацию обратных связей и решает задачу обеспечения необходимого порядка производной фазовой переменной с соответствующим позитивным или негативным постоянным значением. Синтез управляющих функций при этом будет заключаться в определении управляющих воздействий в цепях обратных связей объекта управления, при которых на определенных отрезках фазовой траектории выполняются условия постоянства соответствующих производных фазовых переменных. Произвольную фазовую траекторию объекта управления можно описать как совокупность отрезков траектории с постоянной производной определенного порядка. Планирование фазовой траектории объекта управления для заданных начальных и конечных условий включает определение необходимого количества отрезков фазовой траектории с постоянными значениями соответствующих производных вектора фазовых координат, а также вычисление моментов переключения управлений в обратных связях.

**Целью** данной статьи является разработка методов решения задач, стоящих перед перечисленными выше этапами синтеза замкнутых систем управления многомерными подвижными объектами.

Для  $i$ -го отрезка фазовой траектории произвольного (в т. ч. нелинейного, нестационарного) динамического объекта запишем, применяя разложение в ряд Тейлора,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(t_{i+1}) = & \mathbf{X}(t_i) + \frac{d\mathbf{X}(t)}{dt} \Big|_{t_i} \frac{\Delta t^l}{1!} + \dots + \\ & + \frac{d^k \mathbf{X}(t)}{dt^k} \Big|_{t_i} \frac{(\Delta t^l)^k}{k!} + \dots + \mathbf{R}_p, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\mathbf{X}(t) = \{x_x(t); x_y(t); x_z(t)\}$  – вектор фазовых координат движения по координатным осям  $l = \{x, y, z\}$ ;  $\mathbf{R}_p$  – вектор, определяющий остаточные члены ряда Тейлора;  $\Delta t^l = t_{i+1}^l - t_i^l$ ;  $t_i^l, t_{i+1}^l$  – начальный и конечный моменты времени движения объекта по каждой из координатных осей на  $i$ -м отрезке траектории.

Планирование фазовой траектории объекта управления для, соответственно, начальных и конечных условий

$$\left\{ \begin{array}{c} x_{ox}, x_{oy}, x_{oz}; \dot{x}_{ox}, \dot{x}_{oy}, \dot{x}_{oz}; \dots; x_{ox}^{(k)}, x_{oy}^{(k)}, x_{oz}^{(k)}; \\ x_{fx}, x_{fy}, x_{fz}; \dot{x}_{fx}, \dot{x}_{fy}, \dot{x}_{fz}; \dots; x_{fx}^{(m)}, x_{fy}^{(m)}, x_{fz}^{(m)} \end{array} \right\}$$

заключается в определении необходимого количества отрезков фазовой траектории с постоянными значениями соответствующих производных вектора  $\mathbf{X}(t)$ , а также моментов времени  $t_i^l$  переключения управляющих функций в обратных связях для обеспечения перехода объекта с данного отрезка траектории на последующий отрезок по каждой из координатных осей  $l = \{x, y, z\}$ .

Синтез оптимальных управляющих функций для многомерного объекта с применением метода структурно переключаемых обратных связей рассмотрим на примере задачи управления с минимумом расхода энергии. Рассмотрим уравнения движения динамического объекта на горизонтальной плоскости при равных граничных условиях по двум возможным фазовым траекториям:

$$\mathbf{X}(T_1) = \mathbf{X}(0) + \dot{\mathbf{X}}(0)T_1 + \ddot{\mathbf{X}}(0) \frac{T_1^2}{2!} + \dots + \overset{(m)}{\mathbf{X}(0)} \frac{T_1^m}{m!}, \quad (2)$$

$$\mathbf{X}(T_2) = \mathbf{X}(0) + \dot{\mathbf{X}}(0)T_2 + \ddot{\mathbf{X}}(0) \frac{T_2^2}{2!} + \dots + \overset{(r)}{\mathbf{X}(0)} \frac{T_2^r}{r!}, \quad (3)$$

где  $\mathbf{X}(0), \mathbf{X}(T_1) = \mathbf{X}(T_2)$  – векторы начальных и конечных координат;  $T_1, T_2$  – время движения по каждой из траекторий;  $m, r$  – порядок высших производных вектора фазовых координат.

Оценка кинетической энергии, затраченной на движение, показывает, что для траектории, определяемой уравнением (3), при выполнении условия  $m > r$  расход энергии меньший по сравнению с траекторией (2). При этом в случае  $(m - r) = 1$  разница кинетических энергий  $\Delta E = \min$ , а с ростом  $(m - r)$  величина  $\Delta E$  будет также возрастать. Последующий анализ показывает, что оптимальной по минимуму расхода энергии является траектория с наименьшим количеством минимальных по амплитуде производных фазовых переменных, необходимых для выполнения всех граничных условий.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ В ЦЕПЯХ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Переключение управляющих функций обеспечивает требуемый порядок производной фазовой координаты с соответствующим положительным или отрицательным постоянным значением. Синтез управляю-

ющих функций будет состоять в определении управляющих воздействий в цепях обратных связей объекта управления, при которых на определенных заданных отрезках фазовой траектории выполняются условия постоянства соответствующих производных фазовой переменной  $\dot{\mathbf{X}}(t)$ . Таким образом, при движении по координатным осям  $l = \{x, y, z\}$  на каждом отрезке фазовой траектории будет включаться на определенное время  $\Delta t^l$  соответствующая цепь обратной связи, реализующая заданную управляющую функцию.

Моменты переключения управляющих функций в обратной связи будут определяться на основе энергетического анализа (гамильтониана системы), вида планируемых фазовых траекторий с учетом ограничений на управляющее воздействие, необходимых условий оптимальности и заданных граничных условий.

В общем виде процесс управления можно разбить на этапы «разгона» и «торможения» до заданных параметров, например, постоянной скорости движения.

Фазовые уравнения процесса «разгона» до заданной скорости  $\dot{\mathbf{X}}(t_{i+1})$  с последующим движением объекта управления с ее постоянным значением  $\dot{\mathbf{X}}(t_{i+1}) = \text{const}$  до момента времени  $(t_i + 2)$  запишем в виде

Уравнения этапа «торможения» от постоянной скорости  $\dot{\mathbf{X}}(t_{i+1}) = \text{const}$  до нового (заданного) значения скорости  $\dot{\mathbf{X}}(t_m) = \text{const}$  будут иметь вид

$$\begin{aligned}\mathbf{X}(t_{i+3}) &= \mathbf{X}(t_{i+2}) + \dot{\mathbf{X}}(t_{i+2})(t_{i+3} - t_{i+2}) - \dots - \\&\quad - \overset{(k)}{\mathbf{X}}(t_{i+2}) \frac{(t_{i+3} - t_{i+2})^k}{k!};\end{aligned}$$

.....

$$\begin{aligned}\mathbf{X}(t_m) &= \mathbf{X}(t_{m-1}) + \dot{\mathbf{X}}(t_{m-1})(t_m - t_{m-1}) - \\&\quad - \ddot{\mathbf{X}}(t_{m-1}) \frac{(t_m - t_{m-1})^2}{2};\end{aligned}$$

$$\mathbf{X}(t_{m+1}) = \mathbf{X}(t_m) + \dot{\mathbf{X}}(t_m)(t_{m+1} - t_m).$$

При этом  $t_i$  – моменты переключения управляемых функций в цепях обратных связей ( $i = 1, \dots, m$ ).

