

Міністерство освіти і  
науки України

Ministry of Education and  
Science of Ukraine

Министерство образования и  
науки Украины

Запорізький національний  
технічний університет

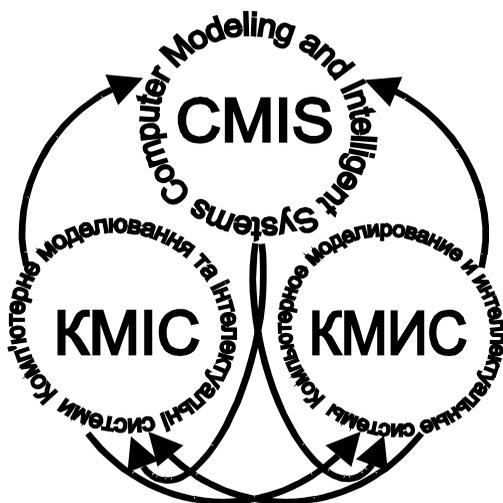
Zaporozhye National  
Technical University

Запорожский национальный  
технический университет

---

# Комп'ютерне моделювання та інтелектуальні системи

з б і р н и к н а у к о в и х п р а ц ь



# Computer Modeling and Intelligent Systems

proceedings

# Компьютерное моделирование и интеллектуальные системы

с б о р н и к н а у ч н ы х т р у д о в

---

Запоріжжя

Zaporozhye

Запорожье

2007

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний технічний університет

**КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ  
ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

За редакцією доктора технічних наук, професора Д.М. ПІЗИ,  
кандидата технічних наук, доцента С.О. СУББОТИНА

---

Ministry of Education and Science of Ukraine  
Zaporozhye National Technical University

**COMPUTER MODELING  
AND INTELLIGENT SYSTEMS**

PROCEEDINGS

Under edition of Doctor of Technical Science, Professor D.M. PIZA,  
and Doctor of Philosophy, Associate Professor S.A. SUBBOTIN

---

Министерство образования и науки Украины  
Запорожский национальный технический университет

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Под редакцией доктора технических наук, профессора Д.М. ПИЗЫ,  
кандидата технических наук, доцента С.А. СУББОТИНА

Запоріжжя – Zaporozhye – Запорожье

2007

ББК 32.97  
К63  
УДК 004

Рекомендовано до видання вченою радою  
Запорізького національного технічного університету  
(протокол № 7 від 05.03.2007 р.).

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

**Головний редактор** – д.т.н., професор *Піза Д.М.* (Запоріжжя, Україна).

**Заст. гол. редактора** – к.т.н., доцент *Субботін С.О.* (Запоріжжя, Україна).

### Члени редколегії:

*Ratanè A.* – Dr. (Латина, Італія);

*Антощук С.Г.* – д.т.н., професор (Одеса, Україна);

*Бахрушин В.Є.* – д.ф.-м.н., професор (Запоріжжя, Україна);

*Бодянський Є.В.* – д.т.н., професор (Харків, Україна);

*Внуков Ю.М.* – д.т.н., професор (Запоріжжя, Україна);

*Горбань О.М.* – д.ф.-м.н., професор (Запоріжжя, Україна);

*Карпуков Л.М.* – д.т.н., професор (Запоріжжя, Україна);

*Корнич Г.В.* – д.ф.-м.н., професор (Запоріжжя, Україна);

*Кривуля Г.Ф.* – д.т.н., професор (Харків, Україна);

*Павлов О.А.* – д.т.н., професор (Київ, Україна);

*Петров Е.Г.* – д.т.н., професор (Харків, Україна);

*Потапенко Є.М.* – д.т.н., професор (Запоріжжя, Україна);

*Притула А.В.* – к.т.н., доцент (Запоріжжя, Україна);

*Таланін І.Є.* – д.т.н., професор (Запоріжжя, Україна).

### Редакційно-видавнича рада:

*Піза Д.М.*, *Внуков Ю.М.*, *Притула А.В.*, *Субботін С.О.*, *Табунщик Г.В.*,  
*Висоцька Н.І.*, *Рибіна Ю.А.*, *М'ясников М.Л.*

Опубліковані статті пройшли незалежне рецензування провідними фахівцями.

Наукові праці, що увійшли до збірника, реферуються в базах даних та реферативних журналах ВІНІТІ (Москва, Росія) та "Джерело" (Київ, Україна).

Електронну версію збірника наукових праць розміщено на веб-сайті Запорізького національного технічного університету за адресою:  
<http://www.zntu.edu.ua/cm1s>

ISBN 978-966-7809-75-1

© Запорізький національний  
технічний університет, 2007

---

## Зміст / Contents / Содержание

---

*Піза Д.М.* Кафедра програмних засобів ЗНТУ:  
досвід підготовки сучасних фахівців..... 6

### **Розділ 1. Обробка та розпізнавання зображень**

#### **Section 1. Image processing and recognition**

#### **Раздел 1. Обработка и распознавание изображений ..... 10**

- Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Кlich Ю.А., Николенко А.А.*  
Математическое обоснование приближенных методов при  
контурной сегментации в пространстве гиперболического  
вейвлет-преобразования..... 10
- Белоус Н.В., Кобзарь Г.А.* Метод маркировки компонентов  
бинарных изображений с параллельным выделением их  
контура и скелета..... 17
- Бойченко К.Ю.* Интеллектуальная система автоматической  
классификации автомобилей ..... 23
- Иванов Г.А., Ларионов А.А., Панин Д.В.* Автоматизация  
распознавания номерных знаков транспортных средств..... 28

### **Розділ 2. Нейромережні та нечітко-логічні системи**

#### **Section 2. Neural network and fuzzy logic systems**

#### **Раздел 2. Нейросетевые и нечетко-логические системы..... 37**

- Ходаков В.Е., Жарикова М.В.* Оценка последствий лесных  
пожаров с использованием нейронных сетей ..... 37
- Ляшенко С.А.* Построение нелинейной ARX модели  
на основе радиально-базисной сети..... 42
- Нестеренко Б.Б., Новотарский М.А.* Локально-асинхронный  
метод решения уравнений математической физики  
на клеточных нейронных сетях ..... 48
- Орловский И.А., Синявский А.А.* Степенные рекуррентные  
нейронные сети как модели нелинейных  
электротехнических объектов ..... 55
- Сакало Т.С.* Нейросетевая реализация аддитивной модели  
Гаммерштейна объекта со многими входами ..... 62
- Субботин С.А.* Синтез нейро-нечетких моделей  
для выделения и распознавания объектов на сложном фоне  
по двумерному изображению..... 68

**Розділ 3. Системи, засновані на знаннях****Section 3. Knowledge-based systems**

<b>Раздел 3. Системы, основанные на знаниях .....</b>	<b>92</b>
<i>Молодых Л.С.</i> Интеллектуальная система «Техномех» для поддержки принятия решений технолога при проектировании технологического процесса на изготовление валов механообработкой .....	92
<i>Самигулина Г.А.</i> Интеллектуальная экспертная система прогнозирования асимптотической устойчивости стохастической системы управления.....	98
<i>Serdyuk S.N.</i> The informative level enhancement method for managing operator .....	104

**Розділ 4. Оптимізація та її застосування****Section 4. Optimization and its applications**

<b>Раздел 4. Оптимизация и ее приложения .....</b>	<b>111</b>
<i>Астионенко И.А., Козуб Н.А., Хомченко А.Н.</i> Задача о паритете призовых и штрафных маршрутов в одношаговых схемах блужданий .....	111
<i>Гребенник И.В., Баранов А.В.</i> Оптимизация линейных функций на множестве композиций перестановок .....	116
<i>Кораблев Н.М., Овчаренко И.В.</i> Восстановление и глобальная оптимизация мультимодальных нелинейных зависимостей на основе искусственных иммунных систем .....	122
<i>Косолап А.И.</i> Эффективные классы задач полиномиальной оптимизации .....	128
<i>Олейник Ан.А.</i> Выбор системы информативных признаков для классификации транспортных средств на основе эволюционного поиска .....	134
<i>Олейник Ал.А.</i> Сравнительный анализ методов оптимизации на основе муравьиных колоний .....	147
<i>Федорченко Е.Н.</i> Исследование влияния параметров генетического алгоритма на показатели его эффективности .....	160

**Розділ 5. Математичне та комп'ютерне моделювання****Section 5. Mathematical and computer modeling**

<b>Раздел 5. Математическое и компьютерное моделирование .....</b>	<b>167</b>
<i>Притула А.В., Табунцик Г.В.</i> Онтология дистанционного учебного курса .....	167
<i>Долгов В.И., Неласая А.В., Зайцев С.А.</i> Определение порядка группы дивизоров гиперэллиптической кривой.....	173

<i>Коломоец Г.П.</i> Экспериментальное исследование статистических параметров межпакетных интервалов http-сеанса.....	178
<i>Кривуля Г.Ф., Латтев М.А.</i> Моделирование состояний компьютерной системы на структурном уровне в виде конечного автомата.....	185
<i>Петров Э.Г., Писклакова О.А.</i> Постановка задачи взаимной трансформации различных видов неопределенности .....	190
<i>Пинчук В.П.</i> Библиотечный модуль Algraph/C++: инструмент вычислений на графах .....	194
<i>Прохорец И.М., Прохорец С.И., Рудычев Е.В., Федорченко Д.В., Хажмурадов М.А., Лукьянова В.П.</i> Имитационное моделирование объектов с ядерной и радиационной опасностью.....	200
<i>Рубцов А.Г., Садовский М.Г., Сенашова М.Ю.</i> Восстановление отсутствующих данных в символьных последовательностях.....	206

## **Розділ 6. Керування технічними та соціально-економічними об'єктами та системами**

### **Section 6. Control of technical and social-economic objects and systems**

<b>Раздел 6. Управление техническими и социально-экономическими объектами и системами.....</b>	<b>212</b>
<i>Потапенко Е.М., Казурова А.Е., Васильева Е.В.</i> Робастное управление неопределенной системой .....	212
<i>Лученко О.А., Гавриленко О.И.</i> Разработка программных имитаторов отказов для отработки аварийных режимов работы систем управления космических летательных аппаратов .....	220
<i>Труфанов И.Д., Лютый А.П., Чумаков К.И., Андрияс И.А.</i> Синтез моделей управления локального уровня систем компенсации реактивной энергии мощных электротехнологических установок дуговых сталеплавильных печей.....	227
<i>Нелетин Р.А., Соловьёв А.А.</i> Опыт создания и внедрения автоматизированной компьютерной системы управления автотранспортным предприятием .....	233
<i>Поздняков О.А., Пархоменко А.В., Цокуренко И.И.</i> Особенности создания системы управления предприятием на основе MySap ERP.....	240
<b>Автори / Authors / Авторы .....</b>	<b>248</b>

*З нагоди п'ятнадцятиріччя відкриття спеціальності "Програмне забезпечення автоматизованих систем" та п'ятиріччя створення кафедри програмних засобів*

## **КАФЕДРА ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ЗНТУ: ДОСВІД ПІДГОТОВКИ СУЧАСНИХ ФАХІВЦІВ**

*Піза Д.М.*

Запорізький національний технічний університет

Кафедру програмних засобів створено в 2002 році шляхом відокремлення від кафедри конструювання та технології виробництва радіоапаратури. Нині кафедра входить до складу факультету інформатики та обчислювальної техніки Інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ).

З самого початку заснування кафедру очолює А.В. Притула, який має великий досвід науково-педагогічної діяльності в університеті та практичної роботи на промислових підприємствах регіону.

На кафедрі працюють висококваліфіковані фахівці – науковці і педагоги: Дубровін В.І., Корнієнко С.К., Онищенко В.Ф., Пархоменко А.В., Притула А.В., Рисіков В.П., Сердюк С.М., Субботін С.О., Табунщик Г.В., Шило Г.М., Василенко А.П., Левада І.В., Дейнега Л.Ю., Качан О.І., Мілінчук С.Г., Неласа Г.В., Скачко Л.П., Степаненко О.О., Федорченко Є.М.

Кафедра має два власних добре обладнаних комп'ютерних класи, а також проводить заняття у комп'ютерних класах факультету інформатики та обчислювальної техніки, інших університетських лабораторіях. Студенти та співробітники кафедри використовують ресурси локальної мережі ЗНТУ та мають вихід до глобальної комп'ютерної мережі Internet та мережі Міністерства освіти і науки України "Уран".

Інформаційні потреби у навчальній та науково-дослідній роботі кафедри забезпечуються бібліотекою ЗНТУ з книжковим фондом понад один мільйон примірників. У бібліотеці університету відкрито три зали електронної інформації. Користувачі можуть працювати з електронними копіями журналів та видань, мають доступ до електронних дисертацій Російської державної бібліотеки, повнотекстових журналів інформаційного центру EBSCO та видавництва Springer.

Кафедра програмних засобів готує фахівців в галузі проектування, експлуатації та супроводження різних класів інформаційних систем за двома спеціальностями напряму "Комп'ютерні науки".

Спеціальність "Програмне забезпечення автоматизованих систем" відкрито у 1991 році. У липні 1999 року спеціальність було акредитовано за вищим, четвертим рівнем акредитації. На її основі з 2000 року введено спеціалізацію "Програмне забезпечення в бізнесі, менеджменті та підприємстві".

Випускники спеціальності "Програмне забезпечення автоматизованих систем" працюють на керівних посадах підприємств та фірм, спеціалістами в сфері комп'ютерних технологій, інженерами-програмістами, системними адміністраторами, викладачами вищих навчальних закладів як у м. Запоріжжя й області, так і поза їхніми межами – у Києві, Москві, країнах далекого зарубіжжя.

Спеціальність "Інформаційні технології проектування" було відкрито у 2004 році. Її майбутні випускники будуть мати змогу працювати аналітиками у сфері створення, впровадження та супроводження програмного забезпечення.

Студенти кафедри проходять виробничу та переддипломну практику, а випускники працевлаштовуються на провідних промислових підприємствах регіону (ВАТ "Мотор Січ", ЗМКБ "Прогрес", ВАТ "ЗАЗ", ВАТ "Запоріжсталь", КП "НВК "Іскра", ДП "Радіоприлад", НВП "Хартрон", ТОВ "МПА Груп").

Велика увага приділяється колективом кафедри переходу на навчання згідно з вимогами Болонського процесу. Постійно оновлюється існуюче та створюється нове навчально-методичне забезпечення.

У 2006 р. за підтримки відділу міжнародних зв'язків ЗНТУ кафедри надано грант Європейської Спільноти за програмою TEMPUS для організації спільної з європейськими університетами (Вроцлавською політехнікою, м. Вроцлав, Польща, Університетом м. Герлиць, Німеччина, та Університетом м. Люберець, Чехія) підготовки магістрів з програмного забезпечення. Це дозволить впровадити на кафедрі сучасні західні технології навчання та покращити матеріально-технічне забезпечення кафедри, обмінятися методичними розробками з іноземними колегами, розширити наукові зв'язки кафедри, а студентам магістратури ЗНТУ це дозволить окрім українського диплому отримати після короткотермінового навчання у Польщі ще й європейській міждержавний диплом Польщі, Чехії та Німеччини.

Основними напрямками наукової роботи кафедри є інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень та математичне моделювання. Плідна робота за цими напрямками дозволила колишнім випускникам спеціальності "Програмне забезпечення автоматизованих систем" захистити чотири кандидатські дисертації (Піза Н.Д., Субботін С.О., Табунщик Г.В., Шило Г.М.).

За наукову роботу "Методи та алгоритми синтезу нейромережевих діагностичних і прогнозуючих моделей" С.О. Субботіну Указом Президента України № 1451/2004 від 9.12.2004 р. на підставі подання Комітету з державних премій України в галузі науки і техніки присуджено Премію Президента України.

Постановами Президії Комітету з державних премій України в галузі науки і техніки Субботіну С.О. (у 2001р.) та Табунщик Г.В. (у 2006р.) призначено стипендії Кабінету Міністрів України. Раніше стипендії Кабінету Міністрів України отримували Пархоменко А.В. та Шило Г.М.

На кафедрі у 2003 – 2006 роках виконувалися дослідження за держбюджетною темою "Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень" (керівник – к.т.н., доцент В.І. Дубровін). З 2006 року розпочато дослідження за трьома НДР: держбюджетною темою "Інтелектуальний аналіз даних та прийняття рішень" (керівник – к.т.н., доцент В.І. Дубровін), держбюджетною темою "Науково-методичні основи та математичне забезпечення для автоматизації й моделювання процесів керування та підтримки прийняття рішень на основі процедур розпізнавання й еволюційної оптимізації в нейромережевому та нечіткологічному базисах" (керівник – к.т.н., доцент С.О. Субботін) та госпдоговірною темою ТОВ "МПА Групп" "Розробка математичного та інформаційного забезпечення інтелектуальної системи візуального контролю транспортних засобів" (керівник – к.т.н., доцент С.О. Субботін).

Викладачами кафедри програмних засобів ведеться спільна наукова робота із кафедрами технології авіадвигунів та машинобудування ЗНТУ у галузі інтелектуальних систем діагностики та керування якістю.

Кафедра має наукові зв'язки з провідними науковцями і ВНЗ України (Києва, Харкова, Львова, Донецька, Одеси, Дніпропетровська) та країн СНД (Москви, Санкт-Петербурга, Красноярська), фахівцями і підрозділами промислових підприємств регіону. На базі ВАТ "Мотор Січ" створено філію кафедри програмних засобів, в рамках діяльності якої ведеться спільна наукова робота та проводяться заняття із студентами.

За договором творчої співдружності студенти кафедри (Бойченко К.Ю., Кузнецов Є.В., Макаренко С.В., Олійник А.О., Бондаренко І.О., Іванов Г.О., Ларіонов А.О., Олійник О.О., Панін Д.В., Рясний П.С.) під керівництвом к.т.н., доцента Субботіна С.О. беруть участь у виконанні науково-дослідних проєктів ТОВ "МПА Групп" за грантами італійської компанії Multinetworks s.r.l.

На кафедрі ведеться активна наукова робота із студентами, які беруть участь та займають призові місця на вузівських та загальноукраїнських олімпіадах і конкурсах наукових робіт.

Студенти Олійник А.О., Кузнецов Є.В., Олійник О.О. та Нежевенко Д.Ю. є переможцями обласних конкурсів різних років Запорізької обласної державної адміністрації для обдарованої молоді та відзначені преміями і дипломами.

Студенти кафедри Олійник А.О., Олійник О.О., Бойченко К.Ю. є переможцями конкурсу ЗНТУ на кращу студентську наукову роботу різних років у номінації "Комп'ютерні науки, програмні засоби".

Студенти Олійник А.О. та Олійник О.О. отримують стипендію міського голови м. Запоріжжя, студентів Олійника О.О. та Даркова І.В. нагороджено премією КБ "Індустріалбанк".

На кафедрі ведеться велика робота з підготовки студентів університету до участі в олімпіадах з програмування. Заняття зі студентами проводять співробітники кафедри к.т.н., доцент Г.В. Табунщик, к.т.н., доцент С.О. Субботін, асистент Г.В. Неласа.

Протягом останніх років Субботін С.О. очолює конкурсну комісію та журі регіонального та вузівського турів Всеукраїнської студентської олімпіади з програмування під егідою АСМ. Доцент Табунщик Г.В. та аспірант Риман О.Ю. працюють у складі журі, а асистент Качан О.І. – у групі технічного забезпечення регіонального та вузівського турів олімпіади з програмування під егідою АСМ

Студенти кафедри беруть активну участь у різноманітних олімпіадах з програмування. Зокрема, студенти Дарков І.В., Бойченко К.Ю., Нежевенко Д.Ю., Селезньов Ю.В., Смагін М.Є., Боговін О.І., Ляшенко П.М. під керівництвом тренера команди ЗНТУ к.т.н., доцента С.О. Субботіна перемагали у вузівському та регіональному турах, а також брали участь у всеукраїнських турах олімпіади з програмування під егідою АСМ. Студент Дарков І.В. у складі команди ЗНТУ брав участь у міжнародному турі цієї ж олімпіади, що проводився у м. Бухарест, Румунія.

У 2007 році виповнюється п'ять років від створення кафедри програмних засобів та п'ятнадцять років відкриття спеціальності "Програмне забезпечення автоматизованих систем".

На відзначення досягнень і здобутків колективу співробітників та студентів кафедри, узагальнення та поширення досвіду наукової роботи та підготовки сучасних фахівців у галузі комп'ютерних наук, з метою об'єднання зусиль учених, викладачів, практичних фахівців, аспірантів, студентів вищих навчальних закладів, наукових організацій і виробничих підприємств у сфері перспективних напрямів комп'ютерних наук й інформаційних технологій, математичного моделювання, штучного інтелекту підготовлено цей збірник наукових праць.



УДК 004.032.2

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ПРИБЛИЖЕННЫХ МЕТОДОВ  
ПРИ КОНТУРНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ  
ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

*Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Кlich Ю.А., Николенко А.А.*

Одесский национальный политехнический университет

**Введение**

Для ряда практически важных задач, связанных с распознаванием изображений, важнейшей процедурой является сегментация. Сегментация изображений преследует две основные цели: первая из них заключается в декомпозиции изображения на части, более удобные для дальнейшего анализа, вторая – в изменении формы описания изображения. В результате чего пиксели изображения преобразуются в более информативные высокоуровневые структуры, обеспечивающие эффективную организацию дальнейших операций анализа изображений. Примером такой структуры является контурное описание объектов, которое позволяет на 2–4 порядка сократить объем обрабатываемой информации, обеспечить инвариантность к трансформациям яркости, снизить влияние помех и таким образом повысить эффективность.

**1. Постановка задачи**

Наибольшее распространение получили дифференциальные методы выделения контуров, основанные на вычислении разностей значений яркости в локальных областях изображений [1,2]. При выделении контуров дифференциальными методами перепады интенсивности усиливаются, и с помощью порогового устройства выделяется область контура. Существенным недостатком таких методов является их плохая работоспособность при наличии помех на изображении.

В ряде работ показано, что общего недостатка дифференциальных методов можно избежать, если для помехоустойчивого подчеркивания контуров использовать преобразование Гильберта (ПГ) и построенное на его базе гиперболическое вейвлет-преобразование (ГВП). ГВП, сочетающее свойства ПГ и вейвлет-преобразования, обладает дополнительным преимуществом – позволяет регулировать детальность полученных контурных препаратов, позволяет реализовать иерархический подход к контурному анализу изображений [3].

Выделение контуров с помощью ГВП проводится в два этапа [3, 4]. На первом этапе происходит подчеркивание контуров с помощью ГВП, а на втором – нахождение координат контура. Причем задачу, решаемую на втором этапе, можно переформулировать в задачу анализа подчеркнутого изображения на экстремумы с целью выделения контура, т.е. поиск экстремумов двумерной функции в условиях помех. Как известно, при отсутствии аналитического описания при решении таких задач применяются приближенные методы [5], позволяющие найти решение с заданной точностью, сократить вычислительные затраты.

В статье математически обосновывается возможность применения приближенных методов при контурной сегментации в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования.

## 2. Поиск экстремума зашумленной функции в пространстве ГВП

Задачу поиска экстремума функции  $Q(x)$  в условиях помех  $\varepsilon$

$$Q' = Q(x) + \varepsilon \quad (1)$$

представим в виде минимизации математического ожидания  $Q'$  [6].

Известны различные методы определения экстремума функции. В случае, если уровень помехи достаточно высок при поиске экстремума (1) градиентные методы неприемлемы, если координаты экстремума  $x^*$  не совпадают с экстремальной точкой помехи [6].

В настоящей статье для обоснования метода поиска экстремума функции  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  с зашумлением вида (1) используем метод Ньютона для операторных уравнений [7].

Оператором Гильберта, воздействующим на функцию  $f(x) \in R^n$ ,  $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$  назовем оператор  $g \in R^n$  такой, что

$$g_i(x_j) = \frac{1}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{f_i(x_j + t) - f_i(x_j - t)}{t} dt, \quad i, j = \overline{1, n}; \quad (2)$$

т.е. покоординатное применение преобразования Гильберта к функции  $f(x)=(f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x))$ , понимаемое в обычном смысле главного значения по Коши по каждой из координат вектора  $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

В силу этого определения, если  $t \in L(-\infty, +\infty)$ , то функционал  $g$  существует почти для всех значений  $t$ . Если  $f \in L_p(R^n)$ ,  $p \in (1, \infty)$ , то функционал  $g$  также принадлежит  $L_p(R^n)$  и почти всюду имеют место двойственные формулы

$$f_i(x_j) = -\frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{g_i(x_j + t) - g_i(x_j - t)}{t} dt, \quad i, j = \overline{1, n}; \quad (3)$$

причем

$$\left\| \|g_i(x_j)\| \right\|_{-\infty}^{+\infty} dx_j \leq M_p \left\| \|f_i(x_j)\| \right\|_{-\infty}^{+\infty} dx_j, \quad (4)$$

где константа  $M_p$  зависит только от  $p$ , а формулы (2), (3) эквивалентны формулам:

$$g_i(x_j) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f_i(t)}{t - x_j} dt, \quad (5)$$

$$f_i(x_j) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g_i(t)}{t - x_j} dt, \quad (6)$$

несобственные интегралы понимаются в смысле главного значения.

Отметим, что если  $f_i(x_j) \in L(0, 2\pi)$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ , то  $g$  существует почти всюду, а если  $f_i(x_j)$  удовлетворяют условию Липшица по каждой из переменных  $x_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  с показателем  $\alpha \in (0, 1)$ , то  $g$  существует при любом  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  и удовлетворяет тому же условию.

Таким образом, операторы Гильберта являются ограниченными (линейными) операторами в соответствующих пространствах  $L_p$ . Существование и вид обратного оператора Гильберта  $g^{-1}(x)$ ,  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , естественно определяется в силу двойственности формул (5) и (6).

При выполнении условий сходимости метода Ньютона для операторных уравнений правило Ньютона нахождения следующего приближения по предыдущему имеет вид:

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} - g^{-1}(g(x^{(k)}))g(x^{(k)}), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (7)$$

при этом будет осуществляться «сглаживание» в процедуре поиска экстремума зашумленного сигнала.

Для расширения круга разрешаемых проблем заменим сложную задачу поиска экстремума (выполнения контурной сегментации исходного изображения) на «близкую» к ней, более простую при вычислениях на ЭВМ с использованием общей схемы приближенного метода [8].

### 3. Общая схема приближенного метода

Пусть требуется решить уравнение

$$Au=f \quad (8)$$

с линейным оператором  $A$ , действующим из нормированного пространства  $U$  в пространство  $V$ . Пусть задано также другое уравнение (или последовательность уравнений)

$$A_n u_n = v_n \quad (9)$$

с линейным оператором  $A_n$ , действующим из пространства  $U_n$  в пространство  $V_n$ . Будем считать нормированные пространства  $U_n$  и  $V_n$  полными, а оператор  $A_n$  всегда будем предполагать ограниченным. Уравнения (8) и (9) считаются некоторым образом связанными между собой. Предположим, что задан линейный ограниченный оператор  $\Psi_n$ , действующий из пространства  $V$  в пространство  $V_n$ , и что правая часть  $v_n$  уравнения (9) всегда есть результат применения этого оператора к  $v$ :  $v_n = \Psi_n v$ . Решение  $u^*$  уравнения (8) и решение  $u_n^*$  уравнения (9) лежат в разных пространствах. Будем называть  $u_n^*$  каркасом приближенного решения и считать, что само приближенное решение  $u^{(n)}$  восстанавливается по каркасу с помощью линейного ограниченного оператора  $\varphi_n$ , действующего из  $U_n$  в  $U$ :  $u^{(n)} = \varphi_n u_n^*$ . Линейный ограниченный оператор  $\varphi_n$ , действующий из пространства  $U$  в  $U_n$  есть представитель элемента  $u$  в пространстве  $U_n$ . Все введенные операторы и пространства можно изобразить на схеме (рис. 1).

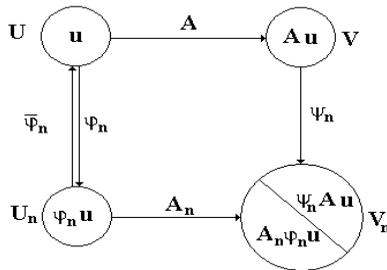


Рисунок 1 – Общая схема приближенного метода

Считаем, что последовательность операторов  $A_n$  аппроксимирует оператор  $A$  на элементе  $u$ , если  $\|A_n \varphi_n u - \Psi_n A u\| \rightarrow 0$ . На основании теоремы о сходимости каркасов приближенных решений [8] можно трактовать каркас как таблицу приближенного решения.

Если определить оператор  $\varphi_n$  таким образом, чтобы функции  $u$  он ставил в соответствие таблицу значений этой функции в тех же узлах, то сходимость каркасов будет означать близость точного и приближенного решений.

Эта идея может быть перенесена на решение задачи выделения контура изображения. При этом предполагается, что  $u$  соответствует  $f$ ,  $A$  и  $\varphi_n$  – операторы ГВП,  $v$  определяется постановкой задачи (для нахождения экстремума  $v = 0$ ).

#### 4. Морфологическая обработка изображения в пространстве ГВП

Предлагается использовать для контурной сегментации изображений алгоритм морфологической обработки полутонового изображения (рис. 2, а) с применением ГВП, реализованный по схеме приближенного метода (рис. 1).

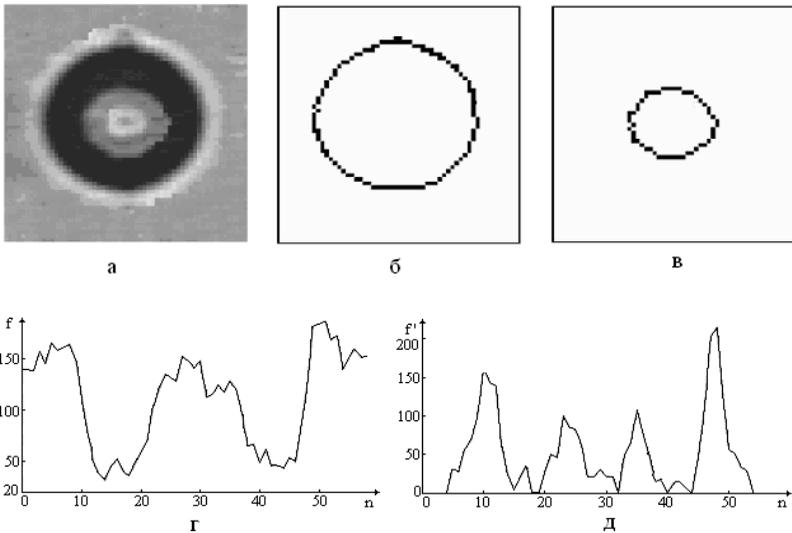


Рисунок 2 – Контурная сегментация изображения в пространстве ГВП: а – исходное изображение иерархической структуры; б, в – контур, выделенный на разных уровнях иерархии; г – строка исходного изображения; д – ГВП строки изображения

1. Находим номер строки ( $i$ ) изображения, пересекающей первый объект (рис. 2, г), и выполняем ГВП этой строки (рис. 2, д).
2. Находим максимальное значение в строке  $\text{Max}$ , и координаты точки максимума ( $x_{\text{max}}, y_{\text{max}}$ ).
3. В единичной окрестности точки  $\text{Max}_i$  выполняем ГВП (по строкам, по столбцам, объединяем составляющие).

4. Находим максимальное значение ГВП  $\text{Max}_i$  в единичной окрестности.

5. Определяем новые координаты точки  $(x'_{\max}, y'_{\max})$ .

6. Если эта процедура выполнена первый раз, то переходим на п. 3.

7. Сравниваем полученное значение координат с предыдущим и если оно не совпадает, то переходим на п.3.

8. Если значение совпадает, ищем следующее максимальное значение в единичной окрестности ГВП.

9. Повторяем алгоритм до тех пор, пока не произойдет возврат в начальную точку с координатами  $(x_{\max}, y_{\max})$  – получено координатное описание контура первого объекта.

10. Находим точку контура, следующего объекта (п. 1,2) и повторяем алгоритм.

На рис. 2 б, в приведены результаты обработки полутонового изображения по предложенному алгоритму. Данный алгоритм позволяет одновременно решать задачу выделения, прослеживания и скелетизации контура изображения. Следует отметить, что этот алгоритм позволяет уменьшить время поиска точек контура при требуемой помехоустойчивости и одновременно дает возможность осуществлять морфологическую обработку с целью прослеживания контуров полутоновых изображений.

### Заключение

В статье приведено математическое обоснование применения приближенных методов при контурной сегментации в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования. Разработан алгоритм контурной сегментации изображений в пространстве ГВП, который позволил объединить операции подчеркивания, выделения контура, скелетизации и его прослеживания. Такой подход дает возможность реализовать иерархические модели обработки, повысить эффективность анализа полутоновых изображений.

### Перечень ссылок

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

2. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 784 с.

3. Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Николенко А.А. Ткаченко Е.В. Иерархический подход при контурном анализе изображений // Искусственный интеллект. – 2005. – № 3. – С. 605–603.

4. Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Николенко А.А. Выделение контуров объектов методом двукратного гиперболического преобразования // Электромашинобудоування та електрообладнання. – 2005. – Вип. 65. – С. 65–69.

5. Карманов В.Г. Математическое программирование. – М.: Наука, 1975. – 272 с.

6. *Цыпкин Я.З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: «Наука», Гл. ред. физ.-мат.лит., 1968. – 400 с.

7. *Крылов В.И., Бобков В.В., Монастырский П.И.* Вычислительные методы. – М.: «Наука», Гл. ред. физ.-мат.лит., 1977. – Т. II. – 399с.

8. *Даузавет И.К.* Теория приближенных методов. Линейные уравнения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 288 с.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Дрозд А.В. (Одесса, Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова)

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой информационных систем Одесского национального политехнического университета (Протокол № 6 от 31.01.2007 г.).

*Поступила* 01.02.2007 г.

*Antoshchuk S.G., Babilunga O.J., Klich J.A., Nikolenko A.A.* **Mathematical substantiation of approximate methods at edge segmentation in hyperbolic wavelet-transformation**

The mathematical substantiation for using of approximate methods at edge segmentation in hyperbolic wavelet-transformation (HWT) is given. The edge image segmentation algorithm has allowed uniting edge detection, skeletonization and edge describing. Such approach allows using hierarchical processing models and gives increasing efficiency for the gray scale image analysis.

*Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Кlich Ю.А., Николенко А.А.* **Математическое обоснование приближенных методов при контурной сегментации в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования**

Приведено математическое обоснование применения приближенных методов при контурной сегментации в пространстве гиперболического вейвлет-преобразования (ГВП). Разработан алгоритм контурной сегментации изображений в пространстве ГВП, позволивший объединить операции выделения контура, скелетизации и его прослеживания. Такой подход дает возможность реализовать иерархические модели обработки, повысить эффективность анализа полутоновых изображений.

*Антощук С.Г., Бабилунга О.Ю., Кlich Ю.О., Николенко А.О.* **Математичне обґрунтування наближених методів при контурній сегментації в просторі гіперболічного вейвлет-перетворення**

Наведено математичне обґрунтування використання наближених методів при контурній сегментації в просторі гіперболічного вейвлет-перетворення (ГВП). Розроблено алгоритм контурної сегментації зображень в просторі ГВП, який дозволив поєднати операції виділення контуру, скелетизації та його простеження. Такий підхід дає можливість реалізувати ієрархічні моделі обробки, збільшити ефективність аналізу напівтонових зображень.

УДК 519.68

## **МЕТОД МАРКИРОВКИ КОМПОНЕНТОВ БИНАРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВЫДЕЛЕНИЕМ ИХ КОНТУРА И СКЕЛЕТА**

*Белоус Н.В., Кобзарь Г.А.*

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

### **Введение**

Основной задачей анализа цифровых изображений является выявление и идентификация различных типов объектов. Например, в случае анализа изображений документов, необходимо выявить полутоновые изображения, символы текста, заглавные символы, а также объекты более высокого порядка – линии текста, параграфы, статьи и другие. Выявление и маркировка связанных компонентов (или просто компонентов) является одним из основных и наиболее применяемых подходов, используемых для этих целей [1–3].

Было разработано множество различных методов маркировки. Один из наиболее эффективных методов основан на процессе трассировки контура. Метод предоставляет дополнительную информацию о контуре компонентов, т.е. выполняет сразу два этапа, необходимых для эффективного распознавания изображений: маркировка компонентов и трассировка контуров.

В данной статье предлагается эффективный метод для выявления и маркировки компонентов бинарного изображения, который объединяет в себе сразу три подготовительных этапа процесса распознавания изображений: выделение компонентов изображения, трассировка контуров и построение скелетов.

### **1. Методы маркировки компонентов**

Было предложено несколько последовательных [1–3] методов маркировки. Один из последовательных методов был предложен Розенфильдом и Пфалцом [1] и осуществляет два прохода по входному изображению. Во время первого прохода каждый пиксель сканируется один раз и маркируется соответствующим образом. Во время второго прохода производится замена маркированных пикселей.

Метод, предложенный Хараликом [2], разработан для устранения недостатка предыдущего метода, связанного с большим объемом памяти, необходимым для вспомогательных массивов. Метод основан на итеративном выполнении двух проходов. При этом объем необходимой памяти очень невелик, но общее время обработки варьируется в зависимости от характера изображения.

Лумиа, Шапито и Зунига [3] предложили иной метод, который является компромиссом между двумя предыдущими.

Чанг и Чен предложили наиболее эффективный алгоритм определения и маркировки компонентов бинарных изображений. Этот метод использует усовершенствованный метод трассировки контура [4] для маркировки внешних внутренних границ компонента и последующего обхода внутренних точек компонентов за один проход. Усовершенствованный метод трассировки контуров не только маркирует компоненты, но также предоставляет дополнительную информацию о размере компонента, количестве внутренних контуров и положении точек контура. Эта информация является очень полезной для большинства приложений компьютерного зрения и распознавания образов.

В данной статье предлагается эффективный метод для выявления и маркировки компонентов бинарного изображения, который также основан на трассировке контура, но задействует преобразование расстояний (ПР) границ компонентов для маркировки внутренних точек. Результатом метода являются маркированные компоненты, их контуры, а также скелеты, поскольку ПР, используемое в методе, дает информацию, достаточную для построения скелетов. Метод является модификацией расширенного метода быстрого марша, предложенного Телеа и Вийк [5]. В отличие от исходного, предлагаемый метод распространяет не индексы точек контура, а вектора касательных, что позволяет избежать недостатка, связанного со стыковкой начальных и конечных индексов и упростить процесс нахождения точек скелетона.

## **2. Начальное состояние. Трассировка контура**

Первым этапом предлагаемого метода является трассировка контуров компонентов, расчет касательных в каждой точке контура и представление точек контуров в виде единой последовательности, представляющей линию фронта распространения расстояний (см. далее). Для этих целей наиболее оптимальным средством является применение расширенного алгоритма Тео-Павлидиса [5], обладающего наибольшей производительностью, удовлетворяющего требованиям 8-связности бинарных компонентов, а также не зависящего от ориентации изображения.

Идея исходного алгоритма очень проста. Бинарное изображение представляет собой решетку или матрицу, состоящую из черных и белых точек. Пусть компоненты, подлежащие маркировке, состоят из черных пикселей, находящихся на белом фоне. Первым шагом алгоритма является выбор начального пикселя. Пусть начальным пикселем будет первый пиксель, встреченный при сканировании изображения сверху - вниз, слева - направо.

Весь алгоритм построен на направлениях. Первым важным направлением является направление входа в пиксель, которое должно обеспечивать следующее условие: пиксель, находящийся слева от начального относительно направления входа, должен быть не черным.

Далее рассматриваются три пикселя, находящихся спереди от начального (или, в дальнейшем, текущего): P1, P2 и P3, как показано на рис. 1.

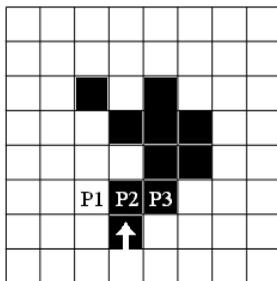


Рисунок 1 – Точки, анализируемые алгоритмом трассировки контура

Затем применяются следующие правила для корректного обхода.

Если пиксель P1 – черный, то необходимо переместить указатель обхода в этот пиксель, а направление меняется на 90 градусов против часовой стрелки.

Только если P1 – белый, анализируем P2. Если P2 – черный, то необходимо переместить указатель обхода в пиксель P2, а направление не меняется.

Только если оба пикселя P1 и P2 белые, а P3 – черный, перемещаем указатель обхода в этот пиксель, но направление не меняется.

Если ни один из трех анализируемых пикселей не является черным, то необходимо повернуть направление указателя на 90 градусов по часовой стрелке и анализировать три фронтальных пикселя в этом направлении.

Алгоритм прерывается, если: совершено более трех последовательных поворотов или алгоритм достиг начального пикселя в направлении, противоположном начальному.

Однако в чистом виде алгоритм трассировки не применим для дальнейшей маркировки компонентов с параллельным построением скелетов. Необходимо не только трассировать последовательность точек контура, но и рассчитать направления касательных в каждой точке. Для этого в процессе обхода контура в соответствии с правилами

ми алгоритма сохраняются 5 последних точек, которые затем используются в качестве коэффициентов уравнения кубического полинома, дифференцируемого в 3 точке для получения векторов касательных.

В результате работы расширенного алгоритма получаем последовательность точек всех контуров изображения, в каждой из которых известны направления касательной.

### 3. Скелетизация

Следующим этапом метода является построение скелетонов по построенным контурам изображения.

Предлагается следующая модификация расширенного метода быстрого марша для построения скелетонов по построенному контуру изображения. Метод будет также строить скалярное поле  $T$ , представляющее решение так называемого Эikonального уравнения:

$$|\nabla T| = 1,$$

где  $T = 0$  на границе объекта.

Поле  $T$  является аппроксимацией расстояния до границы. Далее предлагается вычисление поля  $T$ , начиная от минимальных известных значений, записанных в полученной последовательности точек контура (в которых  $T=0$ ), путем последовательного расширения последовательности за счет соседних точек, находящихся на минимальном расстоянии. Расстояние между двумя соседними точками вычисляется в соответствии с тем, что решетка пикселей – квадратная.

Предлагаемый алгоритм построения поля расстояний  $T$  основан на использовании последовательности точек, представляющей линию фронта распространения расстояний. Для простоты будем называть ее последовательностью линией распространения (ПЛР). ПЛР может быть модифицирована только двумя способами: добавление новой точки в конце последовательности и удаление точки в ее начале. Тогда алгоритм можно описать в виде следующего набора правил:

а) В начальном состоянии ПЛР представляет собой последовательность точек всех контуров изображения. Все точки поля  $T$ , кроме тех, которые входят в ПЛР, устанавливаются в некоторое максимальное значение (Большее по длине диагонали анализируемого изображения).

б) Каждый следующий шаг представляет собой анализ и последующее удаление первой по индексу точки из ПЛР.

в) Анализируются 8 точек окружения рассматриваемой точки. Для каждой точки окружения приближенное расстояние от границы рассчитывается следующим способом:

$$S_j^a = S_i + d,$$

где  $S_i$  – известное расстояние от рассматриваемой точки до границы,  $d$  – расстояние между рассматриваемой точкой и точкой окружения (рис. 2).

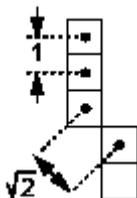


Рисунок 2 – Вычисление расстояний между соседними точками

Если записанное ранее расстояние до границы точки окружения больше полученного в результате вычислений, то исходное значение заменяется вычисленным, а точка окружения добавляется в ПЛР.

г) После того как все 8 точек окружения проанализированы, рассматриваемая точка удаляется из ПЛР.

д) Шаги в) и г) выполняются до тех пор, пока ПЛР содержит хотя бы одну точку.

Результат выполнения всех этапов разработанного метода показан на рис. 3.

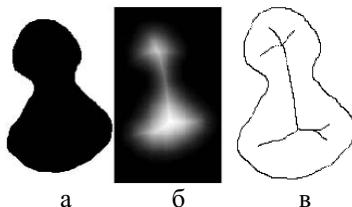


Рисунок 3 – Результат работы разработанного метода:  
а – исходное изображение, б – поле Т расстояний,  
в – контур и скелетон

### Заключение

В работе предложен эффективный метод для выявления и маркировки компонентов бинарного изображения, который основан на трассировке контура и преобразовании расстояний. Результатом метода являются маркированные компоненты, их контуры и скелеты. Эта дополнительная информация применяется в большинстве методов распознавания бинарных образов, т.е. разработанный метод объединяет в себе

три подготовительных этапа процесса распознавания: выделение компонентов изображения, трассировка контуров и скелетизация.

### Перечень ссылок

1. *Rosenfeld A., Pfaltz P.* Sequential Operations in Digital Picture Processing // Journal of the Association for Computing Machinery. – Vol. 12. – 1966. – P. 471–494.
2. *Haralick R. M.* Some neighborhood operations, in Real Time // Parallel Computing Image Analysis. – New York, 1981.
3. *Lumia R., Shapiro L., Zuniga O.* A New Connected Components Algorithm for Virtual Memory Computers // Computer Vision, Graphics, and Image Processing. – Vol. 22. – 1983. – P. 287–300.
4. *Chang F., Chen C.-J.* A Component-Labeling Algorithm Using Contour Tracing Technique // Proceedings of the Seventh International Conference on Document Analysis and Recognition. – 2003. – P.120–131.
5. *Telea A., van Wijk J.J.* An Augmented Fast Marching Method for Computing Skeletons and Centerlines // Proceedings of the IEEE TCVG Symposium on Visualization. – 2004.

**Рецензент** – к.т.н., доцент Дегтярев В.В. (Харьков, ХНУРЭ).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программного обеспечения ЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники (Протокол №11 от 09.01.2007г.).

*Поступила 31.01.2007 г.*

### ***Bilous N.V., Kobzar G.A.* Binary image component marking technique with parallel contour and skeleton extraction**

An effective technique for binary image component labeling is proposed. The technique unites three preprocessing stages of regular image recognition process: component labeling, component and skeleton extraction.

### ***Белоус Н.В., Кобзарь Г.А.* Метод маркировки компонентов бинарных изображений с параллельным выделением их контура и скелета**

Предлагается эффективный метод для выявления и маркировки компонентов бинарного изображения, который объединяет в себе сразу три подготовительных этапа процесса распознавания изображений: выделение компонентов изображения, контуров и скелетов.

### ***Білоус Н.В., Кобзар Г.А.* Метод маркірування компонентів бінарних зображень з паралельним виділенням їх контурів та скелетів**

Пропонується ефективний метод для виявлення та маркірування компонентів бінарного зображення, що об'єднує одразу три підготовчі етапи процесу розпізнавання зображень: виділення компонентів зображення, контурів та скелетів.

УДК 004.93

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ АВТОМОБИЛЕЙ

*Бойченко К.Ю.*

Запорожский национальный технический университет, ООО "МПА Групп"

### **Введение**

Для автоматизации контроля движения автотранспортных средств в современных условиях увеличения интенсивности движения актуальной является задача разработки системы автоматической классификации автомобилей.

Ряд используемых в Европе систем наблюдения за дорожным движением регистрирует автомобили в виде единичных фотоизображений. Это не позволяет для распознавания автомобилей использовать в качестве входной информации динамику изменения изображений.