# СИНТЕЗ СТРУКТУРНО ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Общий порядок синтеза структурно переключаемых систем на основе обратных связей рассмотрен в работах [7, 8]. В данной статье предложенный подход расширяется для замкнутых систем различного вида. При этом обратная связь, замыкающая систему, будет являться главной, а формируемые на основе предложенного метода структурно переключаемые обратные связи – дополнительными. Для управляемой системы (рис. 1), замкнутой единичной обратной связью, динамика описывается векторно-матричным уравнением вида

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}[\mathbf{U}(t) - \mathbf{X}(t)] = (\mathbf{A} - \mathbf{B})\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t). \quad (4)$$

После дифференцирования уравнения (4) получим вторую производную

$$\ddot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B})\dot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t), \quad (5)$$

а после повторения процедуры дифференцирования – третью производную

$$\ddot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{B})\ddot{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t). \quad (6)$$

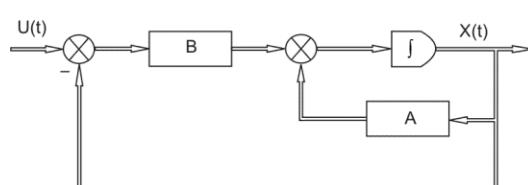
Для траектории вида (2) при  $\ddot{\mathbf{X}}(t) = 0$  после подстановки последовательно уравнения (4) в (5) и дальше в (6) получим уравнение

$$\begin{aligned} \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) = & -(\mathbf{A} - \mathbf{B})^3 \mathbf{X}(t) - \\ & -(\mathbf{A} - \mathbf{B})^2 \mathbf{B}\mathbf{U}(t) - (\mathbf{A} - \mathbf{B})\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t). \end{aligned} \quad (7)$$

После использования преобразования Лапласа с учетом начального значения вектора управляющих функций  $\mathbf{U}_0$  и векторно-матричных преобразований получаем

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1} [ p^2 \mathbf{E} + p(\mathbf{A} - \mathbf{B}) + (\mathbf{A} - \mathbf{B})^2 ]^{-1} \times \\ \times \{ (\mathbf{A} - \mathbf{B})^3 \mathbf{X}(p) - (p\mathbf{B} + [(\mathbf{A} - \mathbf{B})\mathbf{B}] \mathbf{U}_0 + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}_0) \}.$$

Для случая, когда обратная связь не является единичной, а описывается матрицей постоянных параметров



**Рис. 1.** Структурная схема многомерной замкнутой системы

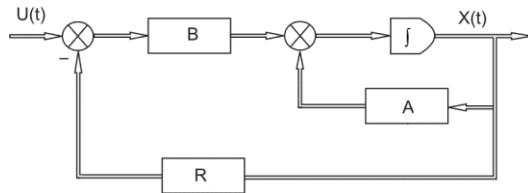


Рис. 2. Структурна схема замкнutoї многомерної системи з обратною зв'язкою, описуваної матрицею  $\mathbf{R}$

метров  $\mathbf{R}$  (рис. 2), векторно-матричне уравнение (4) запишеться в виде

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{X}(t) + \mathbf{BU}(t). \quad (8)$$

Дифференцирование уравнения (8) дает уравнение управляемой системы для траектории движения объекта вида (2) с учетом выполнения условия  $\ddot{\mathbf{X}}(t) = 0$

$$\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) = -(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2\mathbf{X}(t) - (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{BU}(t).$$

При использовании преобразования Лапласа с учетом начального значения вектора управляющих функций  $\mathbf{U}_0$  запишем для вектора управлений:

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1}(p\mathbf{E} + \mathbf{A} - \mathbf{BR})^{-1} \times \\ \times [(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2\mathbf{X}(p) - \mathbf{BU}_0].$$

После повторения процедуры дифференцирования (8) получим уравнение динамики при  $\ddot{\mathbf{X}}(t) = 0$ :

$$\mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) = -(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^3\mathbf{X}(t) - (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2\mathbf{BU}(t) - \\ - (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t);$$

а также, с использованием необходимых преобразований, выражение для вектора управлений:

$$\mathbf{U}(p) = -\mathbf{B}^{-1}[p^2\mathbf{E} + p(\mathbf{A} - \mathbf{BR}) + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2]^{-1} \times \\ \times \{(\mathbf{A} - \mathbf{BR})^3\mathbf{X}(p) - [p\mathbf{B} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}]\mathbf{U}_0 + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}_0\}.$$

В случае переменной обратной связи динамическая система (8) становится нестационарной вида

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{AX}(t) + \mathbf{B}[\mathbf{U}(t) - \mathbf{R}(t)\mathbf{X}(t)] = \\ = [\mathbf{A} - \mathbf{BR}(t)]\mathbf{X}(t) + \mathbf{BU}(t), \quad (9)$$

т. к. матрица  $\mathbf{R}(t)$  будет включать компоненты, которые являются функциями времени. Проведем дифференцирование уравнения (9) и получим, например, для второй производной

$$\ddot{\mathbf{X}}(t) = [-\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2]\mathbf{X}(t) + \\ + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{BU}(t) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t). \quad (10)$$

Далее для третьей производной запишем

$$\ddot{\mathbf{X}}(t) = [-\mathbf{B}\ddot{\mathbf{R}} - 2\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}}(\mathbf{A} - \mathbf{BR}) - (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}} + \\ + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^3]\mathbf{X}(t) + [-2\mathbf{B}\dot{\mathbf{R}} + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})^2\mathbf{B}]\mathbf{U}(t) + \\ + (\mathbf{A} - \mathbf{BR})\mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t). \quad (11)$$

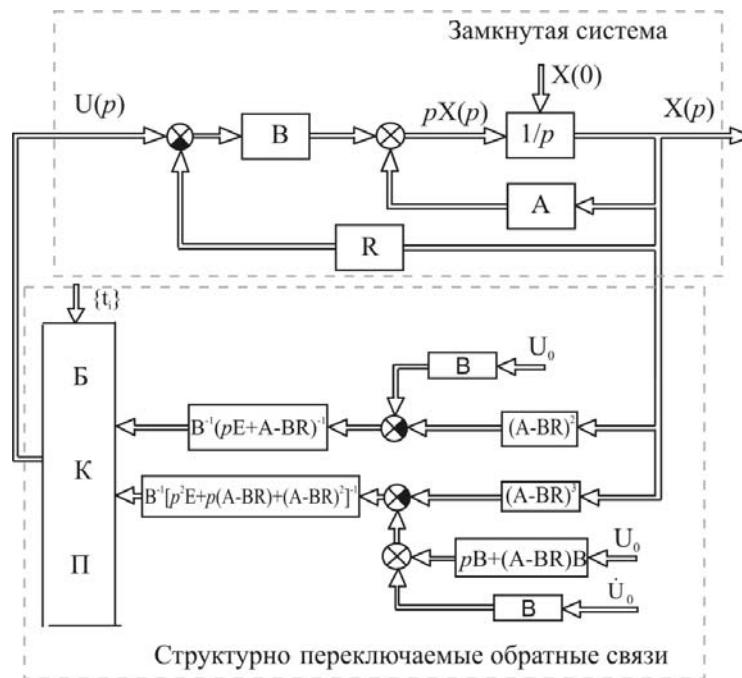


Рис. 3. Структурна схема системи управління вида (8) з додатковими обратними зв'язками (БКП – блок ключей переключення)

$$\begin{aligned} \text{При выполнении условия } \dot{\mathbf{X}} = 0 \text{ будем иметь из (11)} \\ [-2B\dot{R} + (A - BR)^2]BU(t) + (A - BR)B\dot{U}(t) + B\ddot{U}(t) = \\ = [B\ddot{R} + 2B\dot{R}(A - BR) + (A - BR)B\dot{R} - (A - BR)^3]X(t). \end{aligned} \quad (12)$$