*Целью работы* являлось создание интеллектуальной системы автоматической классификации автомобилей, выбор подходов и разработка методов для их реализации.

### **1. Методы выделения региона интереса**

Первым этапом на пути к распознаванию объектов является выделение региона интереса – области изображения, содержащей информацию о подлежащем распознаванию объекте – автомобиле [1].

В наиболее известных существующих системах [2–8] выделение региона интереса определяют как независимый этап. Для выделения регионов применяются несколько основных подходов.

Первый подход основан на анализе потокового видео. При этом, учитывая тот факт, что распознаванию подлежат движущиеся объекты – автомобили, при сравнении нескольких кадров видео последовательно, и применении фильтров подавления шумов, можно выделять движущиеся объекты с очень высокой степенью точности. На этом принципе основано выделение автомобилей в системах, описанных в [2–5].

Применение данного метода предусматривает наличие видео последовательности вместо имеющихся единичных фотоизображений, поэтому неприменимо для разрабатываемой системы.

Второй подход основан на нахождении кандидатов на различные части автомобиля, путем сравнения их с имеющимися в системе шаблонами всего автомобиля [6], либо фрагментами реберных карт [7]. Такой подход применим при наличии на изображении достаточного количества хорошо различающихся

существенных элементов автомобиля, что справедливо, в большей степени, для видов изометрических проекций рассматриваемых автомобилей.

Для ортогональной проекции "вид сзади" наиболее эффективно показали себя методы, основанные на определенных преобразованиях и анализе реберных карт с последующим выделением прямоугольного региона интереса, как это было реализовано наряду с анализом видео потока в системе, описанной в [4].

Ввиду отсутствия в нашем распоряжении видеопоследовательности, требуемой методами [4] их непосредственное применение не позволяет устойчиво выделять объекты.

Поэтому для создания распознающей системы были разработаны методы выделения региона интереса на основании ограниченных входных данных, которые основаны на:

- раздельном использовании вертикальных и горизонтальных реберных карт, полученных в результате анализа градиентных карт, вычисленных при помощи метода Собеля;
- применении различных адаптивных фильтров подавления шумов;
- анализе степени заполнения границ и внутренних частей прямоугольных областей-кандидатов.

## **2. Методы классификации**

Следующим этапом является непосредственно распознавание.

Авторы статей, описывающих рассмотренные системы, предлагают использование нейронных сетей [7] и метода эталонов [8] для решения задачи классификации.

Существуют и другие более сложные методы (например, на основе машин опорных векторов), обладающие лучшими показателями качества распознавания, но недостаточно высокое быстродействие их работы при обработке изображений делает нецелесообразным их применение в системах реального времени, что позволяет исключить их из дальнейшего рассмотрения.

Что касается методов, основанных на использовании нейронных сетей и эталонов, необходимо отметить, что достижение соответствующей методу эталонов точности распознавания требует построения довольно сложных сетевых структур.

Таким образом, в реализованной системе для решения задачи классификации было решено использовать метод эталонов [8].

В качестве набора признаков для метода эталонов в [8], как и в большинстве других систем, используются интенсивности точек изображения автомобиля, масштабированного на матрицу определенной размерности. Такой набор признаков является избыточным, т.к. некоторые области изображения являются вовсе неинформативными, а некоторые группы точек становятся более значимыми при рассмотрении их совокупности.

Таким образом, в качестве набора признаков для метода эталонов кроме значений геометрических размеров классифицируемых объектов - высоты и ширины, были применены так называемые «свертки» - усредненные значения интенсивностей точек определенных семантических областей изображения для всех классов автомобилей.

### 3. Система автоматической классификации

Система реализована на языке С++ с применением объектно-ориентированного подхода. Структурно можно выделить классы: обработки изображения и выделения региона интереса, работы с базами эталонов и классификации, реализующие интерфейс пользователя.

Функциональная схема разработанной системы представлена на рис. 1. Прямоугольниками на рисунке обозначены функциональные модули, ромбами – элементы интерфейса пользователя.

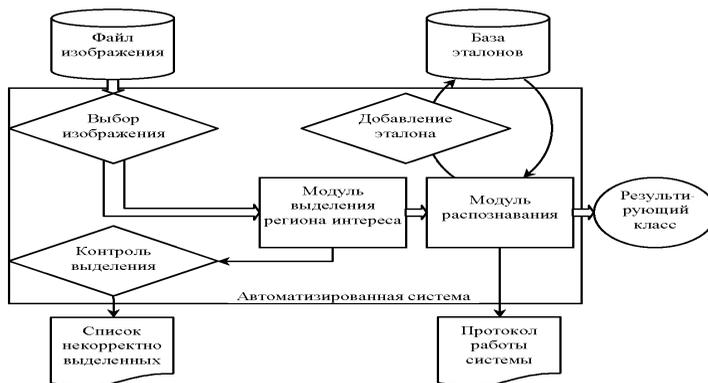


Рисунок 1 – Функциональная схема программы

На рис. 2 приведено изображение главного окна программы в процессе распознавания изображения.

### 4. Эксперименты и результаты

Разработанная система была обучена распознаванию автомобилей на основе репрезентативной обучающей выборки, состоявшей из 886 изображений автомобилей различных типов (легковых, грузовых, микроавтобусов).

Тестирование системы проводилось на основе выборки, содержащей 2457 изображений автомобилей, полученных в различное время суток при различных погодных условиях с разных камер. Проверка правильности выделения объектов осуществлялась путем мануального контроля.

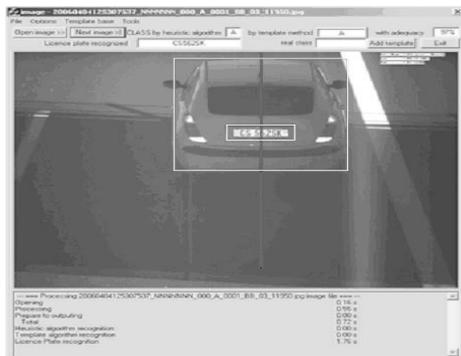


Рисунок 2 – Главное окно программы

В результате тестирования системы получены следующие результаты: правильно выделен регион интереса в 63,29% случаев (1555 изображений), правильно распознано при условии правильного нахождения автомобиля 79,82% (534 из 669 изображений). Доля правильно распознанных автомобилей из общего числа изображений составила 80,50% (1978 изображений).

### Заключение

С целью автоматизации контроля движения автотранспортных средств в работе решена актуальная задача разработки математического обеспечения интеллектуальной системы автоматической классификации автомобилей.

*Практическая ценность* работы состоит в том, что: разработано математическое обеспечение интеллектуальной системы автоматической классификации автотранспортных средств, проведено экспериментальное исследование разработанной программной системы, результаты которого подтверждают ее практическую применимость.

Работа выполнена как часть НИР ООО "МПА Групп" «Разработка математического и информационного обеспечения интеллектуальной системы визуального контроля транспортных средств» (№ гос. регистрации 0106U012013) по договору творческого содружества между Запорожским национальным техническим университетом и ООО "МПА Групп".

### Перечень ссылок

1. *Субботин С.А.* Омнифонтовая система признаков для распознавания символов // Нейронные сети и модели в прикладных задачах науки и техники: Труды международной конференции КЛИН-2002. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – Т.3. – С. 99–100.
2. *Ko H. et al.* Effective Multi-Vehicle Tracking in Nighttime Condition Using Imaging Sensors // IEEE Trans. Inf. & Syst. – 2003.– Vol. E86-D, № 9.– P. 1887–1895.

3. *Geppert A., Edelbrunner J., Bücher T.* Real-time detection and classification of cars in video sequences. – 2004. – 7 p. – [http://www.citeseer.pts.edu \[geppertEdelbrunnerEtAl05.pdf\]](http://www.citeseer.pts.edu/geppertEdelbrunnerEtAl05.pdf).

4. *Betke M., Haritaoglu E., Davis L.* Multiple Vehicle Detection and Tracking in Hard Real Time. – 1996. – 24 p. – [http://www.citeseer.pts.edu \[techreport834.pdf\]](http://www.citeseer.pts.edu/techreport834.pdf).

5. *Matsushita T., Sato S., Kamijo S., Sakauchi M.* A Feasibility Study of Vehicle-type Classification based on Symbolic Representation. – 2002. – 12 p. – [http://www.citeseer.pts.edu \[9thWorldCongress2002\\_00199.pdf\]](http://www.citeseer.pts.edu/9thWorldCongress2002_00199.pdf).

6. *Leung B.* Component-based Car Detection in Street Scene Images.– Diss. Ms. Sc. – 2004. – 71 p. – [http://www.citeseer.pts.edu \[thesis-masters-leung.pdf\]](http://www.citeseer.pts.edu/thesis-masters-leung.pdf).

7. *Neskovic P., Cooper L.* Providing context for edge extraction in the application of car detection from video streams. – 2003. – 14 p. – [http://www.citeseer.pts.edu \[bio\\_inspired\\_03.pdf\]](http://www.citeseer.pts.edu/bio_inspired_03.pdf).

8. *Hwang W., Ko H.* Real-time vehicle recognition using local feature extraction // Electronics Letters. – 2001. – Vol. 37, No. 7. – P. 424–425.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Бахрушин В.Е. (Запорожье, Гуманитарный университет "ЗИГМУ").

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.01.2007 г.).

*Поступила 31.01.2007 г. После доработки 07.02.2007 г.*

### ***Boichenko C.Yu.* Intelligent system of automatic vehicle classification and license plate detection**

The actual problem of construction of automatic vehicle classification system is solved. The software of intelligent system of automatic vehicle classification is developed. The experimental research of the developed program system is conducted. The results of experiments certify practical applicability of system.

### ***Бойченко К.Ю.* Интеллектуальная система автоматической классификации автомобилей и нахождения номерных знаков**

Решена актуальная задача построения системы автоматической классификации автомобилей. Разработано математическое обеспечение интеллектуальной системы автоматической классификации автотранспортных средств, проведено экспериментальное исследование разработанной программной системы, результаты которого подтверждают ее практическую применимость.

### ***Бойченко К.Ю.* Интеллектуальна система автоматичної класифікації автомобілів і знаходження номерних знаків**

Вирішено актуальне завдання побудови системи автоматичної класифікації автомобілів. Розроблено математичне забезпечення інтелектуальної системи автоматичної класифікації автотранспортних засобів, проведено експериментальне дослідження розробленої програмної системи, результати якого підтверджують її практичну застосовність.

УДК 004.93

## АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСПОЗНАВАНИЯ НОМЕРНЫХ ЗНАКОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

*Иванов Г.А., Ларионов А.А., Панин Д.В.*

Запорожский национальный технический университет, ООО "МПА Групп"

### **Введение**

*Постановка задачи.* В связи с постоянным увеличением количества транспортных средств на автомагистралях усложняется и затрудняется контроль за передвижением транспорта и выявлением нарушений правил дорожного движения. Это обуславливает необходимость создания и внедрения интеллектуальных систем, способных автоматически опознавать транспортные средства по номерным знакам. Автоматическое распознавание номерных знаков предполагает обнаружение номерных знаков на изображении сцены, выделение буквенно-цифровых символов на изображении номерного знака автомобиля с последующим их распознаванием.

В настоящий момент разработан ряд систем автоматического распознавания номерных знаков транспортных средств [1–4], однако созданные системы не способны с требуемой точностью и надежностью распознавать все виды номерных знаков транспортных средств на изображениях, полученных в реальных условиях, поскольку известные системы не являются универсальными и используют привязку к шаблонам номерных знаков транспортных средств конкретных стран, для которых они разработаны.

Другими недостатками существующих систем являются: ошибочное распознавание похожих символов, а также неустойчивость к плохому качеству условий освещения и наличию шумов на изображении, что приводит к ошибкам обнаружения номерного знака.

*Целью работы* являлось создание автоматической системы распознавания номерных знаков транспортных средств, лишенной недостатков существующих систем, а также разработка эффективных методов обнаружения и распознавания номерных знаков на изображениях.

### **1. Обнаружение номерной пластины на изображении**

Данный этап заключается в выделении областей изображения, имеющих признаки, характерные для номерной пластины.

В работе [5] для обнаружения пластины номерного знака предлагалось использовать характерное чередование минимумов и максимумов функции яркости, построенной для строки изображения.

Развивая данную идею, авторами предлагается выделять пластину номерного знака на изображении  $I'$ , полученном путем следующего преобразования каждой точки  $I(x, y)$  входного изображения  $I$ :

$$I'(x, y) = \sqrt{\frac{2 \cdot C_1(x, y) \cdot C_2(x, y)}{C_3^3(x, y)}};$$

$$C_1(x, y) = \frac{I(f_{\max, r}(x), y) + I(f_{\max, l}(x), y)}{2} - I(f_{\min}(x), y);$$

$$C_2(x, y) = 1 - \frac{|I(f_{\max, r}(x), y) - I(f_{\max, l}(x), y)|}{\max(I(f_{\max, r}(x), y), I(f_{\max, l}(x), y))};$$

$$C_3(x, y) = f_{\max, r}(x) - f_{\max, l}(x);$$

$$f_{\max, r}(x) = \min\{i\}, \quad i \in [x, m], f'(i) = 0, f''(i) < 0;$$

$$f_{\max, l}(x) = \max\{i\}, \quad i \in [1, x], f'(i) = 0, f''(i) < 0;$$

$$f_{\min}(x) = i, \quad i \in [f_{\max, l}(x), f_{\max, r}(x)], f'(i) = 0, f''(i) > 0,$$

где  $\overline{x} = \overline{1, m}$ ,  $\overline{y} = \overline{1, n}$ ,  $m$  – количество столбцов изображения  $I$ ,  $n$  – количество строк изображения  $I$ .

В результате преобразования точки изображения, соответствующие пластине номерного знака, будут иметь большие по сравнению с другими значения яркости на изображении  $I'$ .

На рис. 1 приведен пример преобразования входного изображения.

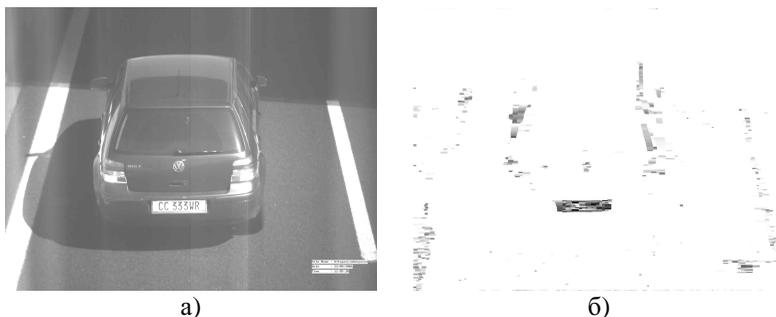


Рисунок 1 – Пример входного (а) и инвертированного преобразованного (б) изображений

Для выделения пластин номерных знаков на преобразованном изображении  $I'$  осуществляется поиск наиболее ярких областей методом выращивания регионов [6].

Основная идея выделения областей номерных пластин с применением метода выращивания регионов состоит в идентификации каждой точки изображения  $I'$  на принадлежность к номерной пластине. Если точка идентифицирована, проверяются все ее соседи. Идентифицированные соседние точки объединяются в области. Метод выполняется рекурсивно, пока каждая точка изображения  $I'$  не будет исследована.

Геометрические пропорции полученных областей проверяются на соответствие пластине номерного знака. Если соответствие не выполняется, то выделенная область изображения не считается номерным знаком.

Достоинством предложенного метода обнаружения является его инвариантность к размеру, повороту и неравномерному освещению номерной пластины.

## 2. Выделение символов на номерном знаке

Целью данного этапа является разбиение области изображения номерного знака на области отдельных символов.

Размер номерного знака на изображении может варьироваться, поэтому обнаруженную область целесообразно трансформировать к размеру, заданному априорно. Будем полагать, что все символы номерного знака имеют схожие геометрические пропорции и яркость символов значительно отличается от яркости фона. Данную особенность будем использовать для выделения символов на номерном знаке. Предлагаемый метод, основывается на анализе горизонтальной проекции  $h$  изображения пластины номерного знака. Участок проекции  $h$ , соответствующий символу, определяется как последовательность столбцов, значение которых не превышает граничное  $h_{гр}$ . Данные столбцы маркируются как символ.

Значение проекции  $h(x)$  изображения соответствует средней яркости точек  $x$ -го столбца изображения  $I$ :

$$h(x) = \frac{1}{n} \sum_{y=1}^n I(x, y),$$

где  $x = \overline{1, m}$ ,  $y = \overline{1, n}$ ,  $m$  – количество столбцов изображения  $I$ ,  $n$  – количество строк изображения  $I$ .

Граничное значение определяется как математическое ожидание горизонтальной проекции изображения с учетом корректирующего коэффициента:  $h_{гр} = 1,3M\{h\}$ .

На рис. 2 приведен пример выделения символов на изображении номерного знака.

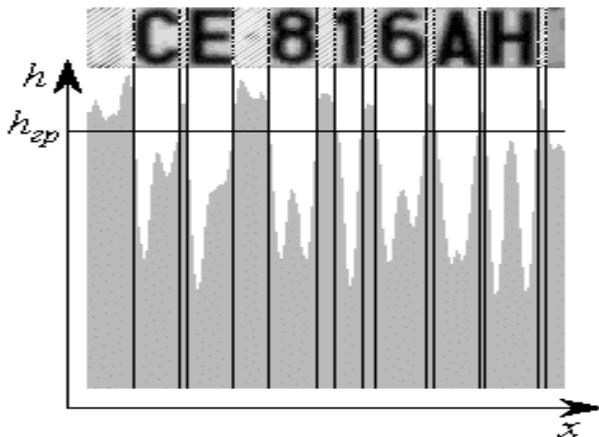


Рисунок 2 – Выделение символов на изображении номерного знака

Использование адаптивного порога  $h_{гр}$  позволяет осуществлять выделение символов на номерных знаках с различной освещенностью.

Маркированные столбцы выделяются как отдельные изображения символов и приводятся к размеру  $32 \times 20$ . Такой размер изображения сохраняет информативные признаки символа, необходимые для его дальнейшего распознавания.

### 3. Распознавание символов номерного знака

Целью данного этапа является разделение изображений символов номерного знака на классы и сопоставление каждому классу кода символа текста.

Нейронные сети широко используются для оптического распознавания символов [7–9]. Нейронные сети более устойчивы, чем эвристические методы распознавания, если входное изображение зашумлено.

Авторами предлагается осуществлять распознавание символов номерного знака с помощью набора нейронных сетей, организованных в два каскада. На рис. 3 приведена схема распознавания символа.

Первый каскад состоит из 20 нейронных сетей прямого распространения и определяет, к какой группе принадлежит распознаваемый символ. Разбиение символов алфавита на группы обусловлено геометрической схожестью некоторых из них. Алфавит был разбит на следующие группы символов: <2,7,Z>, <E,F,L>, <H,M,N>, <0,D,Q>, <5,S>, <8,B>, <C,G>, <P,R>, <U,W,V>, <X,Y>. Для нейросетей задавались: количество входов – 640, количество нейронов скрытого слоя – 25, количество выходов – 1.

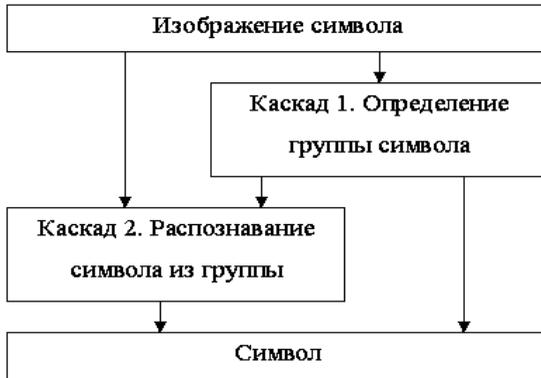


Рисунок 3 – Схема распознавания символа

Каждая нейронная сеть первого каскада определяет принадлежность символа к соответствующей группе. Символы, не относящиеся к какой-либо группе (1, 3, 4, 6, 9, А, I, J, К, Т), распознаются непосредственно на первом каскаде.

Второй каскад состоит из 10 нейронных сетей прямого распространения, и осуществляет распознавание символа при условии, что он принадлежит к определенной группе. Каждая нейронная сеть второго каскада имеет 640 входов и 30 нейронов в скрытом слое. Количество выходов соответствует количеству символов в группе, для которой осуществляется распознавание.

Достоинством предложенного метода является его высокая эффективность распознавания геометрически схожих символов.

#### 4. Система распознавания номерных знаков

На основании предложенных методов была создана автоматическая система распознавания номерных знаков. Для реализации системы использовалась среда разработки Microsoft Visual Studio 6.0.

Структура разработанной системы основана на модульном подходе. Каждый из этапов распознавания номерных знаков вынесен в отдельный модуль. Система состоит из следующих модулей:

- основной модуль – реализует интерфейс пользователя с системой;
- модуль обнаружения номерных пластин – содержит классы, реализующие решение задачи обнаружения номерной пластины на изображении;
- модуль выделения символов на номерном знаке – содержит классы, реализующие решение задачи выделения символов на изображении номерного знака;

– модуль распознавания символов – содержит классы, описывающие нейронные сети прямого распространения и функции, реализующие распознавание символа по предложенному авторами методу;

– модуль низкоуровневой обработки изображений – содержит класс, обеспечивающий выполнение низкоуровневых операций (загрузка, сохранение) над изображением.

Функциональная схема разработанной системы приведена на рис. 4.

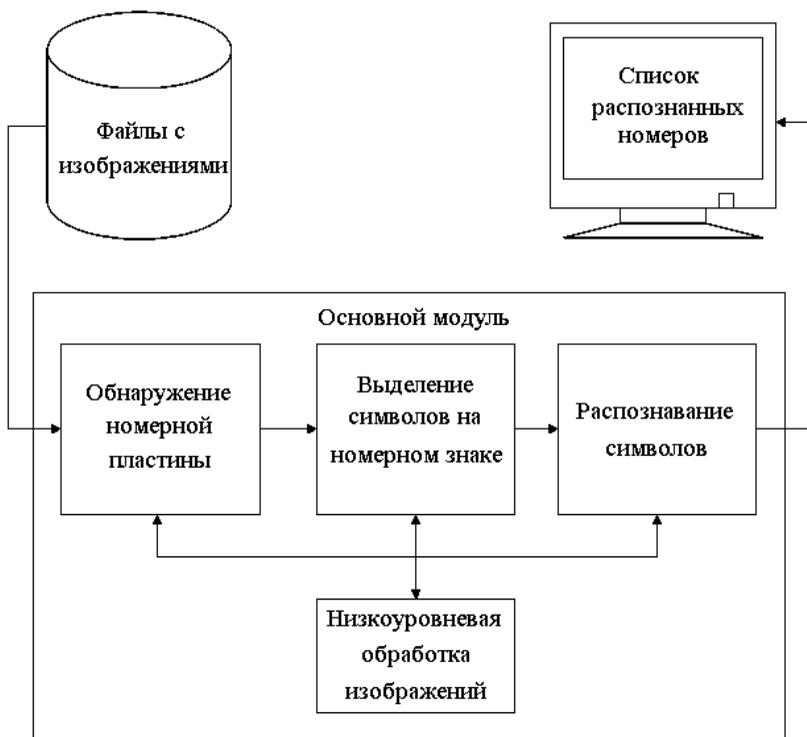


Рисунок 4 – Функциональная схема разработанной системы

Входными данными системы являются изображения в оттенках серого, полученные в условиях реального дорожного движения. Система поддерживает форматы изображений: BMP, JPEG.

Выходными данными системы является список обнаруженных и распознанных номерных знаков на входном изображении.

Иллюстрация работы системы приведена на рис. 5.

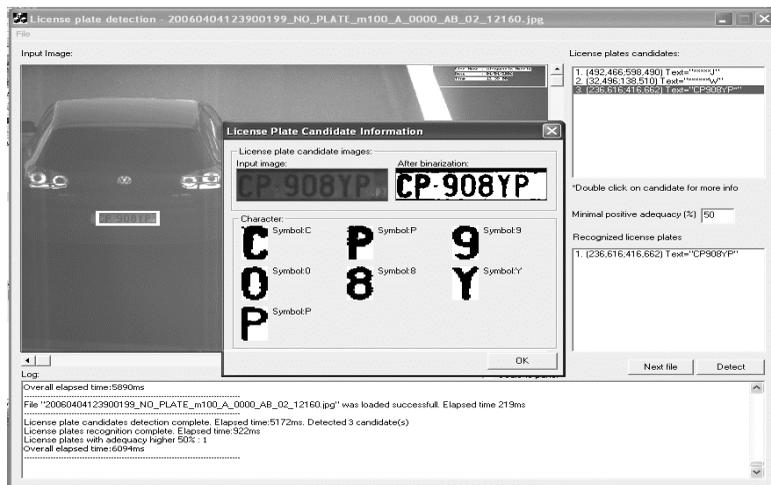


Рисунок 5 – Иллюстрация работы системы

## 5. Эксперименты и результаты

Разработанная система распознавания использовалась при проведении экспериментов. Нейронные сети, используемые на этапе распознавания символов номерного знака, были предварительно обучены на 7548 изображениях символов.

В результате тестирования разработанной системы на выборке, содержащей 18036 изображений, полученных в условиях реальных съемок дорожного движения на автострадах Италии, были получены следующие результаты:

- среднее время распознавания номерного знака для изображения 1600×1200 точек на компьютере с процессором Intel Celeron 2,5 ГГц и 512 Мб ОЗУ составляет 1,5 с.;

- количество верно выделенных номерных знаков составило 17675 (98%), из них верно прочитано 16350 номерных знаков (92,5%). Таким образом, процент правильного выделения и распознавания номерных знаков реализованной системой составляет 90,6%.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что предложенные методы и программная система, разработанная на их основе, в целом обладают высокой эффективностью и точностью распознавания номерных знаков, а система также является сопоставимой по сравнению с аналогичными коммерческими системами, используемыми в Италии и ЕС, обеспечивая при этом более высокую точность выделения номерных знаков.

### Заключение

В работе решена актуальная задача распознавания номерных знаков автомобилей на изображениях, полученных в условиях реального дорожного движения.

*Научная новизна работы* заключается в том, что: получил дальнейшее развитие метод обнаружения пластин номерных знаков, основанный на характерном чередовании минимумов и максимумов функции яркости, построенной для строки изображения; впервые предложен метод выделения символов, основанный на адаптивном поиске символов на горизонтальной проекции изображения номерного знака; предложен новый метод распознавания символов, основанный на использовании двух каскадов нейросетей.

*Практическая ценность* работы состоит в том, что создана автоматическая система распознавания номерных знаков автомобилей, способная эффективно работать в режиме реального времени.

Направлением дальнейших исследований является разработка эффективных методов очистки изображения номерного знака от различных шумов, что позволит повысить процент корректного распознавания.

Работа выполнена как часть НИР ООО "МПА Групп" «Разработка математического и информационного обеспечения интеллектуальной системы визуального контроля транспортных средств» (№ гос. регистрации 0106U012013) по договору творческого содружества между Запорожским национальным техническим университетом и ООО "МПА Групп".

### Перечень ссылок

1. A *real-time* license plate recognition (LPR) system <http://visl.technion.ac.il/projects/2003w24>.
2. License plate recognition software <http://visl.technion.ac.il/projects/2004s03>.
3. Zamir Vehicle Recognition – LPR/ANPR systems <http://www.zamir.co.il>.
4. SYDE. License Plate Recognition System. [http://www.systems.uwaterloo.ca/workshop\\_license\\_recog.htm](http://www.systems.uwaterloo.ca/workshop_license_recog.htm).
5. Barroso V., Dagless J., Rafael E.L., Bulas-Cruz A. Number plate reading using computer vision. IEEE – International Symposium on Industrial Electronics ISIE'97. – 1997. – №3. – P. 761–766.
6. Pavlidis T., Liow Y.-T. Integrating Region Growing and Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1990. – №3. – P. 225–233.
7. Каллан П. Основные концепции нейронных сетей. – СПб.: Вильямс, 2001. – 288 с.
8. Дубровин В.И., Субботин С.А., Богуслав А.В., Яценко В.К. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей: Монография. – Запорожье: ОАО "Мотор-Сич", 2003. – 279 с.
9. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности /Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. – Х.: Основа, 1997. – 112 с.

**Рецензент** – д.ф.-м.н., профессор Бахрушин В.Е. (Запорожье, Гуманитарный университет "ЗИГМУ").

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.01.2007 г.).

*Поступила 29.01.2007 г. После доработки 03.02.2007 г.*

*Ivanov G.A., Larionov A.A., Panin D.V.* **Automatization of vehicle license plate recognition**

The actual problem of license plate recognition on image taken under real road traffic conditions is solved. The new method of license plate segmentation based on analysis of the horizontal projection of the license plate image and character recognition method based on using of two cascades of neural networks are proposed. The method of license plate detection based on the analysis of brightness function computed for each image row has received the further development. The effective real-time license plate recognition system is developed.

*Иванов Г.А., Ларионов А.А., Панин Д.В.* **Автоматизация распознавания номерных знаков транспортных средств**

Решена актуальная задача распознавания номерных знаков автомобилей на изображениях, полученных в условиях реального дорожного движения. Предложены новый метод выделения символов, основанный на анализе горизонтальной проекции изображения номерного знака, и метод распознавания символов, основанный на использовании двух каскадов нейронных сетей. Получил дальнейшее развитие метод обнаружения номерного знака, основанный на анализе функции яркости, построенной для строки изображения. Создана автоматическая система распознавания номерных знаков автомобилей, способная эффективно работать в режиме реального времени.

*Ivanov G.O., Lariionov A.O., Panin D.V.* **Автоматизация розпознавання номерних знаків транспортних засобів**

Вирішено актуальне завдання розпознавання номерних знаків автомобілів на зображеннях, отриманих в умовах реального дорожнього руху. Запропоновано новий метод знаходження символів, заснований на аналізі горизонтальної проекції зображення номерного знаку, та метод розпознавання символів, заснований на використанні двох каскадів нейронних мереж. Дістав подальшого розвитку метод локалізації номерного знаку, заснований на аналізі функції яскравості, побудованої для рядка зображення. Створено автоматичну систему розпознавання номерних знаків автомобілів, здатна ефективно працювати в режимі реального часу.



УДК 004.93

## ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*Ходаков В.Е., Жарикова М.В.*

Херсонский национальный технический университет

### Введение

*Постановка задачи.* Лесные пожары наносят значительные убытки человеку и окружающей его среде. Среди отрицательных последствий пожаров можно выделить следующие: снижение защитных, водоохранных и других полезных свойств леса, уничтожение полезной фауны, гибель массивов ценных древесных пород, прерывание естественного процесса лесовозобновления и почвообразования, радиоактивное загрязнение близлежащих населенных пунктов в результате переноса радионуклидов продуктами горения, загрязнение рек, озер вследствие смыва в них продуктов горения, гибель или более позднее вызревание сельскохозяйственных культур. В связи с вышеперечисленным, изучение лесных пожаров является очень важной задачей. Так как экспериментальное изучение лесного пожара является дорогостоящим и не представляется возможным проводить полное физическое моделирование, представляют интерес теоретические методы исследования.

В настоящее время существует большое количество работ по моделированию лесных пожаров. Одни из них основаны на физике горения [1], другие – на статистических данных о реальных пожарах [2–5].

Успешность применения известных статистических моделей [2–5] лесных пожаров ограничена условиями, подобными тем, при которых происходили реальные пожары.

Среди физических моделей лесных пожаров наиболее примечательны модели Гришина [1]. Они наиболее полно учитывают весь комплекс физико-химических процессов, протекающих в зоне пожара. Физические модели универсальны, так как учитывают любые природные

условия. Однако, применение физических моделей на практике сопряжено со многими трудностями. Одна из проблем, затрудняющая использование физических моделей пожаров, связана с тем, что для применения таких моделей требуется большое количество разнородных исходных данных, характеризующих как область местности, на которой развивается пожар, так и метеоусловия. Так как факел пламени распространяется в трехмерном пространстве, то для повышения точности модели необходимо рассматривать физико-химические процессы, развивающиеся в объеме. Зона пожара, в которой протекают эти процессы, многофазна, то есть состоит из набора относительно однородных пространственных элементов (газово-воздушная фаза, ствол дерева, крона дерева). Это затрудняет ее представление в виде непрерывной среды. Исходные данные, характеризующие форму, размеры и расположение пространственных элементов зоны пожара, слабо структурированы. Физическая модель не позволяет формализовать эти данные. Что касается данных, характеризующих метеоусловия, то они неточны.

В связи со сложностями практического использования физических моделей авторы опираются на статистические. Указанный выше недостаток статистических моделей устраняется с использованием обучающихся моделей. Машинное обучение является одним из основных направлений искусственного интеллекта [6,7].

Рассматриваемую задачу оценки последствий лесных пожаров на основе статистических данных можно интерпретировать как задачу классификации. Эту задачу трудно описать символьными моделями, так как предметная область плохо формализуется с помощью явно определенного синтаксиса. Для решения таких задач лучше всего подходят сети связей, а именно – нейронные сети.

*Целью статьи* является описание подхода к решению поставленной задачи с использованием нейронных сетей.

### **1. Выбор архитектуры сети**

Для решения поставленной задачи была выбрана сеть с прямой связью и обратным распространением ошибок. Число входных и выходных элементов такой сети диктуется рассматриваемой проблемой (числом входных признаков и числом известных классов) [6–9]. Однослойные сети, не имеющие скрытых слоев, могут решать только линейные задачи. Поэтому для решения поставленной задачи была выбрана сеть с  $m$  скрытыми слоями, где  $m \geq 1$ .

Для многослойных сетей необходимо рассматривать нелинейные функции активности, а для алгоритма обратного распространения ошибок такая сеть должна быть непрерывной, дифференцируемой и

монотонно возрастающей. Функцией, удовлетворяющей всем этим требованиям, является сигмоидальная логистическая функция, выходные значения которой непрерывно заполняют диапазон от 0 до 1:

$$f(\text{net}) = \frac{1}{1 + e^{-\text{net}}}, \quad (1)$$

где  $\text{net}$  – суммарный взвешенный вход нейрона.

Значение комбинированного входа нейрона  $j$  определяется как:

$$\text{net}_j = \sum_{i=1}^n x_i w_{ij}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – входные элементы,  $w_{ij}$  – веса связей  $i$ -го элемента (нейрона или входного признака) с  $j$ -м нейроном.

## 2. Выделение набора признаков

Для построения нейронной сети выделим признаки, необходимые для классификации лесных пожаров.

Вся необходимая информация содержится в трех таблицах базы данных (БД): таблице данных по лесным пожарам, таблице метеоусловий и таблице таксационного описания лесничеств. Первая таблица содержит сведения по каждому конкретному пожару, вторая содержит информацию о метеоусловиях в те дни, когда происходили пожары, а третья – информацию о природных условиях местности, где происходили пожары. На рис. 1 представлена схема взаимосвязей таблиц БД с перечислением полей, которые содержит каждая таблица. Стрелками показаны связи таблиц.

Таким образом, в качестве признаков для построения нейронной сети были взяты поля таблиц БД. У нас предполагается задача классификации с учителем, поэтому необходимые классы должны быть заранее определены, а набор тестовых данных должен содержать примеры, каждый из которых отнесен к определенному классу. Поэтому необходимо задать классы лесных пожаров, которые будут на выходе нейронной сети. Для построения классов были использованы 9-й и 10-й признаки из таблицы «лесные пожары». Причем область значений каждого из этих двух признаков была разбита на 5 интервалов. В результате было определено 25 классов лесных пожаров. В зависимости от принадлежности пожара к определенному классу можно оценить его последствия.

## 3. Подготовка тестового набора данных

Так как сигмоидальная функция, выбранная в качестве пороговой, имеет область значений от 0 до 1, то по признакам, значения которых выходят за границы этого интервала, необходимо выполнить предварительную обработку данных – перевод с помощью масштабирования всех значений в диапазон от 0 до 1. Простейшим и подходя-

щим в нашем случае методом масштабирования является деление значения признака на максимальное значение этого признака. В результате наибольшее значение будет ограничено значением 1.

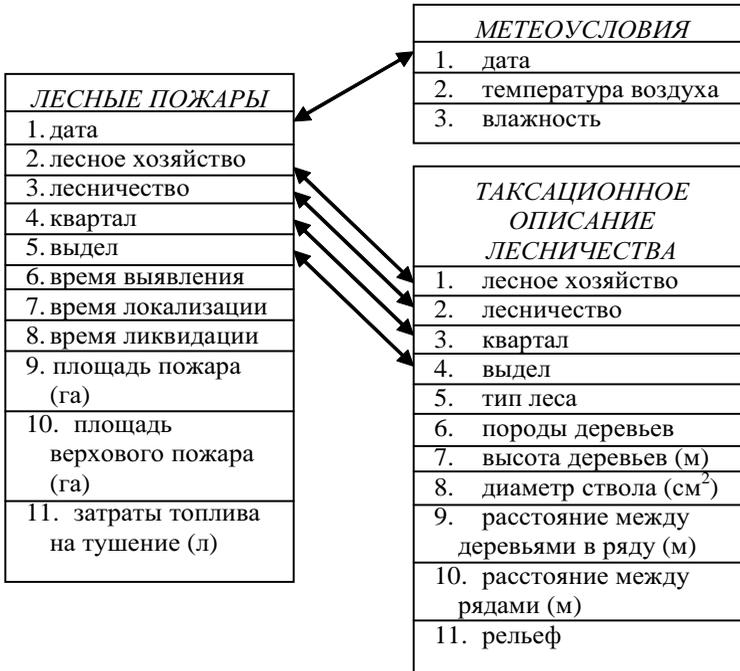


Рисунок 1 – Схема БД

Для описанного набора признаков наблюдается избыточность данных. Избыточность означает, что можно описать данные, используя меньше признаков, но сохранив при этом всю информацию. Поля 2, 3, 4, 5 таблицы «лесные пожары», а также 1, 2, 3, 4 таблицы «таксационное описание лесничества» содержат избыточную информацию. Эти 4 поля однозначно определяют участок местности, на котором происходит пожар. Обозначим поле «лесное хозяйство» переменной  $l$ , поле «лесничество» переменной  $s$ , поле «квартал» переменной  $k$ , а поле «выдел» переменной  $v$ . Значения всех этих полей – положительные целые числа, меньше 100. Поэтому их можно заменить одним полем, которое вычисляется по формуле:

$$m = l \times 10^6 + s \times 10^4 + k \times 10^2 + v. \quad (3)$$

### Заключение

В работе решается актуальная задача оценки последствий лесных пожаров. Решение этой задачи позволит выявлять наиболее опасные участки местности с целью планирования противопожарных мероприятий таких, как инспектирование местности, размещение противопожарных служб, прокладывание противопожарных полос, рассчитывать пути эвакуации людей при пожаре, разрабатывать оперативные планы ликвидации пожаров.

Предлагаемый подход к оценке последствий лесных пожаров, в отличие от существующих, позволяет прогнозировать площадь пожара в любых природных и погодных условиях, которые входят в область значений признаков, не прибегая к физико-химическим формулам.

Работа выполняется в рамках госбюджетной темы «Система поддержки принятия решений при ликвидации лесных пожаров» (номер государственной регистрации: 0105U000951). В настоящее время авторами создана электронная карта лесничества Херсонской области и использованием географической информационной системы MapInfo Professional [10, 11]. В дальнейшем предполагается привязать модель оценки последствий лесных пожаров к электронной карте и дополнить ее моделью принятия решений для их ликвидации с целью создания системы поддержки принятия решений.

### Перечень ссылок

1. *Гришин А.М.* Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними – Новосибирск: «Наука», 1992. – 408 с.
2. *Воробьев О.Ю., Валендик Э.Н.* Вероятностное множественное моделирование распространения лесных пожаров. – Новосибирск.: Наука, 1978. – 160 с.
3. *Воробьев О.Ю.* Среднемерное моделирование. – М.: Наука, 1984. – 136 с.
4. *Ball G.L., Guertin D.P.* Fire modelling // International Journal of Wildland Fire. – 1990. – №1(2). – P. 50–54.
5. *Ball, G.L., Guertin, D.P.* Improved fire growth modeling // International Journal of Wildland Fire. – 1992. – №2(2). – P. 47–54.
6. *Люгер Д.Ф.* Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864 с.
7. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект. Современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1208 с.
8. *Хайкин С.* Нейронные сети. Полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
9. *Каллан Р.* Основные концепции нейронных сетей. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 288 с.
10. *Ходаков В.Е., Граб М.В.* Моделирование распространения лесного пожара // Вестник Херсонского государственного технического университета. – 2002. – № 1(14). – С. 312–315.
11. *Ходаков В.Е., Граб М.В.* Моделирование распространения лесных пожаров // Вестник Херсонского государственного технического университета. – 2003. – № 2(18). – С. 33–41.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Марасанов В.В. (Херсон, Херсонский аграрный университет).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой информационных технологий ХНТУ (Протокол № 8 от 12.01.2007 г.).

*Поступила* 30.01.2007 г.

***Khodakov V.Y., Zharikova N.V. Forest fires consequences estimation with using of neural networks***

The approach to a decision of actual task of forest fires consequences estimation with using of neural networks is proposed. Neural network architecture is proposed, the set of factors is singled out, the method of test data set preparation is described.

***Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Оценка последствий лесных пожаров с использованием нейронных сетей***

Предложен подход к решению актуальной задачи оценки последствий лесных пожаров с помощью нейронных сетей. Предложена архитектура нейронной сети, выделен набор признаков, описан способ подготовки тестового набора данных.

***Ходаков В.Є., Жарікова М.В. Оцінка наслідків лісових пожеж з використанням нейронних мереж***

Запропоновано підхід до вирішення актуального завдання оцінки наслідків лісових пожеж за допомогою нейронних мереж. Запропоновано архітектуру нейронної мережі, виділений набір ознак, описаний спосіб підготовки тестового набору даних.

УДК 519.71

**ПОСТРОЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ARX МОДЕЛИ  
НА ОСНОВЕ РАДИАЛЬНО-БАЗИСНОЙ СЕТИ**

*Ляшенко С.А.*

Харьковский национальный технический университет  
сельского хозяйства имени Петра Василенко

**Введение**

Искусственные нейронные сети (ИНС) получают все большее распространение при решении многих практических задач, к числу которых в первую очередь относится построение модели (идентификация) сложных нелинейных динамических объектов. Успешное при-

менение ИНС для решения этой задачи основано на использовании отличных аппроксимирующих свойств нейронных сетей.

Среди огромного количества существующих в настоящее время сетей в задачах идентификации наиболее эффективными оказались многослойный персептрон (МП) и радиально-базисные сети (РБС) [1]. Следует отметить, что для обоих типов сетей получено и исследовано достаточно большое количество алгоритмов обучения. Так при идентификации нелинейных динамических объектов в режиме on-line используются алгоритмы обратного распространения ошибки [2] либо рекуррентный алгоритм предсказания ошибки [3]. Однако практическая реализация данных алгоритмов связана со значительными вычислительными затратами.

Альтернативой МП являются РБС. Несмотря на существенное возрастание количества вычислений при увеличении числа используемых в данной сети базисных функций, данные ИНС остаются весьма привлекательными в первую очередь потому, что для их обучения применяются эффективные алгоритмы обучения, хорошо зарекомендовавшие себя при решении задач линейного регрессионного анализа. Отметим, что первоначально РБС описывались линейными относительно неизвестных параметров уравнениями. Однако в общем случае, помимо линейно входящих в уравнения, данные сети имеют и параметры, которые нелинейно входят в эти уравнения.

*Целью работы* являлось решение задачи определения обоих типов параметров на основе минимизации квадратичного функционала от ошибки оценивания и ошибки прогнозирования.

## 1. Нейросетевая модель нелинейного динамического объекта

Рассмотрим нелинейный динамический объект, описываемый уравнением

$$y(k) = f[y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n)] + \varepsilon(k), \quad (1)$$

где  $y(i), u(i)$  – соответственно выходной и управляющий сигналы в момент времени  $i$ ;  $f[\cdot]$  – неизвестная нелинейная функция;  $\varepsilon(k)$  – помеха.

Обозначим вектор обобщенного входного сигнала как

$$x(k) = [y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n)]^T. \quad (2)$$

Тогда уравнение (1) можно переписать в виде:

$$y[k] = f[x(k)] + \varepsilon(k). \quad (3)$$

Одна из возможных аппроксимаций нелинейности  $f[\cdot]$  системой базисных функций  $\varphi_i(x)$ ,  $i = \overline{1, p}$ , где  $p = m + n + 1$ , приводит к следующей нелинейной модели ARX:

$$\hat{y}(k) = \varphi_0(x) + \sum_{i=1}^m \varphi_i^y(x) y(k-i) + \sum_{j=1}^n \varphi_j^y(x) u(k-j) + \varepsilon(k). \quad (4)$$

Вид и количество базисных функций  $\varphi_i(x)$ ,  $i = \overline{1, p}$  определяют не только структуру математической модели, но и позволяют свести задачу идентификации к задаче параметрической идентификации.

Применение нейросетевого подхода также предполагает построение модели (4), где в качестве базисных функций  $\varphi_i(x)$ ,  $i = \overline{1, p}$  используются так называемые функции радиального основания [1]. Использование наиболее широко распространенных в задачах аппроксимации гауссовских функций вида:

$$\varphi_i(x) = \exp\left\{-\frac{\|x - \mu_i\|^2}{\sigma_i^2}\right\}, \quad (5)$$

где  $\mu_i, \sigma_i$  – соответственно центры и радиусы базисных функций:  $\|\cdot\|$  – евклидова норма, позволяет получить следующую нейросетевую ARX модель:

$$\hat{y}(k) = w_0 + \sum_{i=1}^p w_i \exp\left\{-\frac{\|x - \mu_i\|^2}{\sigma_i^2}\right\} + \varepsilon(k), \quad (6)$$

где  $w_i$  ( $i = \overline{0, p}$ ) – подлежащие определению весовые параметры.

Так как параметры  $w_i$  входят в уравнение (6) линейно, а  $\mu_i, \sigma_i^2$  – нелинейно, то модель (6) может быть представлена следующим образом:

$$\hat{y}(k) = w^T \cdot \varphi(\theta, x(k)) + \varepsilon(k), \quad (7)$$

где  $\theta = (\mu_1^T, \mu_2^T, \dots, \mu_p^T; \sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_p^2)^T$  – вектор нелинейно входящих в данную модель параметров.

## 2. Алгоритм обучения нейросетевой модели

Задача обучения сети заключается в определении всех её параметров на основании предъявления обучающих пар  $\{x(k), y(k)\}$  и сравнения реальной реакции сети  $\hat{y}(k)$  с требуемой  $y(k)$ . Обычно процедура обучения сети представляет собой определенный алгоритм минимизации некоторого выпуклого функционала от ошибки  $\varepsilon(k) = y(k) - \hat{y}(k)$ . Так минимизация квадратичного функционала при-

водит к методу наименьших квадратов, одной из возможных реализаций которого является следующая.

После получения информации об  $N$  ( $N \geq p$ ) измерениях входных и выходных сигналов объекта вместо уравнения (3) будем иметь систему уравнений

$$Y_N = F[x_N] + E_N, \quad (8)$$

где  $Y_N = (y(1), y(2), \dots, y(N))^T$ ;  $F[x_N] = (f[x(1)], f[x(2)], \dots, f[x(N)])^T$ ;  $E_N = (\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(N))^T$ .