Для квазистационарных объектов с медленно изменяющимися параметрами примем, что  $R(t) = R_{\Delta t_c}$ ,  $\dot{R}(t) = \dot{R}_{\Delta t_c}$ ,  $\ddot{R}(t) = \ddot{R}_{\Delta t_c}$  есть матрицы, компоненты которых известны, постоянны («заморожены» [9] на интервале  $\Delta t_c$ ) и независимы для определенного интервала времени  $\Delta t_c$ . Тогда, применяя преобразование Лапласа, получим из уравнения (10) для вектора управления  $U(p)$  при выполнении условия  $\dot{\mathbf{X}}(t) = 0$  с учетом нулевых начальных значений

$$\begin{aligned} U(p) = & -[pB + (A - BR_{\Delta t_c})B]^{-1} \times \\ & \times [-B\dot{R}_{\Delta t_c} + (A - BR_{\Delta t_c})^2]X(p). \end{aligned}$$

Решение преобразованного уравнения (12) относительно  $U(p)$  определяет выражение вектора управляемых функций для выполнения условия  $\dot{\mathbf{X}} = 0$

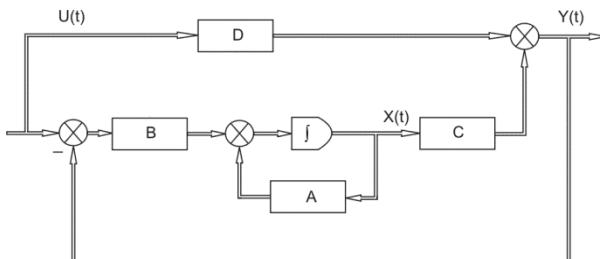
$$\begin{aligned} U(p) = & \{p^2B + p(A - BR_{\Delta t_c})B - \\ & - [2B\dot{R}_{\Delta t_c} - (A - BR_{\Delta t_c})^2]B\}^{-1} \times \\ & \times [B\ddot{R}_{\Delta t_c} + 2B\dot{R}_{\Delta t_c}(A - BR_{\Delta t_c}) + \\ & + (A - BR_{\Delta t_c})B\dot{R}_{\Delta t_c} - (A - BR_{\Delta t_c})^3]X(p). \end{aligned}$$

Для случая, когда на вход стационарной системы (рис. 4) подается вектор наблюдаемых координат  $Y$ , будем иметь векторно-матричное уравнение системы

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = (A - BC)\mathbf{X}(t) + (B - BD)U(t).$$

В результате соответствующих векторно-матричных преобразований вектор управляемых функций  $U(p)$  при условии  $\dot{\mathbf{X}}(t) = 0$  запишется в виде

$$\begin{aligned} U(p) = & -(B - BD)^{-1}(p^{k-1}E + A_k)^{-1} \times \\ & \times [A - BC]^k X(p) - U_0(p), \end{aligned} \quad (13)$$



**Рис. 4.** Структурная схема многомерной системы управления с обратной связью по вектору выходных (наблюдаемых) координат

где матрица  $A_k = \sum_{j=0}^{k-2} (p^j A - BC)^{k-j-1}$ ;  $U_0(p)$  – начальный вектор управляемой функции.

При обратной связи, которая включает матрицу параметров  $R$ , будем иметь уравнение (13) в виде

$$\begin{aligned} U(p) = & -(B - BRD)^{-1}(p^{k-1}E + A_k)^{-1} \times \\ & \times [(A - BRC)^k X(p) - U_0(p)]. \end{aligned}$$

При переменной обратной связи  $R(t)$  динамика управляемой системы примет вид

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = [A - BR(t)C]\mathbf{X}(t) + [B - BR(t)D]U(t). \quad (14)$$

Преобразование уравнения (14) для квазистационарной системы аналогично (10) и решение относительно  $U(p)$  определяют выражение вектора управляемых функций при условии  $\dot{\mathbf{X}}(t) = 0$

$$\begin{aligned} U(p) = & \{p(B - BR_{\Delta t_c} D) + \\ & + [(A - BR_{\Delta t_c} C)(B - BR_{\Delta t_c} D) - B\dot{R}_{\Delta t_c} D]\}^{-1} \times \\ & \times [B\dot{R}_{\Delta t_c} C - (A - BR_{\Delta t_c} C)^2]X(p). \end{aligned}$$

Полученные значения управляемых функций дают возможность для разных типов динамических систем обеспечить движение многомерного объекта по заданной оптимальной траектории движения.

## ВЫВОДЫ

Предложенный метод структурно переключаемых обратных связей для синтеза управляемых воздействий позволяет для широкого класса многомерных подвижных объектов решать практические задачи построения оптимальных фазовых траекторий для различных условий оптимальности движения и вида граничных условий. Данный подход не требует непосредственного измерения производных фазовых переменных на выходе объекта управления, а определение моментов переключения управляемых функций осуществляется путем решения системы алгебраических уравнений. Полученные решения для вектора управляемых функций замкнутых систем различного типа обеспечивают движение многомерного подвижного объекта по оптимальным траекториям. Результаты реализации предложенного подхода для синтеза систем управления широким классом динамических объектов [10, 11], в том числе морских подвижных объектов, при решении задач их стабилизации в условиях ограниченных акваторий подтверждают работоспособность и эффективность применения метода структурно переключаемых обратных связей в замкнутых системах управления различного типа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габасов, Р. Реализация ограниченной обратной связи в нелинейной задачей регулирования / Р. Габасов, Ф. М. Кириллова, Е. А. Ружицкая // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – № 1 – С. 108–116.
2. Ларин, В. Б. Стабилизация системы обратной связью по выходной переменной / В. Б. Ларин // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 2. – С. 5–18.
3. Крутько, П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / П. Д. Крутько – М. : Машиностроение, 2004. – 576 с.
4. Krutko, P. D. Symmetry and inverse problems of control system dynamics / P. D. Krutko // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1996. – № 6. – С. 17–46.
5. Крутько, П. Д. Робастно устойчивые структуры управляемых систем высокой динамической точности. Алгоритмы и динамика управления движением модельных объектов / П. Д. Крутько // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 2. – С. 120–140.
6. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского – М. : Наука, 1987. – 711 с.
7. Тимченко, В. Л. Оптимальное управление линейным объектом на основе метода структурно-переключаемых обратных связей // Вісник НТУ «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Інформатика та моделювання». – 2009. – № 13. – С. 167–176.
8. Тимченко, В. Л. Синтез оптимальных структурно-переключаемых систем управления многомерным объектом под воздействием возмущений / В. Л. Тимченко // Техническая электродинамика. Тем. выпуск «Проблемы сучасної електротехніки». Ч. 1. – Інститут електродинаміки НАНУ, Київ. 2010. – С. 77–81.
9. Соловьев, А. В. Линейные автоматические системы с переменными параметрами / А. В. Соловьев, Ф. С. Петров. – М. : Наука, 1971. – 620 с.
10. Патент 53614 Україна МПК (2009) G05B 11/01. Спосіб керування багатовимірним динамічним об'єктом / Тимченко В. Л., Кондратенко Ю. П., Кукліна К. О. ; власник патенту Національний університет кораблебудування. – № u201004692; заявл. 20.04.2010; надрук. 11.10.2010. Бюл. № 3.
11. Патент 57100 Україна МПК (2011.01) G05B 11/01. Спосіб робастного керування багатовимірним динамічним об'єктом / Тимченко В. Л., Кондратенко Ю. П., Кукліна К. О. ; власник патенту Національний університет кораблебудування. – № u201008990; заявл. 19.07.2010; надрук. 10.02.2011. Бюл. № 19.