Аналогично после подачи на вход ИНС  $N$  обучающих пар  $\{x(k), y(k)\}$ ,  $k = 1, \dots, N$ , вместо (7) получим систему линейных относительно  $w$  и нелинейных относительно  $\theta$  уравнений

$$\hat{Y}_N = \Phi(\theta, X)w + E_N(k), \quad (9)$$

где  $\hat{Y}_N = (\hat{y}(1), \hat{y}(2), \dots, \hat{y}(N))^T$ ;  $\Phi(\theta, X_N) = [\varphi(\theta, x(1)), \varphi(\theta, x(2)), \dots, \varphi(\theta, x(N))]^T$ .

МНК – оценка входящих в (7) линейно весовых параметров  $w$ , получаемая путем минимизации квадратичного функционала  $\|E(k)\|^2$  при первоначально выбираемых некоторых фиксированных значениях нелинейных параметров  $\theta_0$ , имеет вид:

$$w_0 = [\Phi^T(\theta_0, X)\Phi(\theta_0, X)]^{-1}\Phi^T(\theta_0, X)Y_N. \quad (10)$$

Данная оценка используется в уравнении модели (9) для получения прогнозных значений выходных сигналов модели  $\hat{y}(k+1|k), \hat{y}(k+2|k+1), \dots, \hat{y}(N|N-1)$ . Записывая данные значения в виде вектора  $\hat{Y}_{N|N-1} = (\hat{y}(k+1|k), \hat{y}(k+2|k+1), \dots, \hat{y}(N|N-1))^T$ , можно сформировать критерий оценивания

$$J_{N|N-1} = \left\| \hat{Y}_{N|N-1} - Y_N \right\|^2,$$

минимизация которого позволит получить оценки нелинейно входящих параметров  $\theta$ . В частности, минимизация данного критерия с помощью алгоритма Левенберга-Маркварда приводит к следующей рекуррентной форме оценки  $\theta$ :

$$\begin{aligned} \theta(k+1) &= \theta(k) - \\ &- \gamma_k [\nabla J_{N|N-1}^T(k) \nabla J_{N|N-1}(k) + \alpha_k I]^{-1} \nabla J_{N|N-1}(k) E_{N|N-1}(k), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\alpha_k$  – параметр регуляризации;  $\nabla J_{N|N-1}(k) = [\partial J_{N|N-1} / \partial \theta(k)]^T$  – якобиан;  $E_{N|N-1}(k) = \hat{Y}_{N|N-1}(k) - Y_N(k)$ ;  $\gamma_k$  – некоторой параметр, влияющий на скорость сходимости алгоритма;  $I$  – единичная матрица.

На основании данной оценки (11) корректируется МНК – оценка (10) в соответствии с формулой

$$w(k+1) = [\Phi^T(\theta(k+1), x) \Phi(\theta(k+1), x)]^{-1} \Phi^T(\theta(k+1), x) Y(k+1). \quad (12)$$

С вычислительной точки зрения предпочтительнее оказывается алгоритм обучения, использующий процедуру приведения системы нормальных уравнений (9) к треугольному виду, т.е. факторизацию на основе, например, преобразований Хаусхолдера, Гивенса, Холесского или Грама-Шмидта. В этом случае матрица  $\Phi$  представляется в виде [4]:

$$\Phi = HA, \quad (13)$$

$$\text{где } A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} \dots a_{1N} \\ 0 & 1 & a_{23} \dots a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix};$$

$H = [h(1), h(2), \dots, h(N)]$  – матрица, столбцы которой ортогональны, т.е.  $w(i)^T w(j) = 0$  при  $i \neq j$ .

Это позволяет представить (9) так:

$$Y = Hg + E, \quad (14)$$

где  $g = (g(1)g(2)\dots g(N))^T$  – вектор ортогональных весов:

$$g = A\theta. \quad (15)$$

Классическая процедура Грама-Шмидта вычисления столбцов матрицы  $A$  и ортогонализации матрицы  $\Phi$  имеет вид

$$\begin{aligned} h_1 &= \varphi_1, \\ a_{ij} &= \frac{h^T(i)(j)}{\|h_i\|^2}, \quad 1 \leq i < j; \\ h(j) &= (j) - \sum_{i=1}^{j-1} a_{ij} h(i), \quad j = 2, 3, \dots, N. \end{aligned} \quad (16)$$

Однако более удобным, на наш взгляд, является рекуррентная оценка (12), получаемая путем использования блочного представления входящих в неё векторов и матриц и леммы об обращениях матриц. После несложных преобразований рекуррентная МНК – оценка весовых параметров  $W$  принимает вид:

$$w(k+1) = w(k) + G(k)P(k)\varphi(\theta(k), x)[y(k) - \hat{y}(k | k-1)], \quad (17)$$

$$P(k) = P(k-1) + G(k)P(k-1)\varphi(\theta(k), x)\varphi^T(\theta(k), x)P(k-1), \quad (18)$$

где  $G(k) = (1 + \varphi^T(\theta(k), x)P(k-1)\varphi(\theta(k), x))^{-1}, \quad (19)$

$P(k) = \alpha I, \quad \alpha \gg 0; w_0$  – вычисляется в соответствии с (10).

### Заключение

Для получения математической модели, адекватно отражающей свойства нелинейного динамического объекта, в работе решена актуальная задача построения нейросетевой модели на основе сети радиального основания.

*Научная новизна* работы заключается в том, что предложен эффективный алгоритм обучения сети, использующий МНК-оценку для линейно входящих в модель параметров и оценивание методом Левенберга-Марквардта нелинейно входящих параметров.

### Перечень ссылок

1. Бодянский Е.В. Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. – Харьков: Телетех, 2004. – 372с.
2. Billings S.A., Jamaluddin H.B., Chen S. A comparison of the backpropagation and recursive error algorithms for training neural networks // Mechanical Systems and Processing. – 1991. – № 5. – P. 233–255.
3. Chen S., Cowan C.F.N., Grant P.M. Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks // IEEE Trans. on Neural Networks. – 1991. – Vol.2. – №2. – P. 302–308.
4. Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232с.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Руденко О.Г. (Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой безопасности жизнедеятельности Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени П. Василенко (Протокол №4 от 25.12.06 г.).

*Поступила* 22.01.2007г.

### **Lyashenko S.A. Construction of the nonlinear ARX model on the basis of a radial basis network**

The identification method of nonlinear dynamic objects on the ground of artificial neural networks of the radial basis has received a further development. The algorithm of the network training, allowing to define its

parameters entering into the description linearly and nonlinearly is offered. Practical significance of the given results consists in possibility to build with their help the mathematical models adequately reflecting properties of complex nonlinear dynamic objects of the various nature.

*Ляшенко С.А.* **Построение нелинейной ARX модели на основе радиально-базисной сети**

Получил дальнейшее развитие метод идентификации нелинейных динамических объектов на основе искусственных нейронных сетей радиального основания. Предложен алгоритм обучения сети, позволяющий определить её параметры, входящие в описание линейно и нелинейно. Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что с их помощью можно строить математические модели, адекватно отражающие свойства сложных нелинейных динамических объектов различной природы.

*Ляшенко С.О.* **Побудова нелінійної ARX моделі на основі радіально-базисної мережі**

Дістав подальшого розвитку метод ідентифікації нелінійних динамічних об'єктів на основі штучних нейронних радіально-базисних мереж. Запропоновано алгоритм навчання мережі, який дає можливість визначити її параметри, що входять в опис лінійно та нелінійно. Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що з їх допомогою можна будувати математичні моделі, які адекватно відображають властивості нелінійних динамічних об'єктів різної природи.

УДК 681.324

**ЛОКАЛЬНО-АСИНХРОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ  
УРАВНЕНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ НА  
КЛЕТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЯХ**

*Нестеренко Б.Б., Новотарский М.А.*

Институт математики НАН Украины

**Введение**

Клеточные нейронные сети (КНС), как новый вид нейронных сетей, предложены в 1988 году [1]. Базируясь на хорошо разработанном методе электрогидродинамических аналогий, они сразу вызвали значительный научный интерес в самых различных областях.

Поскольку КНС рассматривается как однородная вычислительная структура с локальными связями, то естественно предположить,

что она может быть использована для решения уравнений математической физики. Наличие такой возможности упоминается уже в пионерских работах создателей КНС [1, 2].

*Постановка задачи.* В связи с существенным ростом производительности современных компьютеров актуальной стала идея имитационного моделирования КНС. В этом случае можно достичь как высокой точности, так и использования многомерных архитектур.

В работе предлагается использовать преимущества численных методов при решении краевых задач на КНС. Принципиальным отличием применения численных методов от прямых методов в КНС следует считать необходимость решения задачи синхронизации потоков данных. Данная проблема решается путем применения специальных локально-асинхронных методов, обеспечивающих сходимость итерационного процесса независимо от порядка взаимодействия между клетками.

### 1. Свойство локальности

При решении на КНС уравнений математической физики первый шаг состоит в дискретизации непрерывной области определения искомой функции для ее задания с помощью массива клеток. Рассмотрим порядок такой дискретизации на примере уравнения теплопроводности.

Краевую задачу, описываемую уравнением теплопроводности, запишем в виде:

$$\frac{\partial U(x,t)}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 U(x,t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

при следующих начальных и граничных условиях:

$$U(0,t) = 0, U(l,t) = 0, t > 0, \quad U(x,0) = f(x), 0 \leq x \leq l.$$

Введем шаг дискретизации по пространству  $h$  и шаг дискретизации по времени  $\tau$ , исходя из условий:  $m = l/h$  – целое;  $x_i = ih$  – значение  $x$  в точке  $x_i$ ;  $t_j = j\tau$  – значение  $t$  в точке  $j$ .

Сформируем разностный метод путем приближенного представления частных производных по времени и пространству с помощью рядов Тейлора:

$$\frac{\partial U(x_i, t_j)}{\partial t} = \frac{U(x_i, t_j) - U(x_i, t_{j-1})}{\tau} + \frac{\tau}{2} \cdot \frac{\partial^2 U(x_i, \sigma_j)}{\partial t^2}, \quad \sigma_j \in (t_{j-1}, t_j); \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 U(x_i, t_j)}{\partial x^2} = \frac{U(x_{i+1}, t_j) - 2U(x_i, t_j) + U(x_{i-1}, t_j))}{h^2} - \frac{h^2}{12} \cdot \frac{\partial^4 U(v_i, t_j)}{\partial x^4}, \quad (3)$$

$$v_i \in (x_{i-1}, x_{i+1}).$$

Запишем уравнение (1), используя конечные разности из (2), (3) и заменив непрерывную функцию  $U(x, t)$  разностной функцией  $w$ , определенной только в точках дискретизации и отвечающей условию  $U(x_i, t_j) = w_{i,j}$ :

$$\frac{w_{i,j} - w_{i,j-1}}{\tau} - a^2 \frac{w_{i+1,j} - 2w_{i,j} + w_{i-1,j}}{h^2} = 0. \quad (4)$$

Локальная погрешность, представления в виде (4), равна:

$$\Delta_{ij} = -\frac{\tau}{2} \cdot \frac{\partial^2 U(x_i, \sigma_j)}{\partial t^2} - a^2 \frac{h^2}{12} \cdot \frac{\partial^4 U(x_i, t_j)}{\partial x^4}.$$

Введя замену  $\lambda = \frac{\tau a^2}{h^2}$  и сведя подобные члены, уравнение (4)

представим в виде:

$$w_{i,j-1} = (1 + 2\lambda)w_{i,j} - \lambda w_{i+1,j} - \lambda w_{i-1,j}, \quad (5)$$

где  $i = 1, 2, \dots, m-1$ ;  $j = 1, 2, \dots$

Исходя из начальных и граничных условий данной краевой задачи:

$$w_{i,0} = f(x_i) \quad \forall i = \overline{1, m-1}, \quad w_{0,j} = w_{m,j} = 0 \quad \forall j = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Используя зависимости (5), (6), данный разностный метод позволяет представить краевую задачу (1) в матричном виде:

$$\begin{pmatrix} (1+2\lambda) & -\lambda & 0 & \dots & 0 \\ -\lambda & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -\lambda \\ 0 & \dots & 0 & -\lambda & 1+2\lambda \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_{1,j} \\ w_{2,j} \\ \dots \\ \dots \\ w_{m-1,j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{1,j-1} \\ w_{2,j-1} \\ \dots \\ \dots \\ w_{m-1,j-1} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

При решении системы алгебраических уравнений (7) используются только локальные данные на заданном шаблоне, что дает возможность применить клеточную нейронную сеть. Однако решение системы с огромным количеством алгебраических уравнений вызывает существенные затруднения даже при использовании мощных компьютеров.

Более эффективным подходом следует считать применение приближенных итерационных методов, позволяющих достичь высокой точности при существенно меньших вычислительных затратах. Известны параллельные вычислительные структуры типа SIMD [3], реализующие синхронный порядок вычислений. Их основной недостаток заключается в существенных потерях времени на организацию процесса синхронизации, которые растут с ростом количества параллель-

но работающих нейронов. Поэтому параллельное решение реальных краевых задач на синхронных структурах весьма затруднено.

## 2. Свойство асинхронности

В данной работе предлагается использование для этих целей однородной асинхронной вычислительной среды с локальными связями, моделирующей работу клеточной нейронной сети. Принцип асинхронного взаимодействия в данном случае понимается как отсутствие каких-либо ограничений на моменты обмена данными между соседними нейронами, реализующими итерационные процессы вычисления искомой функции. Такой режим вычислений может быть интерпретирован как модель вычислений в классической КНС.

Метод, позволяющий достичь сходимости вычислительного процесса к решению краевой задачи, получил название локально-асинхронного метода [4]. Будем рассматривать данный метод, представив систему алгебраических уравнений (7) в виде:

$$\mathbf{L}w = f, \quad (8)$$

где  $\mathbf{L} = (l_1(w), l_2(w), l_3(w), \dots, l_n(w))$  – разностный оператор, задающий отображение  $\mathbf{L} : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$ ;  $w$  – искомая разностная функция;  $f$  – функция правой части.

Асинхронной итерационной последовательностью, соответствующей оператору  $\mathbf{L}$ , будем называть последовательность  $\{w(j)\}_{j=1}^{\infty}$  векторов  $w(j) \in \mathbf{R}^n$ , которая определяется рекурсивно по итерационной схеме:

$$w_i(j+1) = \begin{cases} w_i(j), & i \notin J_j, \\ [l_i[w_1(s_1(j)), \dots, w_k(s_k(j)), \dots, w_\eta(s_\eta(j))]], & i \in J_j. \end{cases} \quad (9)$$

Совокупность непустых подмножеств  $J_j = \{1, 2, \dots, \eta\}$  образует хаотическую последовательность  $\Phi = \{J_j\}_{j=1}^{\infty}$ , а задержки  $s_k(j)$  объединены в последовательность задержек  $S = \{s_k(j)\}_{j=1}^{\infty}$ ,  $k = 1, 2, \dots, \eta$ , отвечающую условиям:  $0 \leq s_k(j) \leq j$  при  $j = 1, 2, \dots$ ;  $\lim_{j \rightarrow \infty} (s_k(j)) = \infty$ .

Задержки  $s_k(j)$  дают возможность использования произвольных компонент векторов предшествующих итераций при вычислении вектора текущей итерации. Однако для достижения прогресса в вычислениях все компоненты вектора итерации должны периодически обновляться, что накладывает определенные ограничения на хаотическую последовательность  $\Phi$ . Будем называть  $\Phi$  оптимальной после-

довательностью при условии, что существует некоторая возрастающая последовательность  $\{m_r\}_{r=0}^{\infty}$ , удовлетворяющая условиям:

$$m_0 = 0; \quad \bigcup_{i=m_r+1}^{m_{r+1}} J_i = \{1, 2, \dots, \eta\}; \quad \bigcup_{i=m_r+1}^{m_{r+1}-1} J_i \subset \{1, 2, \dots, \eta\}; \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

При выполнении условий (10) на каждом очередном итерационном шаге в узлах сеточной области будут использоваться только обновленные компоненты итерационного вектора, что соответствует синхронному режиму вычислений.

Однако использование хаотического подмножества  $J_j$  для формирования очередного вектора итерации дает возможность организации вычислений с произвольными алгоритмами обновления предшествующих компонент. Поэтому нет необходимости ожидать обновления всех соответствующих компонент вектора итерации перед продолжением итерационного процесса в данной точке сетки.

Такой принцип организации вычислений является базовым свойством асинхронности рассматриваемого метода. В совокупности со свойством локальности, обуславливающим использование только некоторого подмножества компонент вектора итерации для успешного продолжения итерационного процесса в каждой точке сеточной области, получаем метод, который дает возможность применения клеточных нейронных сетей для решения многомерных краевых задач математической физики с высокой степенью дискретизации.

### 3. Нейроимитатор

Для реализации описанного метода построен нейроимитатор, пульт управления которым показан на рис.1.

Пульт дает возможность задавать начальные значения и константы модели. Имитатор допускает задание до 100 областей границ, описываемых отдельными граничными функциями от координат и значений переменных. Константы модели включают физическую конфигурацию пространства и константы итерационного процесса. Пульт также может задавать порядок запуска нейронов. Значение погрешности, которая является условием остановки процесса вычисления, задается индивидуально для каждого нейрона.

### Заключение

Работа посвящена разработке новых методов и алгоритмов численного решения уравнений математической физики на параллельных асинхронных структурах.

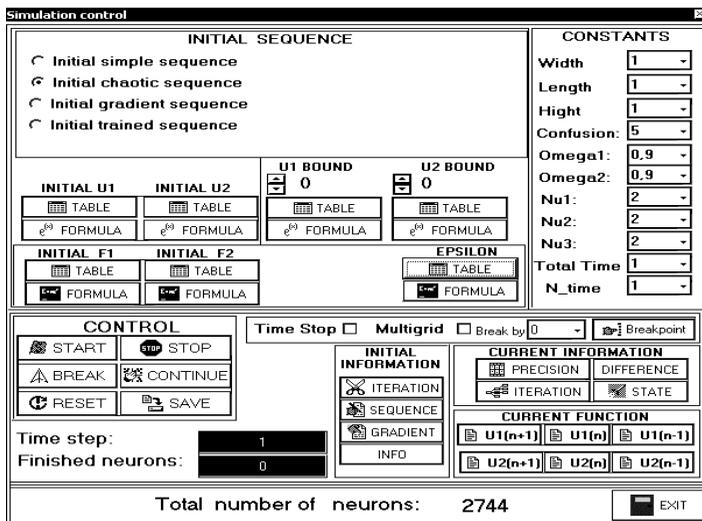


Рисунок 1 – Пульта управления нейроимитатором

*Научная новизна* работы заключается в том, что впервые предложен локально-асинхронный метод решения краевых задач математической физики на клеточных нейронных сетях, который позволяет получить сходимость к решению при отсутствии синхронизации между нейронами.

*Практическая ценность* работы состоит в том, что разработан нейроимитатор, обеспечивающий имитационное моделирование клеточных нейронных сетей, ориентированных на решение уравнений математической физики локально-асинхронным методом, проведены эксперименты, позволяющие оценить как характеристики метода, так и вычислительные свойства КНС.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР «Разработка параллельных методов и алгоритмов решения краевых задач математической физики» (№ гос. регистрации. 0198U003055).

### Перечень ссылок

1. *Chua L.O., Yang L.* Cellular Neural Networks: Theory // IEEE Transactions on circuits and Systems. – 1988. – Vol. 35, №10. – P. 1257–1272.

2. *Roska T., Chua L.O.* The CNN Universal Machine: An Analog Array Computer // IEEE Transactions on Circuits and Systems II. – 1993. – Vol. 40. – P. 163–173.

3. *Нестеренко Б.Б., Новотарский М.А.* Мультипроцессорные системы. – Киев: Институт математики АН Украины, 1995. – 408 с.

4. *Новотарский М.А., Нестеренко Б.Б.* Штучні нейронні мережі: обчислення. – Київ: Інститут математики НАН України, 2004. – 408 с.

**Рецензент** – д.ф.-м. н., с.н.с. Солодкий С.Г. (Киев, Институт математики НАН Украины).

**Статья рекомендована к публикации** отделом теории приближений Института математики НАН Украины (Протокол № 12 от 19.01.2007г.).

*Поступила 25.01.2007 г. После доработки 29.01.2007 г.*

*Nesterenko B.B., Novotarskiy M.A. **Locally asynchronous method for solving the mathematical physics equations on cellular neural networks***

The historical aspects of development of cellular neural networks are briefly considered in the paper. The urgency of their use for solving boundary-value problems is proved. By the example of the heat conductivity equation the technique of boundary-value problem transformation to the system of the linear algebraic equations on the grid area with a cross-line pattern is shown. Locally asynchronous method for elimination of necessity of synchronization of processes at performance of local problems is offered. The Neurosimulator for solving boundary value problems is constructed.

*Нестеренко Б.Б., Новотарский М.А. **Локально-асинхронный метод решения уравнений математической физики на клеточных нейронных сетях***

В работе кратко рассмотрены исторические аспекты развития клеточных нейронных сетей. Обоснована актуальность их использования для решения краевых задач. На примере уравнения теплопроводности продемонстрирована методика сведения краевой задачи к системе линейных алгебраических уравнений, заданных на крестовидном шаблоне сеточной области. Предложено использование локально-асинхронного метода для устранения необходимости синхронизации процессов при выполнении локальных задач. Для имитационного моделирования процесса решения краевых задач построен нейроимитатор.

*Нестеренко Б.Б., Новотарський М.А. **Локально-асинхронний метод розв'язування рівнянь математичної фізики на кліткових нейронних мережах***

У роботі коротко розглянуті історичні аспекти розвитку кліткових нейронних мереж. Обґрунтовано актуальність їхнього використання для розв'язування крайових задач. На прикладі рівняння теплопровідності продемонстровано методика зведення крайової задачі до системи лінійних алгебраїчних рівнянь, заданих на хрестоподібному шаблоні сіткової області. Запропоновано використання локально-асинхронного методу для усунення необхідності синхронізації процесів при виконанні локальних задач. Для імітаційного моделювання процесу розв'язування крайових задач побудовано нейроімітатор.

УДК 621.313

## СТЕПЕННЫЕ РЕКУРРЕНТНЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ КАК МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

*Орловский И.А., Синявский А.А.*

Запорожский национальный технический университет

### **Введение**

В научной литературе вопросы получения моделей электротехнических объектов рассматриваются достаточно часто, например [1–6]. В работе [5] для получения модели асинхронного двигателя и оценки электромагнитного момента, амплитуды и фазы магнитного потока используется нейронная сеть прямого распространения с двадцатью нейронами в скрытом слое и нелинейными активационными функциями (гиперболический тангенс). Данная сеть обеспечивала удовлетворительную точность для обучающего набора данных. При изменении входных наборов способность сети отображать объект отсутствовала. При реализации модели нелинейного объекта в виде адаптивного дискретного фильтра [6], либо на рекуррентной нейросети (РНС) с линейной функцией активации [1–4] точность отображения объекта не высока. Расчёт моделей на нейронных сетях с нелинейными функциями активации в литературе отсутствует, а обучение таких сетей требует больших затрат времени и не всегда позволяет получить заданную точность модели. Кроме того, как правило, отсутствует возможность получения параметров объекта (идентификация) по значениям весовых коэффициентов этих моделей.

На коротком интервале времени с высокой точностью можно описать нелинейный объект, используя представление его разностного дифференциального уравнения в виде степенного ряда. В этом случае значения переменных состояния объекта в следующем такте счёта представляются в виде суммы взвешенных значений на предыдущем такте счёта степеней переменных состояния объекта. Входные сигналы также представляются в виде степенного ряда. Такое представление модели объекта можно выполнить на РНС, которую для краткости будем называть степенной РНС. По весовым коэффициентам (коэффициентам при степенях переменных) такой РНС возможна идентификация внутренних параметров объекта. Если нелинейность объекта представляет степенную зависимость, то степенная РНС описывает такой объект во всём его диапазоне работы.