Надійшла 4.11.2010

Тимченко В. Л., Кондратенко Ю. П.

## СИНТЕЗ СТРУКТУРНО ПЕРЕМІКАЛЬНИХ СИСТЕМ ДЛЯ КЕРУВАННЯ БАГАТОВИМІРНИМИ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

У статті розглядається застосування методу структурно перемікальних зворотних зв'язків до синтезу замкнених систем керування багатовимірними рухомими об'єктами. Сформовано принципи побудови оптимальних траєкторій руху об'єктів і визначення моментів перемикання керуючих функцій в ланцюгах зворотних зв'язків, отримано значення вектора керувань для замкнених систем різного типу.

**Ключові слова:** багатовимірні рухи мі об'єкти, структурно перемікальні зворотні зв'язки, замкнені системи керування.

Tymchenko V. L., Kondratenko Y. P.

## SYNTHESIS OF STRUCTURALLY COMMUTED SYSTEMS FOR MULTIDIMENSIONAL MOVING OBJECTS CONTROL

The authors apply the method of structurally commuted feedbacks for controlling functions synthesis in closed loop systems of multidimensional moving objects control. The principles of optimal object trajectory construction and determination of controlling functions switching moments in feedback circuits are formulated; the values of control vector are obtained for different types of closed loop systems.

**Key words:** multidimensional moving objects, structurally commuted feedbacks, closed loop control systems.

# УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

---

---

УДК.681.513.2

Рязанцев О. І.<sup>1</sup>, Кардашук В. С.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, завідувач кафедри Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, м. Сєвєродонецьк  
<sup>2</sup>Канд. техн. наук, старший викладач Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля, м. Сєвєродонецьк

#### МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛІЗУ

---

Запропоновано методи керування процесом аерозольного нанокаталізу з використанням сучасних програмно-технічних засобів. Проведено декомпозицію об'єкта керування на підсистеми. Визначено основні задачі автоматизації керування за рахунок підтримки значень змінних – температури, частоти вібрації, амплітуди коливань реактора, компенсації збурень в заданих межах.

**Ключові слова:** аерозольний нанокаталіз, параметри, підсистеми, динамічне програмування, програмно-технічні засоби.

#### ВСТУП

Проблема науково обґрунтованого підходу при проектуванні систем автоматизації керування (САК) складними хіміко-технологічними процесами, впровадження методів і алгоритмів керування технологічним процесом аерозольного нанокаталізу для знешкодження широкого спектру відходів хлорорганічного синтезу є актуальною задачею в зв'язку з високими темпами накопичення промислових відходів хімічних виробництв [1].

Актуальність питання знешкодження широкого спектру відходів хлорорганічного синтезу викликана тим фактором, що хімічні сполуки, які утворюються в результаті промислової діяльності, негативно впливають на стан екологічної безпеки і здоров'я людини.

Метою даної статті є аналіз параметрів технологічного процесу аерозольного нанокаталізу, функцій системи автоматизації, обґрунтування та вибір методів керування, оптимізації в підсистемах технологічного процесу та програмно-технічних засобів для їх реалізації.

Дослідження теоретичних основ процесів хімічної технології, широке застосування програмно-технічних засобів (ПТЗ) створюють умови для переходу на якісно нові методи аналізу та проектування системи керування складними хіміко-технологічними процесами. При цьому зменшуються витрати на створення проміжних, дослідно-конструкторських установок, збільшується надійність та екологічна безпека проектних рішень.

## АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛІЗУ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

З метою розробки методів керування здійснено дослідження кінетики процесу аерозольного нанокаталізу, що проводився в трубчатому безградієнтному каталітичному віброреакторі в газовій фазі. Нагрів реакційного об'єму лабораторної установки проводився електричним нагрівачем (рис. 1).

Для визначення основних характеристик процесу аерозольного нанокаталізу в реактор подавався діхлоретан (ДХЕ – хімічна формула  $C_2H_4Cl_2$ ) як одинин з основних компонентів відходів виробництва вінілхлориду [2].

При проведенні експериментів проводились дослідження впливу температури, концентрації каталізатора, частоти коливань реактора на процес роз-

кладу ДХЕ. З метою більш глибшого розуміння процесів, що проходять в реакторі, був проведений термодинамічний аналіз основних реакцій, що дозволив вияснити умови ефективного здійснення даного процесу і якісно зв'язати весь хлор сировини в хлористий водень.

Встановлено, що температура, співвідношення реагентів, концентрація каталізатора, значення вібрації дозволяють керувати кінетикою процесу. В результаті досліджень отримано залежність швидкості реакції розкладу ДХЕ від частоти коливань реактора (рис. 2).

Дослідження процесу аерозольного нанокаталізу показали, що з перебігом часу склад вихідних газів не змінюється. Це свідчить про те, що процес аерозольного нанокаталізу стійкий з перебігом часу і активність каталізатора не зменшується, а також дозволили визначити значення константи швидкості

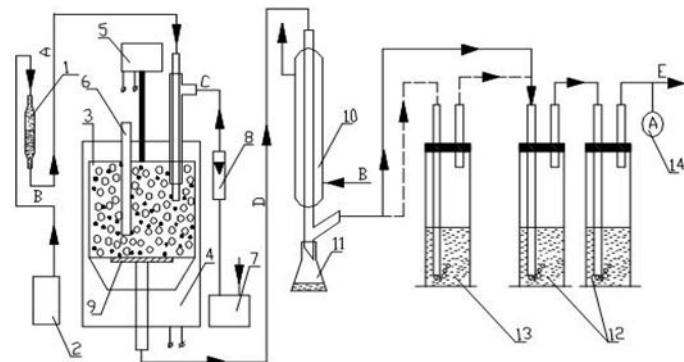


Рис. 1. Структурна схема лабораторної установки аерозольного нанокаталізу:

1 – воронка; 2 – дозатор; 3 – реактор; 4 – електрична пічка; 5 – магнітний пристрій; 6 – карман для термопари; 7 – компресор; 8 – ротаметр; 9 – фільтр; 10 – водяний холодильник; 11 – приймач конденсату; 12 – барботери; 13 – барботер для відбору проб на  $HCl$  і  $Cl_2$ ; 14 – точка відбору газових проб, А – 1,2-діхлоретан; В – вода; С – повітря; D – продукти реакції; Е – в атмосферу

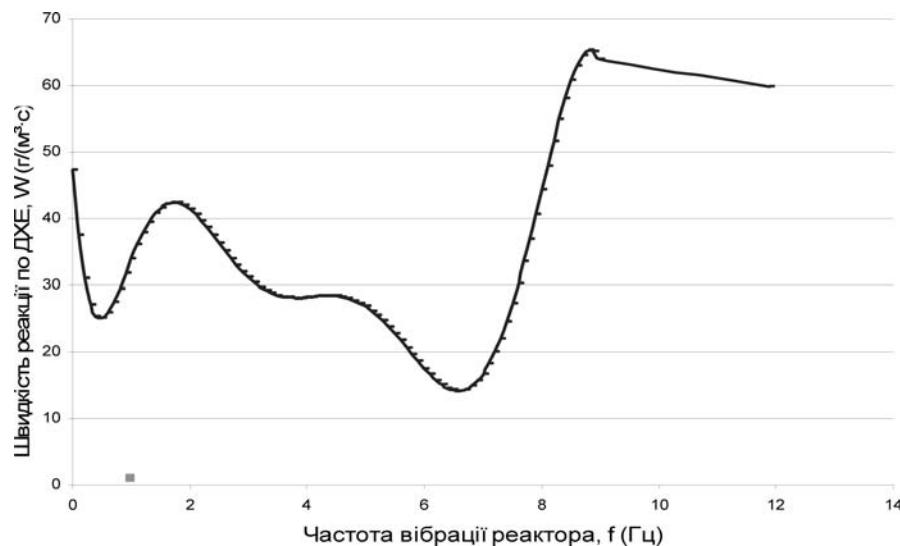


Рис. 2. Залежність швидкості реакції від частоти вібрації реактора

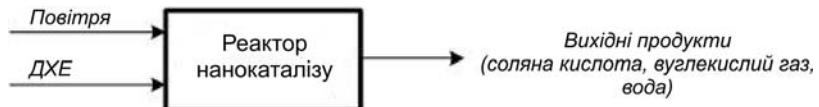


Рис. 3. Матеріальні потоки процесу аерозольного нанокаталізу

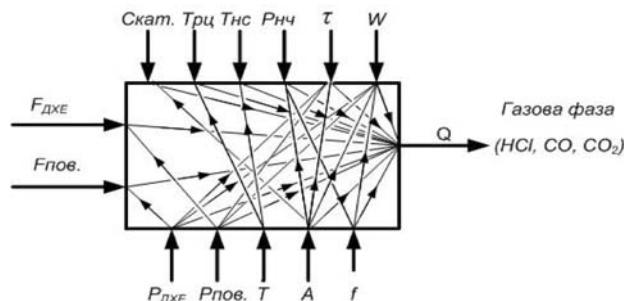


Рис. 4. Параметри процесу аерозольного нанокаталізу

і енергію активації ( $E$ ) при концентрації каталізатора  $2,4 \text{ г}/\text{м}^3_{\text{р.об}}$ . Значення енергії активації склало  $71,2 \text{ кДж}/\text{моль}$ . При таких параметрах процес протікає в кінетичній області. Важливо, що в продуктах реакції не виявлено молекулярного хлору.

Екологічна безпека тісно пов'язана з безпекою функціонування хімічно небезпечних об'єктів і залежить від багатьох факторів: надійності систем автоматизації, протиаварійного захисту та ін. Огляд літератури показав, що автоматизація процесів нанохімічних технологій знаходиться на початковому етапі свого розвитку.

Аналіз процесу аерозольного нанокаталізу дозволив провести структурну декомпозицію матеріальних потоків (рис. 3).

Виходячи з рівняння матеріального балансу хімічної реакції, що проходить в реакторі нанокаталізу, розраховано питому вагу кожного компонента в процентному відношенні, яка складає для входних продуктів – ДХЕ – 55 %, кисню – 45 %, вихідних продуктів – вуглекислого газу – 49 %, соляної кислоти – 40 %, води – 11 %.

Протікання реакторних процесів характеризується швидкістю реакції ( $W$ ) і ступенем перетворення початкової сировини в продукти реакції ( $x_a$ ). На ці показники впливають концентрація реагентів, температура всередині реактора, активність каталітичної системи (каталізатор і скляні кульки), вібрація та ін. Метою керування є одержання заданого складу вихідних продуктів шляхом впливу на ці параметри.

З метою повного використання реагентів в реакторі підтримувалось задане співвідношення їх витрат. При незначній зміні загрузки реактора за допо-

могою САК забезпечувались витрати реагентів, що подаються в реактор.

Як підкреслено в [2], швидкість гетерогенних реакцій пропорційна величині поверхні дотику реагентів. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що вібрація в процесі аерозольного нанокаталізу відіграє ключову роль і є предметом подальших досліджень.

Вплив частоти вібрації як пріоритетної змінної керування на швидкість процесу аерозольного нанокаталізу пояснюється зміною активності частинок каталізатора та реагентів. Вібраційним впливом вирішуються дві задачі процесу: активація поверхні та запобігання спіканню каталізатора. Фактично при зміні частоти коливань з'являються нові властивості поверхні каталізатора та активності наночасток [3].

Таким чином, побічний вплив на розмір наночасток здійснюється через температуру, частоту, амплітуду вібрації та співвідношення реагентів. Вплив факторів збурення – концентрації каталізатора, розміру наночасток – є предметом подальших досліджень в області нанокаталізу та нанотехнологій.

В роботі [4] запропоновано метод вирішення задачі контролю за станом об'єкта в умовах невизначеності щодо запасів каталізатора за допомогою теорії нечітких множин та обробки нечіткої інформації в системах прийняття рішень.

На основі проведеного аналізу зроблено висновок, що розглянутий процес є складним багатоз'язним об'єктом керування. Виділено основні групи параметрів, що визначають хід процесу та характеризують його стан (рис. 4) [5].

Проведений аналіз дозволив виділити такі групи параметрів:

а) вхідні параметри – вхідний потік ДХЕ ( $F_{ДХЕ}$ ), вхідний потік повітря ( $F_{пов.}$ );

б) змінні параметри керування – витрати ДХЕ ( $P_{ДХЕ}$ ), витрати повітря ( $P_{пов.}$ ), температура ( $T$ ), частота вібрації ( $f$ ), амплітуда ( $A$ );

в) параметри збурення – концентрація каталізатора ( $C_{кат.}$ ), температура реакції ( $T_{рец.}$ ), температура навколошильного середовища ( $T_{нс}$ ), розмір наночастинок ( $P_{нч}$ ), час контакту ( $\tau$ ), швидкість реакції ( $W$ );

г) вихідні параметри – ступінь перетворення  $x_a$ , вміст у вихідних продуктах вуглекислого газу ( $CO_2$ ), чадного газу ( $CO$ ), соляної кислоти ( $HCl$ ), хлору ( $Cl_2$ ).