Целью работы является определение аналитических зависимостей для расчёта весовых коэффициентов степенной РНС, позволяющей с высокой точностью отображать модель нелинейного объекта. Проверка полученных аналитических результатов методом математического моделирования на примере получения моделей нелинейного электротехнического объекта.

### 1. Определение структуры степенной РНС и общих выражений расчёта её весовых коэффициентов

Представим модель объекта в виде системы уравнений записанной в матричном виде в форме пространства состояний (1)

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad (1)$$

где  $x$  – вектор состояния объекта,  $x = [x_1, x_2, \dots, x_q]^T$ ;  $u$  – вектор входных сигналов,  $u = [u_1, u_2, \dots, u_k]^T$ ;  $A$  – матрица коэффициентов размера  $q \times q$ ;  $B$  – матрица коэффициентов размера  $q \times k$ . Начальными условиями является вектор начальных состояний системы  $x_0$ . Если в дискретной модели объекта представить производную вектора состояния в виде

$$\dot{x}_n = \frac{x_n - x_{n-1}}{T}, \quad (2)$$

где  $T$  – такт счёта,  $x_n$  и  $x_{n-1}$  – значения вектора состояния на  $n$  и  $n-1$  такте счёта, то систему уравнений (1) можно записать в виде системы разностных дифференциальных уравнений, следующим образом [3]:

$$x_n = (AT + E)x_{n-1} + BTu_n, \quad (3)$$

где  $E$  – единичная матрица размера  $q \times q$ .

Обозначим коэффициенты уравнения (3) следующим образом:

$$W^{oc} = AT + E, \quad W^{in} = BT, \quad (4)$$

тогда система уравнений (3) примет вид

$$x_n = W^{oc} x_{n-1} + W^{in} u_n. \quad (5)$$

Система уравнений (5) представляет собой описание РНС, где  $W^{oc}$  – матрица весовых коэффициентов сигналов обратной связи размера  $q \times q$ ,  $W^{in}$  – матрица весовых коэффициентов входных сигналов размера  $q \times k$ .

В случае нелинейного объекта его линеаризация, т.е. допущение, что на расчётном интервале времени параметры объекта неизменны ( $dA/dx=0$  и  $dB/du=0$ ), возможна при незначительном изменении этих параметров. Однако при изменении параметров на десятки и сотни про-

центом ошибка линейной модели на РНС становится значительной. Снизить эту ошибку можно, используя более сложную структуру РНС в которой принимаются линейные изменения матрицы  $A$  от вектора состояния объекта и матрицы  $B$  от входного вектора ( $dA/dx - \text{const.}$  и  $dB/du - \text{const.}$ ). Описание такой РНС выполняется следующим образом.

Пусть матрицы  $A$  и  $B$  имеют линейную зависимость от вектора состояния  $x$  и вектора входных сигналов  $u$  соответственно. Чтобы представить зависимости в матричном виде, введём обозначение диагональной матрицы состояния  $X$  размера  $q \times q$ , и диагональной матрицы  $U$  входных сигналов размера  $k \times k$ .

$$X = \begin{pmatrix} x_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & x_q \end{pmatrix}, \quad U = \begin{pmatrix} u_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & u_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & u_k \end{pmatrix}.$$

Тогда матрицы  $A$  и  $B$  можно представить следующими уравнениями:

$$A = A_1 X + A_0, \quad B = B_1 U + B_0,$$

где  $A_1$  и  $A_0$  матрицы коэффициентов размера  $q \times q$ ,  $B_1$  и  $B_0$  матрицы коэффициентов размера  $q \times k$ . В этом случае уравнение (1) примет

$$\dot{x} = (A_1 X + A_0)x + (B_1 U + B_0)u.$$

Значения весовых коэффициентов РНС также изменяются линейно от поступающих на них сигналов и выражения (4) примут вид:

$$W^{oc} = A_1 X T + A_0 T + E, \quad W^{in} = B_1 U T + B_0 T. \quad (6)$$

Уравнения (6) удобно представить в виде:

$$W^{oc} = W_1^{oc} X + W_0^{oc}, \quad W^{in} = W_1^{in} U + W_0^{in}, \quad (7)$$

тогда весовые коэффициенты РНС определяются выражениями:

$$W_1^{oc} = A_1 T, \quad W_0^{oc} = A_0 T + E, \quad W_1^{in} = B_1 T, \quad W_0^{in} = B_0 T.$$

Разностное дифференциальное уравнение объекта (5) при подстановке выражения (7) принимает следующий вид:

$$x_n = W_1^{oc} X_{n-1} x_{n-1} + W_0^{oc} x_{n-1} + W_1^{in} U_n u_n + W_0^{in} u_n.$$

Более точная аппроксимация функции может быть выполнена использованием полиномов более высоких порядков. В общем виде РНС, построенная с использованием рассмотренных выше полиномов представлена на рис. 1. Блоки Б1 и Б2 (рис.1) формируют необходимое количество выходов, значения которых равны степеням входных сигналов, блоки  $z^{-1}$  выполняют задержку сигнала на один такт счёта  $T_0$ .

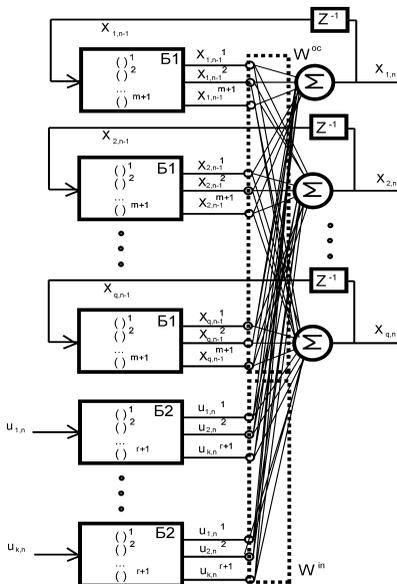


Рисунок 1 – Общая структурная схема степенной РНС

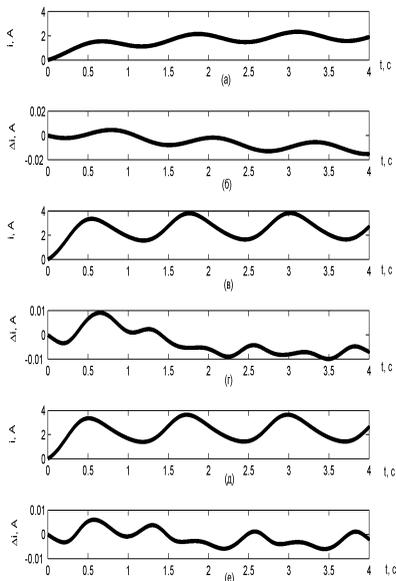


Рисунок 2 – Переходные процессы в нелинейном объекте и ошибки в моделях РНС

При использовании полинома  $m$ -го порядка для матрицы  $A$  и полинома  $r$ -го порядка для матрицы  $B$  объекта, выражения матриц  $A$  и  $B$  имеют вид:

$$A = A_m X^m + A_{m-1} X^{m-1} + \dots + A_1 X + A_0, \quad B = B_r U^r + B_{r-1} U^{r-1} + \dots + B_1 U + B_0.$$

Тогда уравнение объекта (1) примет следующий вид:

$$x_n = (A_m X_{n-1}^m + A_{m-1} X_{n-1}^{m-1} + \dots + A_1 X_{n-1} + A_0)x_{n-1} + (B_r U_n^r + B_{r-1} U_n^{r-1} + \dots + B_1 U_n + B_0)u_n. \quad (8)$$

Значения весовых коэффициентов РНС, согласно уравнениям (4), определяются выражениями:

$$\begin{aligned} W^{oc} &= A_m T X_{n-1}^m + A_{m-1} T X_{n-1}^{m-1} + \dots + A_0 T + E \\ W^{in} &= B_r T U_n^r + B_{r-1} T U_n^{r-1} + \dots + B_1 T U_n + B_0 T \end{aligned} \quad (9)$$

Если представить уравнение (9) в виде:

$$\begin{aligned} W^{oc} &= W_m^{oc} X_{n-1}^m + W_{m-1}^{oc} X_{n-1}^{m-1} + \dots + W_1^{oc} X_{n-1} + W_0^{oc} \\ W^{in} &= W_r^{in} U_n^r + W_{r-1}^{in} U_n^{r-1} + \dots + W_1^{in} U_n + W_0^{in} \end{aligned} \quad (10)$$

тогда весовые коэффициенты РНС определяются выражениями:

$$\begin{aligned}
 W_m^{oc} &= A_m T, \quad W_{m-1}^{oc} = A_{m-1} T, \quad \dots \quad W_1^{oc} = A_1 T, \quad W_0^{oc} = A_0 T + E, \\
 W_r^{in} &= B_r T, \quad W_{r-1}^{in} = B_{r-1} T, \quad \dots \quad W_1^{in} = B_1 T, \quad W_0^{in} = B_0 T.
 \end{aligned}$$

## 2. Определение весовых коэффициентов степенных РНС по результатам измерений

Для нахождения весовых коэффициентов РНС запишем уравнение (8) в виде системы разностных дифференциальных уравнений с использованием зависимостей (9) и (10) следующим образом:

$$\begin{aligned}
 x_n &= W_m^{oc} X_{n-1}^m x_{n-1} + W_{m-1}^{oc} X_{n-1}^{m-1} x_{n-1} + \dots + W_1^{oc} X_{n-1} x_{n-1} + W_0^{oc} x_{n-1} + \\
 &+ W_r^{in} U_n^r u_n + W_{r-1}^{in} U_n^{r-1} u_n + \dots + W_1^{in} U_n u_n + W_0^{in} u_n.
 \end{aligned} \quad (11)$$

Неизвестными в данной системе являются матрица  $W^{oc}$  (размерностью  $-(m+1) \times q \times q$ ) и матрица  $W^{in}$  (размерностью  $-(r+1) \times q \times k$ ). Общее количество неизвестных составляет:

$$N = (m+1)q^2 + (r+1)qk.$$

При аппроксимации функции степенной РНС на определённом интервале времени число измерений функции (число уравнений) должно быть не меньше числа неизвестных  $N$ . Минимальное число тактов счёта  $N_T$  при вычислении производной по формуле (2) должно быть на единицу больше числа неизвестных, тогда выражение для их расчёта имеет вид:  $N_T = (m+1)q^2 + (r+1)qk + 1$ .

Пусть имеется  $M+1$  ( $M > N$ ) последовательных через такт счёта  $T$  измерений входного вектора и вектора состояния объекта. Это позволяет составить систему из  $M$  уравнений. Если число уравнений равно числу искоемых коэффициентов ( $M = N$ ), то матрица весовых коэффициентов РНС определяется через обратную матрицу, составленную из степеней входных сигналов и степеней сигналов состояния объекта.

В реальных условиях возможны ситуации, когда изменения вектора состояния объекта за время  $T$  меньше погрешности датчиков, в этом случае отсутствует обратная матрица. Для устранения этих недостатков число измерений необходимо взять больше минимального, тогда определение вектора  $W$  выполняется нахождением минимального среднеквадратичного отклонения для всех уравнений с помощью псевдообратной матрицы.

Обеспечение точной работы модели в первые моменты времени моделирования обеспечивается заданием вектора начальных условий состояния системы  $x_0$ , значения которого устанавливаются во временных задержках обратных связей РНС.

### 3. Пример моделей нелинейного электротехнического объекта на степенных РНС

Реализация степенных РНС в стандартных средствах математического моделирования не предусмотрена, в связи с чем была разработана программа, позволяющая выполнять расчёт весовых коэффициентов РНС с любого места измеряемой последовательности сигналов на заданном числе тактов счёта с любым количеством степеней входных сигналов и сигналов обратных связей. Программа также позволяет выполнять моделирование динамики рассчитанных РНС.

При моделировании работы РНС в качестве исходного объекта идентификации была выбрана нелинейная электрическая цепь, состоящая из источника питания, усилителя с нелинейным коэффициентом усиления, нагрузки: последовательное соединение индуктивности и нелинейного активного сопротивления. Нелинейности объекта представляли степенные зависимости. Результаты расчёта весовых коэффициентов РНС на 400 тактах счёта для рассматриваемых семи вариантов степенных зависимостей и максимальная относительная ошибка моделей на РНС приведены в табл. Незаполненные ячейки таблицы свидетельствуют об отсутствии связи в степенной РНС.

Таблица – Результаты расчёта весовых коэффициентов РНС

№ вар	Значения весовых коэффициентов степенных РНС						ошибка (%)
	$W_2^{oc}$	$W_1^{oc}$	$W_0^{oc}$	$W_2^{in}$	$W_1^{in}$	$W_0^{in}$	
1			0,995			0,00500	0,66
2		-0,00135	0,995			0,00502	0,46
3		-0,00140	0,995		0,00259	0,00473	0,26
4	-0,000559	-0,000553	0,994			0,00503	0,42
5	-0,000289	-0,00120	0,995		0,00260	0,00472	0,18
6	-0,000271	-0,00128	0,995	0,000117	0,00252	0,00479	0,16
7		-0,00140	0,995	0,000108	0,00256	0,00475	0,25

Переходные процессы токов в объекте и ошибки моделей на РНС для вариантов 1, 3 и 6 приведены на рис. 2. На рис. 2а, рис. 2в, рис. 2д показаны изменения токов  $i$  в объекте для вариантов 1, 3, 6 соответственно. На рис. 2б, рис. 2г, рис. 2е приведены изменения ошибок тока  $\Delta i$  моделей на РНС для вариантов 1, 3, 6 соответственно. Результаты показали высокую точность рассчитанных моделей РНС. Максимальная относительная ошибка для всех вариантов, согласно табл., не превышала 0,66%.

#### Выводы

Приведенные результаты подтверждают правильность полученных выражений для расчёта значений весовых коэффициентов степенных РНС, представляющих модель нелинейного объекта.

### Перечень ссылок

1. *Хайкин С.* Нейронные сети: полный курс, 2-е издание: Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2006. – 1104 с.
2. *Baruch I.S., Palacios I., Flores J.M., Garrido R.* An adaptive neural control system of a DC motor drive // 15<sup>th</sup> Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.
3. *Орловский И.А.* Модель электропривода постоянного тока на рекуррентных нейронных сетях // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2006. – №1. – С. 151–159.
4. *Орловский И.А., Бут Ю.С.* Поиск генетическими алгоритмами весовых коэффициентов в моделях тиристорного электропривода на рекуррентных нейронных сетях // Искусственный интеллект. – 2006. – №3. – С. 314–326.
5. *Marino P., Milano M., Vasca F.* Linear Quadratic State Feedback and Robust Neural Network. Estimator for Field-Oriented-Controlled Induction Motors // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 1999. – Vol. 46. – №1. – P. 150–161.
6. *Палис Ф., Филаретов В.Ф., Цепковский Ю.А., Юхимец Д.А.* Синтез прогнозирующих систем с нейрофаззи сетями для управления нелинейными динамическими объектами с переменными параметрами // Електромашинобудування та електрообладнання – Київ: Техніка. – 2006. – Вип. 66. – С. 357–360.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Потапенко Е.М. (Запорожье, ЗНТУ).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой электропривода и автоматизации Запорожского национального технического университета (протокол №9 от 10.01.2007 г.).

Поступила 31.01.2007 г.

#### ***Orlovskiy I.A., Siniavsky A.A. Degree recurrent neural networks, as models of nonlinear electro technical objects***

Degree recurrent neural network (RNN) for reception of nonlinear object models are offered. Analytical dependencies of calculation of these networks are received. Check of ability degree RNN is executed on an example to represent model of nonlinear electrotechnical object.

#### ***Орловский И.А., Синявский А.А. Степенные рекуррентные нейронные сети как модели нелинейных электротехнических объектов***

Предложены степенные рекуррентные нейронные сети (РНС) для получения моделей нелинейных объектов. Получены аналитические зависимости расчёта этих сетей. Выполнена на примере проверка способности степенных РНС представлять модели нелинейного электротехнического объекта.

#### ***Орловський І.А., Синявський А.О. Стені рекурентні нейронні мережі як моделі нелінійних електротехнічних об'єктів***

Запропоновано степеневі рекурентні нейронні мережі (РНМ) для отримання моделей нелінійних об'єктів. Отримано аналітичні залежності розрахунку таких мереж. Виконано на прикладі перевірку здібностей степеневих РНМ відображати моделі нелінійного електротехнічного об'єкту.

УДК 519.71

## НЕЙРОСЕТЕВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АДДИТИВНОЙ МОДЕЛИ ГАММЕРШТЕЙНА ОБЪЕКТА СО МНОГИМИ ВХОДАМИ

*Сакало Т.С.*

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

### **Введение**

Большинство реальных процессов представляют собой нелинейные динамические объекты, исследование которых является сложной задачей. Хотя зачастую возможна их линеаризация в окрестности некоторых рабочих точек, значительно упрощающая построение математических моделей исследуемых объектов, в общем случае, для адекватного их описания, приходится применять математические модели в виде громоздких нелинейных соотношений.

Наличие огромного количества видов нелинейностей в сочетании с различными статическими и динамическими свойствами таких объектов не позволяет создать единую теорию идентификации нелинейных объектов. Поэтому обычно математическое описание нелинейных объектов получают, используя аппроксимации в виде рядов или выбирая некоторые стандартные структуры моделей, например модель Гаммерштейна или Винера. Последние оказались достаточно эффективными и в настоящее время являются наиболее распространенными.

Следует отметить, что достаточно широко распространенной является модель с несколькими входными и одним выходным сигналами – MISO-модель. Такая модель получается при использовании описания в виде, например, уравнения псевдолинейной регрессии. При этом зачастую необходимо учитывать и нелинейность характеристик исследуемого объекта. Это можно сделать также с помощью модели Гаммерштейна или Винера. Однако, обладая некоторыми несомненными достоинствами, данные модели не лишены и ряда недостатков, о которых будет сказано ниже, и устранить которые можно используя аппроксимацию статической нелинейности в виде искусственной нейронной сети (ИНС) [1].

*Целью данной работы* являлось построение модели Гаммерштейна объекта со многими входами с помощью радиально-базисной нейросети.

### 1. Модель Гаммерштейна

Рассмотрим динамический MISO-объект, представленный на рис.1 и описываемый уравнением:

$$y(k) = \sum_{j=1}^N f_j[y_j(k-1), \dots, y_j(k-m), u_j(k-1), \dots, u_j(k-m)], \quad (1)$$

где  $y(i), y_j(i)$  – выходные сигналы объекта и  $j$ -й модели соответственно в момент времени  $i$ ,  $u_j(i)$  – входной сигнал  $j$ -й модели,  $f_j[\cdot]$  – неизвестная нелинейная функция  $j$ -й модели.

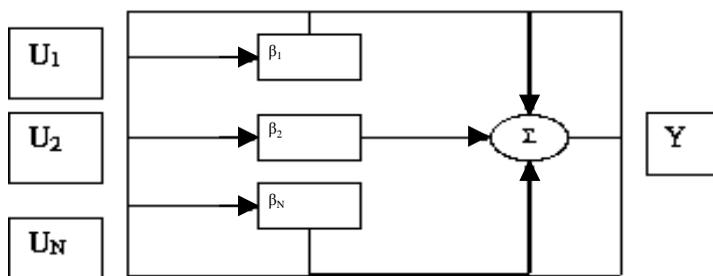


Рисунок 1 – Динамический MISO-объект

Предположим, что каждый канал может быть представлен моделью Гаммерштейна:

$$x_j(k) = g_j(u_j(k)), \quad (2)$$

$$\hat{y}_j(k) = \sum_{i=1}^m b_{ji} x(k-i) - \sum_{j=1}^m a_{ji} \hat{y}_j(k-i), \quad j = \overline{1, N}, \quad (3)$$

где  $\hat{y}_j(k)$  – выходные сигналы  $j$ -й модели и статической части  $j$ -й модели соответственно,  $g_j(\cdot)$  – нелинейная функция  $j$ -й модели,  $a_{ji}, b_{ji}$  – коэффициенты  $j$ -й модели.

Задача идентификации заключается в определении вида  $g(x)$  и коэффициентов модели  $a_i, b_i (i = \overline{1, m})$  на основе наблюдений  $x(k), y(k)$  и сводится к минимизации некоторого функционала от ошибки идентификации  $e(k) = y(k) - g(k)$ .

В классической модели Гаммерштейна [2] статическая нелинейность  $g_j(\cdot)$  представляется рядом:

$$g_j(u_j) = \sum_{p=0}^L \alpha_{jp} u_j^p, \quad (4)$$

где  $\alpha_{jp}$  – некоторые весовые коэффициенты,  $p$  – степень используемого многочлена, определяемая в процессе решения задачи идентификации.

Подставляя (4) в (3), имеем

$$\begin{aligned} \hat{y}_j(k) = & \alpha_{j0} \sum_{i=1}^m b_{ji} + \alpha_{j1} \sum_{i=1}^m b_{ji} u_j(k-j) + \dots \\ & \dots + \alpha_{ji} \sum_{i=1}^m b_{ji} u_j^L(k-i) - \sum_{i=1}^m a_{ji} \hat{y}_j(k-i). \end{aligned} \quad (5)$$

Обозначим  $h_{jpi} = \alpha_{jp} b_{ji}$ . Тогда

$$y_j(k) = \sum_{p=0}^L \sum_{i=1}^m h_{jpi} u_j^p(k-i) - \sum_{i=1}^m a_{ji} y_j(k-i), \quad j = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Задача построения математической модели вида (6) состоит в определении степени используемого полинома (структурная идентификация) и вычисления соответствующих ядер разложения (параметрическая идентификация).

Так как всякое представление в виде ряда представляет собой аппроксимацию реальной плотности, повысить точность аппроксимации можно путем увеличения степени используемого полинома. При этом, однако, возникают существенные вычислительные проблемы, обуславливаемые как значительным увеличением количества идентифицируемых параметров, так и ухудшением свойств используемых при этом матриц наблюдения. Последнее связано, например, с тем, что слагаемые, входящие в разложение, не сильно отличаются друг от друга. Поэтому в результате решения нормальных уравнений (5) возникает необходимость расчета малых разностей больших чисел, что требует точных вычислений [3]. Кроме того, существенный недостаток данного подхода состоит в том, что увеличение числа членов используемого полинома требует нового пересчета оценок всех параметров.

Задача построения модели может быть существенно упрощена, если для аппроксимации нелинейной статической части модели использовать ИНС [4]. К числу ИНС, обладающих хорошими аппроксимирующими свойствами, относятся многослойный персептрон и радиально-базисные сети.

## 2. Нейросетевая модель Гаммерштейна

Аппроксимируя нелинейную статическую функцию  $g_j(u_j(k))$

(2) гауссовскими радиально-базисными функциями

$$\varphi_p(x) = \exp\left\{-\frac{\|x - \mu_p\|^2}{\sigma_p^2}\right\} \quad (7)$$

где  $\mu_p$  и  $\sigma_p$  – центры и радиусы базисных функций соответственно,  $\|\cdot\|$  – евклидова норма, имеем:

$$u_j(k) = \sum_{p=1}^P w_{ji} \varphi_i(u_j(k)) u_j(k) = \sum_{p=1}^P w_{jp} \varphi_p(u_j(k)). \quad (8)$$

Подстановка (8) в (3) дает

$$\hat{y}_j(k) = \sum_{i=1}^m \beta_{ji} u_j(k-i) + \sum_{i=1}^m \sum_{p=1}^P \beta_{jip} \varphi_p(u_j(k-i)) - \sum_{i=1}^m a_i \hat{y}_j(k-i), \quad (9)$$

где  $\beta_{ji} = b_{ji}$ ;  $\beta_{jip} = b_{ji} w_{jp}$ .