Таким чином, для якісного керування процесом аерозольного нанокatalізу для параметрів  $F_{ДХЕ}$  і  $F_{пов.}$  необхідно підтримувати співвідношення ДХЕ до кисню як 1 до 2,5 ( $\alpha = 1$ ) при температурі в реакторі 600 °C, частоті вібрації 10–12 Гц та амплітуді  $8 \cdot 10^{-3}$  м. Об'єм реактора під час проведення експериментів складав  $0,0042 \text{ м}^3$ .

При проведенні експериментів встановлено, що для незворотності процесу коефіцієнт  $\alpha$  в подальших розрахунках необхідно прийняти як 1,02.

Отримані під час проведення експериментів значення використані як значення уставок на верхньому рівні автоматизації [6].

## ФУНКЦІЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ

Для реалізації задач автоматизації керування з виконанням необхідних вимог (якість керування, точність та ін.) необхідні відповідні ПТЗ, що застосовуються в САК.

САК процесом аерозольного нанокatalізу представлено як програмно-технічний комплекс (ПТК), що об'єднує вимірювальні датчики, виконавчі пристрої,

механізми, програмно-логічний контролер (ПЛК) нижнього рівня ієархії з робочою станцією верхнього рівня і далі з рівнем керування підприємством. Метою функціонування САК є забезпечення ефективного керування шляхом відповідного вибору керуючих дій.

Для процесу аерозольного нанокatalізу визначено вхідні впливи, встановлено залежності між вхідними та вихідними параметрами об'єкта керування, реалізовано автоматичну зміну вхідних параметрів і керування.

Найбільш поширеною в САК є задача стабілізації, коли потрібно з заданою точністю підтримувати постійними визначені параметри процесу. Для рішення цієї задачі розроблено математичну модель процесу аерозольного нанокatalізу [5].

Задача автоматизації керування процесом аерозольного нанокatalізу вирішена таким чином: за отриманими даними про стан об'єкта керування реалізована така послідовність керуючих впливів, що функціонування САК забезпечило задовільну якість процесу за узагальненим критерієм – відсутності молекулярного хлору у вихідних продуктах (рис. 5).

Реалізація функцій верхнього рівня в САК забезпечується за допомогою робочої станції. Робоча станція займається обробкою, представленням технологічної інформації, її архівуванням, аналізом, а також виконує статистичні, мережеві функції, веде моніторинг стану ПТЗ [6].

Широке застосування в системах автоматизації технологічних процесів знайшли робочі станції фірми Advantech, які виконані на базі відмовостійких платформ серії IPC-610, IPC-615 і забезпечують ступінь захисту IP65.

На основі таких робочих станцій будуються автоматизовані робочі місця операторів-технологів. Розгалужену мережу каналів передачі інформації в системах автоматизації технологічних процесів забезпечують мережеві контролери Ethernet, RS-485 та багатоканальні модулі вводу-виводу інтерфейсу RS-232.



Рис. 5. Загальна схема системи керування процесом аерозольного нанокatalізу

В робочій станції за допомогою мережевих пристрій зв'язку надходить технологічна інформація від ПЛК нижнього рівня, яка вже пройшла первинну обробку і яка служить основою для представлення реального стану процесу на мнемосхемах, реєстрації історії, оптимізаційних розрахунків.

Як операційна система обрана операційна система реального часу QNX фірми QSSL (QNX Software System Ltd.).

Реалізацію функцій нижнього рівня забезпечує ПЛК, який входить до складу технологічної мережі і виконує функції вводу інформації з аналогових і дискретних вхідних каналів, первинну обробку прийнятої інформації (фільтрацію, лінеаризацію, масштабування, перетворення в фізичні величини сигналів, контроль на достовірність, реєстрацію подій), функції керування (цифрове ПД-регулювання, керування виконавчими пристроями, інтелектуальне керування), функції технологічного захисту і блокування.

Гнучкість ПЛК полягає в можливості застосування під конкретні задачі широкої номенклатури аналогово-цифрових перетворювачів, модулів формування дискретних сигналів (МФДС), модулів вводу дискретних сигналів (МВДС) та ін. [7].

Для накопичення і подальшого використання оперативним персоналом інформації про перебіг процесу і дії персоналу передбачена функція архівування. Архів заповнюється при виникненні зміни стану процесу, а також через певні проміжки часу для фіксації параметрів.

Важливий критерій, який намагаються мінімізувати при обробці сигналів нижнього рівня – додаткова похибка, що вноситься при обробці аналогових сигналів, яка в даній САК не перевищує 0,1–0,15 %.

При проектуванні і розробці САК разом з правильним вибором ПТЗ, мережевого обладнання, програмних протоколів керування мережею велике значення має і розподілення програмних модулів між робочою станцією та ПЛК. При коректному розпо-

діленні задач можна збільшити продуктивність САК, зменшити час реакції на події.

## МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ АЕРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛІЗУ

Особливістю сучасних процесів хімічної технології є велика швидкість протікання реакцій при високих температурах та їх складність, що насамперед полягає у нелінійній залежності між вхідними і вихідними параметрами. При швидкому перебігу процесу ефективна САК є вирішенням проблеми досягнення необхідної швидкодії процесів керування.

Процес аерозольного нанокатализу належить до маловивчених і складних, що визначило експериментально-аналітичний метод дослідження з проведенням активного експерименту для розробки методів керування.

Моделювання як метод дослідження є важливим етапом при проектуванні САК (рис. 6).

На основі розробленої математичної моделі виконано аналіз технологічних підсистем об'єкта керування [5].

При аналізі спеціальної літератури не виявлено математичного опису процесу аерозольного нанокатализу, тому в подальшому для його опису використані рівняння, що описують кінетику реактора змішування та рівняння, що описують функціональні підсистеми процесу аерозольного нанокатализу [5].

Згідно з функціональним призначенням були визначені такі основні підсистеми процесу аерозольного нанокатализу:

- нагріву;
- змішування реагентів;
- вібрації.

Слід відзначити необхідність використання адаптації в підсистемах процесу аерозольного нанокатализу, що викликано залежністю змінних від стану процесу.



Рис. 6. Структура схеми математичного моделювання

Для реалізації запропонованого методу створюються канали керування підсистемами, за допомогою яких здійснюється вплив на об'єкт керування

$$Y = F(X, U), \quad (1)$$

де  $F$  – функціональна залежність між вхідними параметрами  $X$  та вихідними параметрами  $Y$ , яка враховує керування  $U$ .

Залежність (1) є основою для створення методів керування, визначення форми її реалізації та необхідного ступеню автоматизації.

Для автоматизації керування з використанням ПЛК визначено мету  $Z^*$  керування, а також розроблено алгоритм керування  $\phi$ , що дозволяє досягти поставленої мети на підставі поточної інформації про стан об'єкта керування та середовища:

$$U = \phi(X, Y, Z^*). \quad (2)$$

Об'єкт керування сприймає навколоєне середовище як сукупність значень деякого набору параметрів

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_n), \quad (3)$$

кожний з яких може бути змінений:

$$S(U) = (S_1(U), S_2(U), \dots, S_n(U)). \quad (4)$$

Процес моделювання передбачає знаходження характеру залежності стану об'єкта  $F$  від його вхідних параметрів  $X$ , параметрів збурення  $G$  і керування  $U$ :

$$Y = F(X, G, U). \quad (5)$$

Експертний метод рішення є основним в структурному аналізі моделі і передбачає упорядкування вхідних і вихідних параметрів об'єкта керування.

Параметричний аналіз моделі пов'язаний з визначенням параметрів  $C = (c_1, c_2, \dots, c_n)$  моделі:

$$Y = F(X, G, U, C), \quad (6)$$

де вибрана на попередньому етапі структура  $St$  відображення в модельному операторі. При такому підході, очевидно, треба мати інформацію про поведінку цих параметрів. Тут можливі два підходи: ідентифікація та планування експерименту.

Ідентифікація параметрів моделі  $F$  пов'язана з оцінкою чисельних значень параметрів в стаціональному режимі, тобто без організації керуючих впливів на нього. Вихідною інформацією для ідентифікації є структура  $St$  та спостереження за поведінкою входу  $X(t)$  та виходу  $Y(t)$ .

Таким чином, пара

$$J(t) = \langle X(t), Y(t) \rangle, \quad (7)$$

отримана в режимі нормального функціонування системи, є основним джерелом інформації при ідентифікації.

Для з'ясування залежності виходу  $Y(t)$  від параметрів  $X(t)$ ,  $G(t)$ ,  $U(t)$  може бути застосовано експеримент.

В САК збурення, як правило, не носять хаотичний характер. Вони або повільно змінюються в часі, або є стрибкоподібними. Якщо попередньо що-небудь сказати про характер збурення не можна, то при розробці системи розрахунок ведеться для деяких типових збурень. Одним з таких типових збурень є збурення типу «стрибок». Для визначення динамічних властивостей об'єкта керування визначається реакція величини, що регулюється, на типові збурення. Найбільш поширеним є використання кривої розгону – функції зміни параметра в часі, яка викликана разовим стрибкоподібним збуренням на вході [8].

Процес керування передбачає прийняття рішення для значення  $U$ , щоб в ситуації  $S$ , що склалась, досягнути заданої мети  $Z^*$ . Це рішення базується на використанні моделі  $F$ , мети  $Z^*$ , отриманої інформації про стан  $X$ ,  $Y$ , а також на наявності ресурсів керування  $R$ , які є обмеженнями, що накладаються на  $U$ . Адаптація є частковим випадком керування і полягає в зміні фактора керування  $U$  таким чином, щоб підтримувати деякі функціонали об'єкта керування в потрібному стані, незалежно від дії всякого роду зовнішніх та внутрішніх дій. При цьому специфіка об'єкта накладає на керування вимогу

$$U \in S, \quad (8)$$

де  $S$  – множина допустимих керувань.

При аналізі методів, що використовуються для оптимізації параметрів ТП, важливу роль відіграє проблема розмірності векторів стану та керуючих впливів. Так, метод динамічного програмування дав можливість розбити задачу вибору оптимального керування всього об'єкта  $U^{(i)}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) на  $n$  задач, в кожній з яких вибирається тільки одне керування  $U^{(i)}$  [9].

Адаптація для процесу аерозольного нанокatalізу виникає в тому випадку, коли відсутня інформація, необхідна для оптимізації об'єкта керування (рис. 7).

При дослідженні процесу аерозольного нанокatalізу встановлено, що ефективність кожної підсистеми оцінюється скалярною величиною

$$r_i = r_i^*(x^i, u^i), \quad (9)$$

заданою у вигляді функції від змінних стану підсистеми  $x^i$  та застосованого в цій підсистемі керування  $u^i$ .

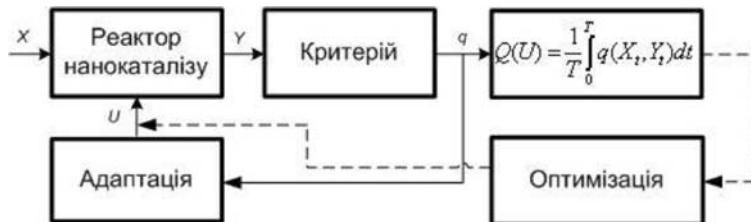


Рис. 7. Структурна схема адаптації та оптимізації

Результатуюча оцінка ефективності в цілому визначена як адитивна функція результатів, отриманих від кожної підсистеми:

$$R_n = \sum_{i=1}^n r_i(x^i, u^i), \quad (10)$$

де  $r_i$  – критерій оптимальності підсистеми;  $x^i$  – технологічні параметри підсистеми;  $u^i$  – оптимальне керування технологічними параметрами підсистеми.

Таким чином, задача оптимізації сформульована як задача знаходження оптимальної стратегії:

$$\tilde{U}_{n_{\text{опт.}}} = (U_{1_{\text{опт.}}}, U_{2_{\text{опт.}}}, \dots, U_{n_{\text{опт.}}}), \quad (11)$$

яка максимізує величину  $R_n$ .

Позначимо через  $F_n$  максимальне значення критерію  $R_n$ , яке можна отримати при використанні оптимальної стратегії керування  $\tilde{U}_{n_{\text{max}}}$ . Очевидно, що  $F_n$  також залежить від стану всіх підсистем процесу і може бути визначена як

$$F_n(x) = \max R_n x^i. \quad (12)$$

Процедура застосування принципу оптимальності для процесу аерозольного нанокаталізу, який складається з  $n$  підсистем, починається з останньої стадії, для котрої не існує наступних стадій, які, згідно принципу оптимальності, не можуть вплинути на вибір оптимального керування.

Для реалізації пошуку оптимальних значень змінних в підсистемах для процесу аерозольного нанокаталізу застосовано метод пошуку максимального значення функції за сіткою змінних, суть якого для функції однієї змінної полягає в тому, що значення функції  $x(t)$  розраховується для  $n$  рівновіддалених значень незалежної змінної  $t$  в інтервалі її зміни  $t(0) \leq t \leq t(n)$ . Очевидно, що при застосуванні такого методу похибка в визначені положення зменшується із збільшенням кількості вимірювань  $n$ .

В даному методі виникає проблема визначення самої величини  $n$ . Збільшення її значення призводить до надмірних операцій обчислення, що позначається на продуктивності всієї системи, оскільки є ще інші параметри, які також треба обчислювати.

Задача ускладнюється, якщо шукається екстремум функції двох змінних  $x(t_1)$  та  $x(t_2)$  в області зміни параметрів, які характеризуються нерівностями

$$t_1^{(0)} \leq t_1 \leq t_1^{(n)}, \quad t_2^{(0)} \leq t_2 \leq t_2^{(n)}. \quad (13)$$

При такій постановці задачі значення функції в усіх вузлах сітки дорівнює  $n^2$ .