Соотношение (9) может быть представлено в виде уравнения псевдолинейной регрессии

$$\hat{y}_j(k) = \theta_j^T x_j(k), \quad (10)$$

где  $x_j(k) = (u_j(k-1) \dots u_j(k-m) \varphi_1(u_j(k-1)) \dots$

$\dots \varphi_p(u_j(k-m)) \hat{y}_j(k-1) \dots \hat{y}_j(k-m))^T$  – обобщенный вектор входов,

$\theta_j = (\beta_{j1} \dots \beta_{jm} \beta_{j11} \dots - a_{j1} \dots - a_{jm})^T$  – обобщенный вектор параметров сети.

Задача идентификации нелинейного объекта (1) сводится таким образом к обучению ИНС, заключающемся в настройке ее параметров на основании сравнения выходного сигнала объекта  $y(k)$  и реакции сети  $\hat{y}(k)$ . Выбирая в качестве критерия обучения квадратичный, можно получить алгоритм обучения на основе рекуррентного метода наименьших квадратов [5]:

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \frac{P(k-1) \nabla F(k)}{\lambda + \nabla^T F(u) P(u-1) \nabla F(u)} e(k), \quad (11)$$

$$P(u) = \frac{1}{\lambda} \left\{ P(u-1) - \frac{P(u-1) \nabla F(u) \nabla^T F(u) P(u-1)}{\lambda + \nabla^T F(k) P(u-1) \nabla F(u)} \right\}, \quad (12)$$

где  $\nabla F(u) = (1, \varphi_1(x(u)), 2\Phi_1(x(u))\beta_{11}(x(u)) -$

$-\mu_1)^T \sigma_1^{-2}, 2\varphi_1(x(u))\beta_{11} \|x(u) - \mu_1\|^2 \sigma_1^{-3}, \dots, \varphi_N(x(u)), 2\Phi_N(x(u))\beta_{mN}(x(u-m) -$

$-\mu_N)^T \sigma_N^{-2}, 2\varphi_N(x(k-m))\beta_{mN}(x(k-m) - \mu_N)^T \sigma_N^{-3}, y(k-1), \dots, y(k-m))^T$ ,

$\lambda \in (0, 1]$ ,  $P(0) = \mathcal{I}$ ,  $\gamma \gg 0$ ,  $I$  – единичная матрица.

Следует отметить, что при использовании базисных функций (7) с настраиваемыми центрами и радиусами эти параметры также следует ввести в

вектор  $\theta_j$  (10), что приводит к существенному увеличению количества обучаемых параметров и, как следствие, к затягиванию процесса обучения.

Нейросетевая реализация модели Гаммерштейна (9) приведена на рис. 2.

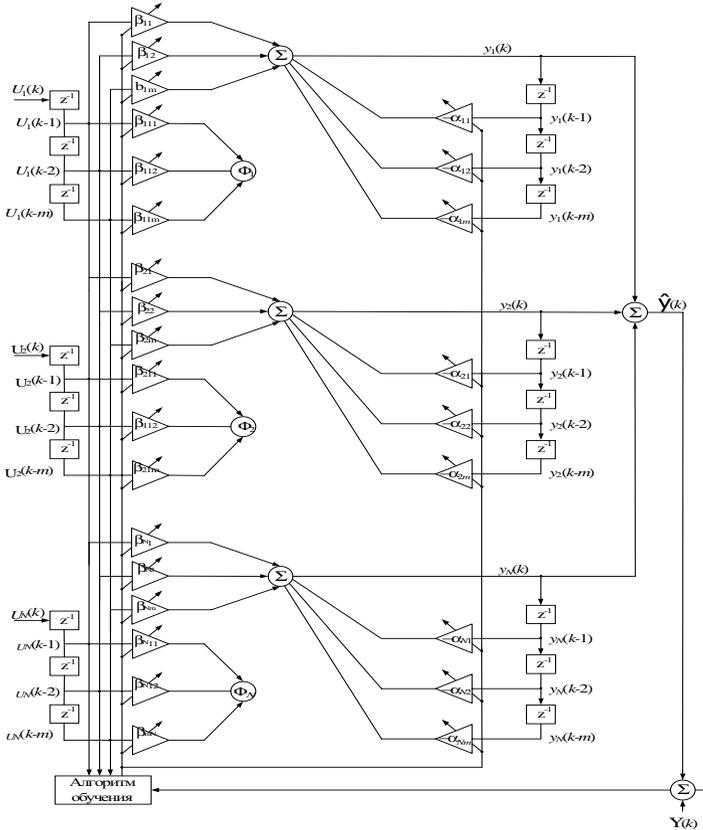


Рисунок 2 – Нейросетевая реализация модели Гаммерштейна

### Заключение

С целью получения адекватного математического описания нелинейного динамического объекта со многими входами (MISO) в работе решена задача построения нейросетевой аддитивной модели Гаммерштейна.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложена специализированная структура радиально-базисной сети, реализующая модель Гаммерштейна. Показано, что обучение данной сети может быть осуществлено на основе рекуррентного метода наименьших квадратов.

### Перечень ссылок

1. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети. – Харьков: ООО «Компания СМИТ», 2005. – 408 с.
2. Gallman P.G., Narendra K.S. Representation of nonlinear systems via Stone-Weierstrass theorem // Automatica. – 1976. – Vol. 12. – № 8. – P. 619–622.
3. Ивахненко А.Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. – К.: Техніка, 1969. – 392 с.
4. Nelles O. Nonlinear System identification. – Berlin: Springer, 2000. – 785 p.
5. Сакало Т.С. Синтез нелинейной модели Гаммерштейна на основе радиально-базисной сети // Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій» ISDMIT'2006. Зб. наук. праць у чотирьох томах.– Євпаторія, 2006. – Т.2. – С.268–272.

**Рецензент** – д.ф.-м.н., профессор Руткас А.Г. (Харьков, Харьковский национальный университет им. Каразина).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программного обеспечения ЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники (Протокол №12 от 23.01.2007 г.).

*Поступила 26.01.2007 г.*

### **Sakalo T.S. Neural network implementation of additive Hammerstein model with many inputs**

The actual problem of construction of nonlinear Hammerstein model for dynamic object with many inputs with use of a radial basis artificial neural network is solved. The structure of a specialized network for problem solution is proposed. It is shown that the algorithms based on a recurrent method of the least squares can be applied to training the given network.

### **Сакало Т.С. Нейросетевая реализация аддитивной модели Гаммерштейна объекта со многими входами**

Решена актуальная задача построения нелинейной модели Гаммерштейна для динамического объекта со многими входами с использованием радиально-базисной искусственной нейронной сети. Предложена структура специализированной ИНС, решающая данную задачу. Показано, что для обучения данной сети могут применяться алгоритмы, основанные на рекуррентном методе наименьших квадратов.

### **Сакало Т.С. Нейромережева реалізація адитивної моделі Гаммерштейна об'єкта з багатьма входами.**

Вирішено актуальне завдання створення нелінійної моделі Гаммерштейна для динамічного об'єкта з багатьма входами з використанням радіально-базисної штучної нейронної мережі. Запропоновано структуру спеціалізованої штучної нейронної мережі, що вирішує дане завдання. Показано, що для навчання даної мережі можуть застосовуватися алгоритми, засновані на рекуррентному методі найменших квадратів.

УДК 004.93

## СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА СЛОЖНОМ ФОНЕ ПО ДВУМЕРНОМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ

*Субботин С.А.*

Запорожский национальный технический университет, ООО "МПА Групп"

### **Введение**

Интенсивное развитие аппаратных средств ЭВМ, наблюдаемое в последние десятилетия, появление относительно недорогих цифровых камер, обладающих высокой разрешающей способностью и достаточным увеличением, существенное возрастание транспортных потоков и требований к безопасности делают актуальной задачу автоматизации анализа изображений сцен, в частности, в системах контроля транспортных средств, с последующей выработкой решений о необходимости тех или иных действий в конкретной ситуации.

В задачах автоматизации анализа двумерных изображений объектов на сложном фоне возникает необходимость автоматического выделения и распознавания объекта.

*Постановка задачи.* Пусть мы имеем двумерное изображение сцены с объектом, размещенном на неоднородном фоне, содержащее помехи. Необходимо определить положение объекта на изображении – выделить область, занимаемую объектом, после чего распознать выделенный объект – отнести его к одному из возможных классов объектов.

Традиционно выделение объектов на изображениях осуществляют с использованием детекторов границ контуров объектов, например градиентных операторов Собеля и Робертса [1]. Однако для изображений, которые содержат помехи, шумы и сильно неоднородный фон с тенями и засветками как фона, так и частей объектов, использование детекторов границ является недостаточным, поскольку на ряду с контуром объекта детекторы выделяют перепады интенсивности фона, порождаемые его неоднородностью и шумами.

Другим традиционно используемым подходом является поиск эталонных объектов на изображении, реализуемый путем определения мер сходства, например, корреляционных [1]. К недостаткам данного подхода следует отнести его очень низкую скорость, высокую чувствительность к масштабу, повороту и шумам, большие требования к вычислительным ресурсам ЭВМ. Еще одной проблемой при использо-

вании данного подхода является необходимость выделения и обобщения эталонных объектов человеком.

Еще одним подходом к выделению объектов является определение разности изображений, полученных одной и той же статической камерой в последовательные моменты времени с незначительным интервалом времени между съемкой изображений [2]. Недостатком данного подхода является его зависимость от динамической съемки изображений – необходимость наличия нескольких последовательных кадров, что применимо далеко не во всех случаях, особенно при оффлайн анализе изображений, когда к камере нет доступа.

*Целью* данной работы являлось создание устойчивых к изменениям масштаба и поворота методов, позволяющих обеспечить выделение объектов на статических изображениях со сложным фоном с последующим их распознаванием.

### **1. Автоматизированный синтез модели детектора для выделения объектов на фоне**

Выделение объекта на фоне предлагается осуществлять путем разбиения изображения на небольшие блоки, анализа каждого блока на предмет содержания части объекта и объединения смежных блоков в область объекта.

Будем называть детектором блока модель, позволяющую автоматически отнести фрагмент изображения, поданный на ее входы, к одному из двух классов: блок, содержащий объект, и блок без объекта (фоновый блок).

Для построения модели детектора блока в автоматизированном режиме предлагается выполнять последовательность шагов 1–7.

**Шаг 1.** Инициализация. Задать набор изображений сцен, содержащих объекты на фоне. Задать размер шага для разбиения изображений на блоки точек. Размер шага должен быть относительно небольшим относительно размеров изображения, но не менее 5–8 точек.

**Шаг 2.** Разбить каждое изображение на блоки расположенных рядом точек с определенным шагом по каждой из осей, начиная с верхнего левого угла каждого изображения с нулевым отступом от края. Разбить изображения на блоки аналогичным образом, но с отступом в половину шага от края. Для каждого блока каждого изображения определить, присутствует ли на нем объект: если объект присутствует, блоку присвоить метку класса "1", в противном случае – "0".

**Шаг 3.** Для каждого блока определить значения признаков-сверток, характеризующих его свойства [1, 3–5]:

- максимальное значение яркости области точек:

$$I_i^{\max} = \max_{\substack{y=y_d, \dots, y_u; \\ x=x_1, \dots, x_r;}} I(x, y);$$

где  $i$  – номер блока (области точек),  $(x_1, y_d)$  – координаты левой нижней точки блока на изображении,  $(x_r, y_u)$  – координаты правой верхней точки блока на изображении,  $I(x, y)$  – значение яркости в точке изображения с координатами  $(x, y)$ .

- минимальное значение яркости области точек:

$$I_i^{\min} = \min_{\substack{y=y_d, \dots, y_u; \\ x=x_1, \dots, x_r;}} I(x, y);$$

- усредненное значение яркости области точек:

$$I_i^{\text{avg}} = \frac{1}{(y_u - y_d)(x_r - x_1)} \int_{y=y_d}^{y_u} \int_{x=x_1}^{x_r} I(x, y);$$

- центральный момент порядка  $n$  гистограммы яркости области точек:

$$I_i^n = \frac{1}{(y_u - y_d)(x_r - x_1)} \int_{y=y_d}^{y_u} \int_{x=x_1}^{x_r} (I(x, y) - I_i^{\text{avg}})^n.$$

При  $n = 2$  получим дисперсию гистограммы, при  $n = 3$  получим асимметрию гистограммы, при  $n = 4$  получим эксцесс (характеристику остроты гистограммы), при  $n = 5$  и  $6$  – характеристики, отражающие количественное разграничение текстурных составляющих яркости области точек;

- нормированный дескриптор относительной гладкости:

$$I_i^{\text{smooth}} = 1 - \left. \frac{\text{®} \text{©} \text{™}}{\text{™}} + \frac{I_i^2}{255^2} \right\}^{-1}.$$

Чем ближе дескриптор к нулю, тем более постоянна яркость;

- однородность:

$$I_i^U = \frac{\sum_{j=0}^{255} N_j^2}{(y_u - y_d)^2 (x_r - x_1)^2},$$

где  $N_j$  – количество точек с уровнем яркости  $j$  в анализируемой  $i$ -ой области точек. Чем более однородна яркость области точек, тем больше значение однородности, и наоборот;

- взвешенная однородность:

$$I_1^{Uw} = \frac{\sum_{j=0}^{255} (j+1)N_j}{(y_u - y_d)(x_r - x_l)};$$

– средняя энтропия:

$$I_1^e = \frac{\sum_{j=1}^{255} N_j}{(y_u - y_d)(x_r - x_l)} \log_2 \frac{\sum_{j=1}^{255} N_j}{\sum_{j=1}^{255} (y_u - y_d)(x_r - x_l)};$$

Энтропия характеризует изменчивость яркости точек. Чем более постоянна яркость, тем меньше энтропия, и наоборот;

– коэффициент вертикальной симметрии яркости точек:

$$I_1^{vert} = \frac{\sum_{y=y_d}^{y_d+0,5(y_u-y_d)} \sum_{x=x_l}^{x_r} |I(x, y) - I(x, y_u + y_d - y)|}{0,5(y_u - y_d)(x_r - x_l)};$$

– коэффициент горизонтальной симметрии яркости точек:

$$I_1^{horiz} = \frac{\sum_{x=x_l}^{x_l+0,5(x_r-x_l)} \sum_{y=y_d}^{y_u} |I(x, y) - I(x_r + x_l - x, y)|}{0,5(y_u - y_d)(x_r - x_l)};$$

– максимальный модуль градиента – представляет собой максимум из горизонтального и вертикального модулей градиентов:

$$I_1^{grad} = \max \left\{ \max_{\substack{x=x_l, \dots, x_r-1; \\ y=y_d, \dots, y_u}} |I(x+1, y) - I(x, y)|, \max_{\substack{x=x_l, \dots, x_r; \\ y=y_d, \dots, y_u-1}} |I(x, y+1) - I(x, y)| \right\};$$

– максимальный модуль градиента со знаком – представляет собой максимум из горизонтального и вертикального модулей градиентов:

$$I_1^{grs} = I_1^{grad} \cdot \text{sign} \left( \arg \max \left\{ \max_{\substack{x=x_l, \dots, x_r-1; \\ y=y_d, \dots, y_u}} |I(x+1, y) - I(x, y)|, \max_{\substack{x=x_l, \dots, x_r; \\ y=y_d, \dots, y_u-1}} |I(x, y+1) - I(x, y)| \right\} \right);$$

где  $\text{sign}(x) = 1$ , если  $x > 0$ , и  $\text{sign}(x) = 0$  – в остальных случаях;

– межпиксельная контрастность – измеряет среднюю разность между значениями яркости соседних точек:

$$I_1^{contr} = \frac{1}{(y_u - y_d)(x_r - x_l)} \sum_{y=y_d}^{y_u-1} \sum_{x=x_l}^{x_r-1} (|I(x+1, y) - I(x, y)| + |I(x, y+1) - I(x, y)|);$$

– бета – показывает, насколько сильно отличаются значения яркости точек от яркости центральной точки блока:

$$I_i^\beta = \frac{\frac{y_u}{y_d} \frac{x_r}{x_1} \left( \frac{\otimes}{\text{TM}} m_r - \sqrt{(x - 0,5(x_r - x_1))^2 + (y - 0,5(y_u - y_d))^2} \right) \left| I(x, y) - I_i^{\text{avg}} \right|}{\frac{y_u}{y_d} \frac{x_r}{x_1} \left( \frac{\otimes}{\text{TM}} m_r - \sqrt{(x - 0,5(x_r - x_1))^2 + (y - 0,5(y_u - y_d))^2} \right)^2},$$

$$m_r = \frac{y_u}{y_d} \frac{x_r}{x_1} \sqrt{(x - 0,5(x_r - x_1))^2 + (y - 0,5(y_u - y_d))^2};$$

– упрощенная бета:

$$I_i^{\beta s} = \frac{1}{(y_u - y_d)(x_r - x_1)} \frac{y_u}{y_d} \frac{x_r}{x_1} \left| I(x, y) - I \left( \frac{\otimes}{\text{TM}} \frac{x_r - x_1}{2}, \frac{y_u - y_d}{2} \right) \right|;$$

– нормированный центральный момент двумерной функции яркости области точек:

$$I_i^{pq} = \left( I_i^{00} \right)^{-0,5(p+q)-1} \frac{x_r}{x_1} \frac{y_u}{y_d} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q I(x, y), \quad p+q = 2, 3, \dots,$$

$$x = x_1, \quad y = y_d$$

$$\text{где } I_i^{00} = \frac{x_r}{x_1} \frac{y_u}{y_d} I(x, y), \quad \bar{x} = \frac{1}{x_r - x_1} \frac{x_r}{x_1} x, \quad \bar{y} = \frac{1}{y_u - y_d} \frac{y_u}{y_d} y;$$

– инвариантные моменты двумерной функции яркости области точек:

$$I_i^1 = I_i^{20} + I_i^{02}, \quad I_i^2 = \left( I_i^{20} - I_i^{02} \right)^2 + 4 \left( I_i^{11} \right)^2,$$

$$I_i^3 = \left( I_i^{30} - 3I_i^{12} \right)^2 + \left( 3I_i^{21} - I_i^{03} \right)^2,$$

$$I_i^4 = \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right)^2 + \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right)^2,$$

$$I_i^5 = \left( I_i^{30} - 3I_i^{12} \right) \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right) \left( \frac{\otimes}{\text{TM}} \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right)^2 - 3 \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right)^2 \right) +$$

$$+ \left( 3I_i^{21} - I_i^{03} \right) \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right) \left( \frac{\otimes}{\text{TM}} \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right)^2 - \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right)^2 \right),$$

$$I_i^6 = \left( I_i^{20} - I_i^{02} \right) \left( \frac{\otimes}{\text{TM}} \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right)^2 - \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right)^2 \right) + 4I_i^{11} \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right) \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right),$$

$$I_i^7 = \left( 3I_i^{21} - I_i^{03} \right) \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right) \left( \frac{\otimes}{\text{TM}} \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right)^2 - 3 \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right)^2 \right) +$$

$$+ \left( 3I_i^{12} - I_i^{30} \right) \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right) \left( I_i^{30} + I_i^{12} \right)^2 - \left( I_i^{21} + I_i^{03} \right)^2 \left. \right\}$$

Данный набор моментов является инвариантным по отношению к параллельному переносу, повороту и изменению масштаба. На практике значения инвариантов моментов целесообразно логарифмировать для сужения динамического диапазона.

Шаг 4. Сформировать обучающую выборку, состоящую из экземпляров, характеризующихся в качестве входных признаков значениями сверток, определенных на шаге 3, а в качестве выходного (целевого) признака – номером (меткой) класса, определенным для каждого блока на шаге 2.

Шаг 5. Произвести оценку информативности признаков [6], характеризующих блоки. Признаки с низким уровнем информативности из выборки удалить.

Шаг 6. Построить модель зависимости номера класса блока точек от значений сверток для блока точек на основе сформированной обучающей выборки путем использования нейронных [6] или нейронечетких сетей [7–9].

Шаг 7. Останов.

Недостатком предложенного метода выделения блоков является его высокая рутинность для человека-учителя, т.к. для одних и тех же (или подобных) блоков на разных изображениях учителю каждый раз необходимо задавать номер класса. Еще одним недостатком данного метода является то, что сформированная обучающая выборка будет содержать все выделенные блоки (даже повторяющиеся абсолютно одинаковые), т.е. будет очень избыточной, что в свою очередь сильно замедлит процесс построения модели и увеличит требования к вычислительным ресурсам ЭВМ.

## **2. Адаптивный синтез модели детектора для выделения объектов на фоне**

С целью устранения недостатков присущих вышеописанному методу представляется целесообразным автоматизировать процесс выявления подобных блоков и включать в обучающую выборку только те блоки, номера классов которых неизвестны либо не совпадают с номерами классов. Это, с одной стороны, позволит существенно сократить размер обучающей выборки, а следовательно упростит и ускорит процесс построения модели, а также снизит требования к ресурсам ЭВМ. С другой стороны, это существенно снизит трудоемкость определения классов блоков для человека-учителя.

Адаптивный синтез модели предлагается осуществлять путем выполнения следующих шагов.

Шаг 1. Инициализация. Задать набор изображений сцен, содержащих объекты на фоне. Задать размер шага для разбиения изображений на блоки точек. Размер шага должен быть относительно небольшим относительно размеров изображения, на не менее чем 5–8 точек. Задать правило определения сходства блоков (меру подобия). Задать порог для определения сходства блоков.

Шаг 2. Для каждого изображения из набора выполнить шаги 2.1–2.4.

Шаг 2.1 Разбить текущее изображение на блоки, расположенных рядом точек с определенным шагом по каждой из осей, начиная с верхнего левого угла каждого изображения с нулевым отступом от края. Разбить текущее изображение на блоки аналогичным образом, но с отступом в половину шага от края.

Шаг 2.2 Для каждого выделенного блока выполнить шаги 2.2.1–2.2.3.

Шаг 2.2.1 Для текущего блока определить значения признаков-сверток, характеризующих его свойства.

Шаг 2.2.2 Если обучающая выборка – пустая, предъявить учителю выделенный блок и потребовать задания номера класса блока (если в блоке присутствует объект, блоку следует присвоить метку класса "1", в противном случае – "0"), добавить блок с номером класса в выборку, перейти к следующему блоку – перейти на шаг 2.2; в противном случае – определить значения меры подобия текущего блока каждому блоку обучающей выборки.

Шаг 2.2.3 Среди блоков обучающей выборки найти тот, который обладает максимальным сходством с текущим блоком. Если мера сходства блоков превышает заданный порог, тогда присвоить текущему блоку класс наиболее похожего на него блока обучающей выборки, в противном случае – присвоить метку "?" – отказ от распознавания.

Шаг 2.3 Предъявить учителю выделенные блоки текущего изображения и автоматически сопоставленные им номера классов. Обеспечить возможность коррекции результатов распознавания и потребовать задания номера класса для блоков с меткой "?": если в блоке присутствует объект, блоку следует присвоить метку класса "1", в противном случае – "0".

Шаг 2.4 Те блоки текущего изображения, автоматическое распознавание которых оказалось успешным (не было скорректировано учителем) в обучающую выборку не включать. Те блоки, результаты распознавания которых были скорректированы или заданы учителем, включить в обучающую выборку.

Шаг 3. На основе сформированной обучающей выборки произвести оценку информативности признаков [6], характеризующих блоки. Признаки с низким уровнем информативности из выборки удалить.

Шаг 4. Построить модель зависимости номера класса блока точек от значений сверток для блока точек на основе сформированной обучающей выборки путем использования нейронных [6] или нейронечетких сетей [7–9].

Шаг 5. Останов.