Для САК процесом аерозольного нанокаталізу зазначено, що кожна підсистема оптимізує свою цільову функцію, а верхній рівень координує рішення підсистем нижнього рівня для досягнення оптимального критерію глобальної цільової функції та реалізації методу чіткої (жорсткої) координації, який полягає в тому, що для параметра, який координується, в кожен момент часу встановлюється вимога

$$K(t) = K. \quad (14)$$

## ВИСНОВКИ

В результаті аналізу процесу аерозольного нанокаталізу та запропонованих методів керування отримано такі практичні результати.

1. Досліджено процес аерозольного нанокаталізу як складний багатозвязаний об'єкт керування, здійснено аналіз методів та програмно-технічних засобів реалізації задач керування. Наведено структурну схему та взаємозв'язок основних параметрів процесу аерозольного нанокаталізу.

2. Проведено декомпозицію процесу на підсистеми стабілізації температури, вібрації, амплітуди та змішування реагентів. Виділено основні задачі автоматизації керування за рахунок регулювання температури, частоти вібрації, амплітуди коливань реактора, співвідношення реагентів в заданих межах та компенсації збурень з метою забезпечення максимального питомого виходу цільового продукту та повної відсутності хлору у вихідних продуктах.

3. Відзначено доцільність використання для автоматизації керування методу динамічного програмування, що дозволяє розбити загальну задачу керування технологічним процесом на  $n$  задач, в кожній з яких визначається лише одна змінна керування.

4. Показано, що ефективність кожної підсистеми може бути оцінена скалярною величиною, заданою у вигляді функції від технологічних параметрів підсистеми та застосованого в ній керування. Загальна оцінка ефективності технологічного процесу в цілому визначена як адитивна функція результатів, отриманих від кожної підсистеми. Сформульовано задачу знаходження оптимальної стратегії керування, яка максимізує таку глобальну функцію.

5. Згідно з проведеною декомпозицією створено відповідні канали керування, за допомогою яких здійснюється вплив на стан технологічного процесу.

6. Визначено мету та алгоритм функціонування програмно-логічного контролера, що функціонує в складі загальної системи автоматизації для забезпечення ефективного керування на основі інформації про стан процесу аерозольного нанокатализу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рязанцев, А. И. Применение современных технологий при проектировании многоканальных блоков ввода-вывода для систем экологического мониторинга / А. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Системы контроля и управления технологическими процессами : сб. науч. статей ; под общей ред. В. В. Елисеева. – Луганск : Світлиця, 2006. – С. 258–265.
2. Гликин, М. А. Оксидегидрохлорирование отходов. Аэрозольный нанокатализ с утилизацией хлора / М. А. Гликин, Л. А. Баранова, И. Н. Сологуб // Хімічна промисловість України. – 2006. – № 2. – С. 19–25.
3. Рязанцев, О. И. Дослідження та застосування методу керування підсистемою вібрації для процесу аерозольного нанокатализу / О. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. – № 9(151). – С. 184–189.
4. Рязанцев, О. И. Керування процесом аерозольного нанокатализу в умовах невизначеності по запасам каталізатора / О. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2010. – № 6(148). – Ч. 2. – С. 94–98.
5. Рязанцев, О. И. Побудова математичної моделі технологічного процесу аерозольного нанокатализу у віброзрідженному шарі для організації керування / О. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – № 6(136). – Ч. 1. – С. 274–279.
6. Рязанцев, О. И. Система автоматизації керування технологічним процесом аерозольного нанокатализу у віброзрідженному шарі / О. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1(22). – С. 164–172.
7. Рязанцев, А. И. Система управления на базе современных программно-технических средств процессами утилизации отходов химических производств по технологии нанокатализа / А. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2008. – № 8(126). – Ч. 1. – С. 318–326.
8. Кардашук, В. С. Методи керування підсистемою температури для процесу аерозольного нанокатализу в системах утилізації відходів хлорорганічного синтезу / Кардашук В. С., Рязанцев О. И. // Технология-2010 : XIII Всеукраїнська наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених з міжнар. участию, 22–23 квітня 2010 р. : матеріали. – Северодонецьк, 2010. – Ч. 1. – С. 97–99.
9. Рязанцев, О. И. Застосування методу динамічного програмування для реалізації задачі оптимізації технологічного процесу аерозольного нанокатализу у віброзрідженному шарі / О. И. Рязанцев, В. С. Кардашук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – 2009. – № 12(142). – Ч. 2. – С. 109–116.

Надійшла 16.11.2010

Рязанцев А. И., Кардашук В. С.

## МЕТОДЫ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АЭРОЗОЛЬНОГО НАНОКАТАЛИЗА

Предложены методы управления процессом аэрозольного нанокатализа с применением современных программно-технических средств. Проведена декомпозиция объекта управления на подсистемы. Определены основные задачи автоматизации управления за счет поддержания значений переменных – температуры, частоты вибрации, амплитуды колебаний реактора, компенсации возмущений – в заданных пределах.

**Ключевые слова:** аэрозольный нанокатализ, параметры, подсистемы, динамическое программирование, программно-технические средства.

Ryazantsev A. I., Kardashuk V. S.

## METHODS AND PROGRAM-TECHNICAL MEANS FOR AEROSOL NANOCATALYSIS AUTOMATIC CONTROL

The authors propose the method of aerosol nanocatalysis control using modern program-technical means. The object of control is resolved into subsystems. The main tasks of control automation are realized by maintaining the values of variables – temperature, vibration frequency, reactor vibration amplitude, disturbances compensation – within the specified limits.

**Key words:** aerosol nanocatalysis, parameters, subsystems, dynamic programming, program-technical means.

# 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 змагання вчених ступенів доктора і кандидата технічних наук і фізико-математичних наук (фізики).

Статті, що опубліковано в журналі, реферуються в реферативних журналах і базах даних ВІНІТІ (Росія) і «Джерело» (Україна). Інтернет-сторінка журналу:

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

Журнал видається два рази в рік і розповсюджується по підписці в Україні. 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) оригінал експертного висновку про можливість відкритого опублікування статті;
- 3) супровідний лист-клопотання з організації, де була виконана робота (або лист автора);
- 4) рецензію від фахівця в даній області з вченим ступенем доктора наук. Підпис рецензента обов'язково мусить бути завірений.

5) диск з наступними файлами:

- 1) електронна версія статті, повністю ідентична роздруківці;
- 2) відомості про авторів;
- 3) 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, про-

міжних 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 відповідати 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 обґрунтuvанням 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-блі 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 однорівнева.

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 згадування 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) робочу чи домашню і електронну адресу;
- 6) робочий, домашній, мобільний телефон.

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**

№ 1/2011

Науковий журнал

Головний редактор – д-р техн. наук Піза Д. М.

Заст. головного редактора – канд. техн. наук Дубровін В. І.

Комп’ютерне моделювання та верстання

Новікова К. О.

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

*Підписано до друку 30.06.2011. Формат 60x84/8.  
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 20,2.  
Тираж 300 прим. Зам. № 1182.*

69063 м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64