### **3. Метод самоорганизующегося синтеза модели детектора для выделения объектов на фоне**

Недостатком предложенных выше методов формирования модели обнаружения объектов и фона является то, что они требуют интерактивного участия человека-учителя, выполняющего крайне трудоемкую и рутинную работу. Для исключения человека из процесса обучения модели детектора предлагается использовать следующий метод.

Шаг 1. Инициализация. Задать набор изображений сцен, содержащих объекты на фоне. Задать размер шага для разбиения изображений на блоки точек. Размер шага должен быть относительно небольшим относительно размеров изображения, на не менее 5–8 точек. Задать правило определения сходства блоков (меру подобия). Задать порог для определения сходства блоков.

Шаг 2. Для каждого изображения из набора выполнить разбиение на блоки, расположенных рядом точек с определенным шагом по каждой из осей, начиная с верхнего левого угла каждого изображения с нулевым отступом от края, а также выполнить разбиение на блоки с отступом в половину шага от края.

Шаг 3. Для каждого блока определить значения признаков-сверток, характеризующих его свойства.

Шаг 4. Сформировать маски блоков.

Шаг 4.1 На всем наборе изображений для каждой позиции точки определить частоты встречаемости каждого уровня яркости.

Шаг 4.2 Для каждой позиции точки найти уровень яркости с максимальным значением частоты встречаемости, который принять как значение яркости точки фона в данной позиции. Сформировать искусственное изображение фона на основе найденных яркостей точек фона.

Шаг 4.3 Для изображения фона выполнить разбиение на блоки-маски, расположенных рядом точек с определенным шагом по каждой из осей, начиная с верхнего левого угла каждого изображения с нулевым отступом от края, а также выполнить разбиение на блоки-маски с отступом в половину шага от края.

Шаг 5. Для каждого блока каждого изображения определить степени подобия всем сформированным маскам. Те блоки, схожесть которых с маской выше некоторого порога, классифицировать как фо-

новые; остальные боки классифицировать как содержащие фрагменты объектов. Сформировать из выделенных блоков обучающую выборку.

Шаг 6. На основе сформированной обучающей выборки произвести оценку информативности признаков [6], характеризующих блоки. Признаки с низким уровнем информативности из выборки удалить.

Шаг 7. Построить модель зависимости номера класса блока точек от значений сверток для блока точек на основе сформированной обучающей выборки путем использования нейронных или нейро-нечетких сетей [7–9].

Шаг 8. Останов.

#### 4. Синтез модели для классификации объектов

Распознавание выделенных блоков и объектов предлагается осуществлять на основе иерархических нейро-нечетких сетей, синтезируемых в неитеративном режиме (без оптимизационной подгонки весов) с учетом априорной информации об обучающей выборке.

В качестве априорной информации об обучающей выборке предлагается использовать оценки параметров ее топологии [6, 8, 9].

Для обеспечения возможности решения задач со сложным разделением классов и построения моделей с высокой обобщающей способностью предлагается по признакам для каждого класса отдельно выделять компактные группы экземпляров, на основе значений соответствующих координат которых определять параметры интервалов классов. Этот метод будет позволять по одному и тому же признаку для разных классов выделять полностью или частично пересекающиеся интервалы, на основе которых можно будет более точно определить процедуры распознавания.

Для нахождения параметров интервалов на основе предлагаемого метода необходимо выполнить шаги 1–21.

Шаг 1. Инициализация. Задать обучающую выборку  $\langle x, y \rangle$ ,  $x = \{x^s\}$ ,  $x^s = \{x_j^s\}$ ,  $y = \{y^s\}$ ,  $s = 1, 2, \dots, S$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , где  $N$  – количество признаков,  $S$  – количество экземпляров обучающей выборки,  $x_j^s$  – значение  $j$ -го признака  $s$ -го экземпляра,  $y^s$  – номер класса, сопоставленный  $s$ -му экземпляру обучающей выборки. Установить номер текущего признака:  $j=1$ .

Шаг 2. Если  $j > N$ , тогда перейти на шаг 19.

Шаг 3. Сформировать буферные массивы  $x_t$  и  $y_t$ :  $x_t = x_j$ ,  $y_t = y$ ,  $\forall s$ .

Шаг 4. Упорядочить пары элементов массивов  $x_t$  и  $y_t$  в порядке неубывания значений  $x_t$ .

Шаг 4.1 Установить номер текущего экземпляра:  $s=1$ .

Шаг 4.2 Если  $s \leq S$ , тогда перейти на шаг 4.3, в противном случае – перейти на шаг 5.

Шаг 4.3 Установить номер текущего экземпляра:  $k = s+1$ .

Шаг 4.4 Если  $k \leq S$ , тогда перейти на шаг 4.5, в противном случае – перейти на шаг 4.7.

Шаг 4.5 Если  $x_t^s > x_t^k$ , тогда установить:  $z = x_t^s$ ,  $x_t^s = x_t^k$ ,  $x_t^k = z$ ,  $z = y_t^s$ ,  $y_t^s = y_t^k$ ,  $y_t^k = z$ , где  $z$  – буферная переменная.

Шаг 4.6 Установить:  $k = k+1$ . Перейти на шаг 4.4.

Шаг 4.7 Установить:  $s = s+1$ . Перейти на шаг 4.2.

Шаг 5. Установить номер текущего класса  $q=1$ .

Шаг 6. Если  $q > K$ , тогда перейти на шаг 18.

Шаг 7. Найти расстояния по оси  $j$ -го признака между экземплярами выборки, принадлежащими к  $q$ -му классу,  $\forall s, p = 1, 2, \dots, S, s \neq p$ :

$$r_j^q(s, p) = \begin{cases} |x_t^s - x_t^p|, & y_t^s = y_t^p = q, \\ -1, & \text{иначе} \end{cases}$$

Шаг 8. Найти среднее расстояние по оси  $j$ -го признака между экземплярами выборки, принадлежащими к  $q$ -му классу:

$$\bar{r}_j^q = \frac{2}{S_q - S_q} \frac{\sum_{s=1}^S \sum_{p=s+1}^S r_j^q(s, p)}{S_q - S_q}, \quad r_j^q(s, p) \geq 0,$$

где  $S_q$  – количество экземпляров, принадлежащих к  $q$ -му классу.

Шаг 9. Установить номер текущего интервала значений  $j$ -го признака экземпляров, принадлежащих к  $q$ -му классу  $k=0$ . Установить номер текущего экземпляра  $s=1$ . Установить количество интервалов значений  $j$ -го признака для экземпляров  $q$ -го класса  $D(j, q)=0$ .

Шаг 10. Если  $s > S$ , тогда перейти на шаг 17.

Шаг 11. Если  $y_t^s \neq q$ , тогда принять:  $s=s+1$ , перейти на шаг 10.

Шаг 12. Установить:  $k+1$ ,  $p=s+1$ ,  $A(j, q, k)=x_t^s$ ,  $B(j, q, k)=x_t^p$ ,  $n(j, q, k)=1$ ,  $D(j, q)=D(j, q)+1$ . Здесь  $A(j, q, k)$  и  $B(j, q, k)$  – соответственно, левое и правое граничные значения  $k$ -го интервала  $j$ -го признака для экземпляров  $q$ -го класса,  $n(j, q, k)$  – количество экземпляров  $q$ -го класса, попавших в  $k$ -ый интервал  $j$ -го признака для экземпляров  $q$ -го класса.

Шаг 13. Если  $p > S$ , тогда перейти на шаг 17.

Шаг 14. Если  $y_t^p \neq q$ , тогда принять:  $p=p+1$ , перейти на шаг 13.

Шаг 15. Если  $r_j^q(s, p) \leq \alpha_q \bar{r}_j^q$ , где  $\alpha_q$  – коэффициент, зависящий от количества экземпляров  $q$ -го класса, тогда принять:  $B(j, q, k)=x_t^p$ ,  $n(j, q, k)=n(j, q, k)+1$ ,  $p=p+1$ , перейти на шаг 13.

Для расчета  $\alpha_q$  предлагается использовать одну из формул:

$$\alpha_q = \frac{1}{1 + \log_2 S_q} \quad \text{или} \quad \alpha_q = \frac{\alpha}{1 + S_q}, \quad 1 \leq \alpha \leq S.$$

Шаг 16. Установить:  $s=p$ . Перейти на шаг 10.

Шаг 17. Установить:  $q=q+1$ . Перейти на шаг 6.

Шаг 18. Установить:  $j=j+1$ . Перейти на шаг 2.

Шаг 19. Для всех выделенных интервалов значений признаков определить  $n'(j,q,k)$  – количество попаданий экземпляров, не принадлежащих к  $q$ -му классу, в  $k$ -ый интервал значений  $j$ -го признака для экземпляров  $q$ -го класса.

Шаг 19.1 Установить:  $j = 1$ .

Шаг 19.2 Если  $j>N$ , тогда перейти на шаг 20.

Шаг 19.3 Установить:  $q = 1$ .

Шаг 19.4 Если  $q>K$ , тогда перейти на шаг 19.13.

Шаг 19.5 Установить:  $k = 1$ ,  $n'(j,q,k)=0$ .

Шаг 19.6 Если  $k>D(j,q)$ , тогда перейти на шаг 19.12.

Шаг 19.7 Установить:  $s=1$ .

Шаг 19.8 Если  $s>S$ , тогда перейти на шаг 19.11.

Шаг 19.9 Если  $A(j,q,k) \leq x_j^s \leq B(j,q,k)$  и  $u^s \neq q$ , тогда принять:

$$n'(j,q,k)=n'(j,q,k)+1.$$

Шаг 19.10 Установить:  $s=s+1$ . Перейти на шаг 19.8.

Шаг 19.11 Установить:  $k=k+1$ . Перейти на шаг 19.6.

Шаг 19.12 Установить:  $q=q+1$ . Перейти на шаг 19.4.

Шаг 19.13 Установить:  $j=j+1$ . Перейти на шаг 19.2.

Шаг 20. Определить показатели значимости (ценности) интервалов и признаков.

Шаг 20.1 Диагностическую ценность  $k$ -го интервала  $j$ -го признака для экземпляров  $q$ -го класса предлагается определять по формуле:

$$I(j, q, k) = \begin{cases} S_q^{-1}(n(j, q, k) - n'(j, q, k)), n(j, q, k) > n'(j, q, k), \\ 0, n(j, q, k) = n'(j, q, k), \\ -(S - S_q)^{-1}(n(j, q, k) - n'(j, q, k)), n(j, q, k) < n'(j, q, k), \end{cases}$$

$$j=1,2,\dots,N; q=1,2,\dots,K; k=1,2,\dots,D(j,q).$$

Шаг 20.2 Диагностическую ценность  $j$ -го признака для экземпляров  $q$ -го класса предлагается определять по формуле:

$$I(j, q) = \frac{1}{D(j, q)} \frac{D(j, q)}{k=1} \frac{1}{1 + e^{-I(j, q, k)}}, j=1,2,\dots,N; q=1,2,\dots,K.$$

Шаг 20.3 Диагностическую ценность  $j$ -го признака предлагается определять по формуле:

$$I_j = \frac{1}{K} \prod_{q=1}^K I(j, q), j=1,2,\dots,N.$$

Шаг 21. Останов.

После нахождения интервалов и их параметров можно определить нечеткие термы. В качестве функций принадлежности к нечетким термам можно использовать трапецеиподобные функции:

$$\mu_{j,q,k}(x_j^s) = \begin{cases} 0, & x_j^s \leq 0,5(A(j, q, k) + B(j, q, k - 1)), \\ \frac{x_j^s - 0,5(A(j, q, k) + B(j, q, k - 1))}{0,5(A(j, q, k) - B(j, q, k - 1))}, & 0,5(A(j, q, k) + B(j, q, k - 1)) \leq x_j^s < A(j, q, k), \\ 1, & A(j, q, k) \leq x_j^s \leq B(j, q, k), \\ \frac{0,5(A(j, q, k + 1) + B(j, q, k)) - x_j^s}{0,5(A(j, q, k + 1) - B(j, q, k))}, & B(j, q, k) \leq x_j^s < 0,5(B(j, q, k) + A(j, q, k + 1)), \\ 0, & 0,5(B(j, q, k) + A(j, q, k + 1)) \leq x_j^s, \end{cases}$$

либо П-образные функции:  $\mu_{j,q,k}(x_j^s) = \mu_{j,q,k_S}(x_j^s)\mu_{j,q,k_Z}(x_j^s)$ ,

где  $\mu_{j,q,k_S}(x_j^s)$  – S-образная функция, а  $\mu_{j,q,k_Z}(x_j^s)$  – Z-образная функция:

$$\mu_{i,q,k_S}(x_j^s) = \begin{cases} 0, & x_j^s < 0,5(A(j, q, k) + B(j, q, k - 1)), \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{\pi}{\pi} \frac{x_j^s - A(j, q, k)}{0,5(A(j, q, k) - B(j, q, k - 1))}, & 0,5(A(j, q, k) + B(j, q, k - 1)) \leq x_j^s \leq A(j, q, k), \\ 1, & x_j^s > A(j, q, k); \end{cases}$$

$$\mu_{j,q,k_Z}(x_j^s) = \begin{cases} 1, & x_j^s < B(j, q, k), \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \frac{\pi}{\pi} \frac{x_j^s - B(j, q, k)}{0,5(A(j, q, k + 1) - B(j, q, k))}, & B(j, q, k) \leq x_j^s \leq 0,5(B(j, q, k) + A(j, q, k + 1)), \\ 0, & x_j^s > 0,5(B(j, q, k) + A(j, q, k + 1)). \end{cases}$$

Также возможно использовать гауссиан:

$$\mu_{j,q,k}(x_j^s) = \exp \frac{\pi}{\pi} \frac{(x_j^s - 0,5(B(j, q, k) - A(j, q, k)))^2}{2(\alpha_q)^2} \Bigg|.$$

Принадлежность s-го экземпляра  $x^s$  к q-му классу по j-му признаку предлагается оценивать по формуле:

$$\mu_{q,j}(x^s) = \max_{k=1,2,\dots,D(j,q)} (I(j, q, k)\mu_{q,j,k}(x^s)), \quad q = 1, 2, \dots, K; j=1, 2, \dots, N.$$

Принадлежность s-го экземпляра  $x^s$  к q-му классу будем оценивать по формуле:

$$\mu_q(x^s) = \max_{j=1,2,\dots,N} (I(j, q)\mu_{q,j}(x^s))$$

$$\text{или } \mu_q(x^s) = \frac{1}{N} \prod_{j=1}^N I(j, q)\mu_{q,j}(x^s) \quad \text{или } \mu_q(x^s) = f \frac{\pi}{\pi} \prod_{j=1}^N I(j, q)\mu_{q,j}(x^s) \Bigg|,$$

где  $f(x) = 1/(1 + e^{-x})$ ,  $q = 1, 2, \dots, K$ .

Для синтеза иерархической нейро-нечеткой модели на основе исходной обучающей выборки необходимо для каждого класса сформировать набор правил, в условия и заключения которых входят номера интервалов значений признаков. Это позволит сформировать нечеткие термы и базу знаний для построения нейро-нечеткой сети.

Для полученного набора правил каждого класса следует сформировать иерархию принятия решения об отнесении распознаваемого экземпляра к данному классу. Это предлагается осуществлять путем группирования и объединения правил, отличающихся только значением термина, отдельно для каждого признака в порядке увеличения информативности признаков.

Метод синтеза иерархических логически прозрачных нейро-нечетких сетей, реализующий данные соображения, заключается в выполнении следующих шагов.

Шаг 1. Инициализация. Задать обучающую выборку  $\langle x, y \rangle$ .

Шаг 2. Определить значения характеристик обучающей выборки и сформировать структуры данных.

Шаг 2.1 На основе параметров топологии обучающей выборки найти  $\{A(j,k)\}$ ,  $\{B(j,k)\}$ ,  $\{K(j,k)\}$ ,  $\{I_j\}$ , где  $k$  – номер интервала значений  $j$ -го признака,  $k = 1, 2, \dots, k_j$ ;  $k_j$  – количество интервалов, на которые разбивается диапазон значений  $j$ -го признака,  $A(j,k)$  и  $B(j,k)$  – левая и правая границы  $k$ -го интервала значений  $j$ -го признака,  $K(j,k)$  – номер класса экземпляров  $k$ -го интервала значений  $j$ -го признака,  $I_j$  – оценка информативности  $j$ -го признака.

Шаг 2.2 Определить общее количество интервалов для всех признаков обучающей выборки:  $Z = \sum_{j=1}^N k_j$ .

Шаг 2.3 Сформировать массив узлов  $\{u(p)\}$ ,  $p = 1, 2, \dots, Z$ , которым последовательно сопоставить интервалы значений признаков в порядке увеличения номера признака и номера интервала значений признака. Добавить узел  $u(Z+1)$  для объединения нечетких термов выходной переменной. Установить общее количество узлов:  $z = Z+1$ .

Шаг 2.4 Сформировать матрицу связей между узлами  $\{v(i,j)\}$ , где  $v(i,j) = 0$ , если связь между  $i$ -ым и  $j$ -ым узлами отсутствует,  $v(i,j) = 1$ , если имеется связь, направленная от  $i$ -го узла к  $j$ -му узлу. Установить:  $v(i,j) = 0$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, z$ .

Шаг 2.5 Сформировать массив типов узлов  $\{t(j)\}$ , где  $t(j) = 0$ , если  $j$ -ый узел имеет тип "И";  $t(j) = 1$ , если  $j$ -ый узел имеет тип "ИЛИ";  $t(j) = -1$ , если  $j$ -ый узел является входным нечетким термом или выходным узлом сети. Задать типы узлов:  $t(j) = -1, j = 1, 2, \dots, z$ .

Шаг 2.6 Сформировать массив номеров уровней иерархии для узлов  $\{h\{j\}\}$ , где  $h(j)$  – номер уровня иерархии для  $j$ -го узла. Задать уровни иерархии для узлов:  $h(j)=1, j = 1, 2, \dots, z-1; h(z)=0$ .

Шаг 2.7 Сформировать нечеткие термы – задать функции принадлежности для интервалов значений признаков  $\mu_{i,k}(x_i)$ , где  $i$  – номер признака,  $k$  – номер интервала значений  $i$ -го признака.

Шаг 3. Установить текущий номер класса  $q = 1$ .

Шаг 4. Если  $q > K$ , где  $K$  – количество классов, на которые делятся экземпляры обучающей выборки, тогда перейти на шаг 1б.

Шаг 5. На основе обучающей выборки и параметров интервалов сформировать матрицу правил  $g$ . Установить номер текущего уровня иерархии:  $h = 2$ .

Шаг 5.1 Установить:  $s = 1, s_t = 1$ .

Шаг 5.2 Если  $s > S$ , тогда перейти на шаг 6.

Шаг 5.3 Если  $y^s = q$ , тогда для  $\forall j = 1, 2, \dots, N$  записать в ячейку  $g(s_t, j)$  номер интервала, в который попало значение  $j$ -го признака  $s$ -го экземпляра выборки, установить:  $s_t = s_t + 1$ . Номера интервалов значений признаков записываются в сплошной нумерации по всем признакам в порядке возрастания номера признака и номера интервала значений внутри признака.

Шаг 5.4. Установить:  $s = s + 1$ . Перейти на шаг 5.2

Шаг 6. Для каждого столбца матрицы  $g$  найти  $n(j)$  – количество интервалов  $j$ -го признака, принадлежащих к  $q$ -му классу,  $j = 1, 2, \dots, N$ . Упорядочить столбцы матрицы  $g$  в порядке возрастания  $n(j)$ .

Шаг 7. Установить:  $j = N, s_t = s_t - 1$ .

Шаг 8. Если  $j < 2$ , тогда перейти на шаг 12.

Шаг 9. Для  $j$ -го признака найти в  $g$  и обобщить правила с одинаковыми частями левее  $j$ -го столбца.

Шаг 9.1 Установить:  $s = 1$ .

Шаг 9.2 Если  $s > s_t$ , тогда перейти на шаг 10.

Шаг 9.3 Для интервала  $g(s, j)$  найти все интервалы того же  $j$ -го признака, имеющие одинаковые с ним левые части правил – строк матрицы  $g$ . Занести номера узлов для этих интервалов в вектор  $\mathfrak{X} = \{\mathfrak{x}_i\}$ , где  $\mathfrak{x}_i$  –  $i$ -ый элемент вектора  $\mathfrak{X}$ .

Шаг 9.4 Определить  $\ell$  – длину вектора  $\mathfrak{X}$ . Если  $\ell > 0$ , тогда: добавить новый узел  $u(z+1)$ ; принять:  $z = z + 1, h(z) = h + 1$ ; установить для узла  $z$  тип "ИЛИ":  $t(z) = 1$ ; добавить связи:  $v(\mathfrak{x}_i, z) = 1$ ; для  $p = 1, 2, \dots, s_t$ : если  $g(p, j) \in \mathfrak{X}$ , тогда установить:  $g(p, j) = z$ .

Шаг 9.5 Оставить в матрице  $g$  из каждой группы одинаковых правил только одно правило. Скорректировать соответствующим образом  $s_t$ .

Шаг 9.6 Установить:  $s = s + 1$ . Перейти на шаг 9.2.

Шаг 10. Для  $s = 1, 2, \dots, s_i$ : добавить новый узел  $u(z+1)$ ; принять:  $z=z+1$ ,  $h(z) = h + 2$ ; установить для узла  $z$  тип "И":  $t(z) = 0$ ; добавить связи:  $v(r(s, j), z) = 1$ ,  $v(r(s, j-1), z) = 1$ ; установить:  $r(s, j-1) = z$ .

Шаг 11. Установить:  $h = h+2$ ,  $j = j-1$ . Перейти на шаг 8.

Шаг 12. Оставить в матрице  $r$  из каждой группы одинаковых правил только одно правило. Скорректировать соответствующим образом  $s_i$ .

Шаг 13. Если  $s_i > 1$ , тогда: добавить новый узел  $u(z+1)$ ; принять:  $z=z+1$ ,  $h(z) = h + 1$ ; установить для узла  $z$  тип "ИЛИ":  $t(z) = 0$ ; добавить связи:  $v(s, z)=1$ ; для  $s = 1, 2, \dots, s_i$ ; установить:  $r(1, 1) = z$ ; удалить из  $r$  все правила, кроме первого.

Шаг 14. Установить связь:  $v(r(1,1), Z+q) = 1$ .

Шаг 15. Установить:  $q = q+1$ . Перейти на шаг 4.

Шаг 16. Установить:  $h(Z+1) = 1 + \max_{i=1,2,\dots,z} h(i)$ .

Для каждого уровня иерархии  $\eta = 1, 2, \dots, h(Z+1)$ , определить  $N_\eta$  – количество узлов, находящихся на уровне иерархии  $\eta$ .

Шаг 17. Останов.

Схема иерархической логически прозрачной нейро-нечеткой сети, синтезируемой на основе предложенного метода, представлена на рисунке.

На входы сети подаются четкие значения признаков распознаваемого экземпляра. Первый слой сети содержит узлы, определяющие принадлежности значений признаков к нечетким термам – интервалам значений признаков. Скрытые слои сети реализуют иерархический вывод решения о принадлежности к нечетким термам выходной переменной. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) содержат нейроны типа "ИЛИ", нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) содержат нейроны типа "И". Последний слой сети содержит один нейрон, выполняющий объединение нечетких значений принадлежностей распознаваемого экземпляра к классам и приведение результата к четкому значению.

Дискриминантные функции нейронов сети будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \max \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2;$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \frac{\prod_{j=1}^k w_j^{(\eta,i)} x_j^{(\eta,i)}}{\prod_{j=1}^k x_j^{(\eta,i)}}, \quad \eta = h(Z+1), i = 1.$$

Функции активации нейронов сети будут определяться по формулам:

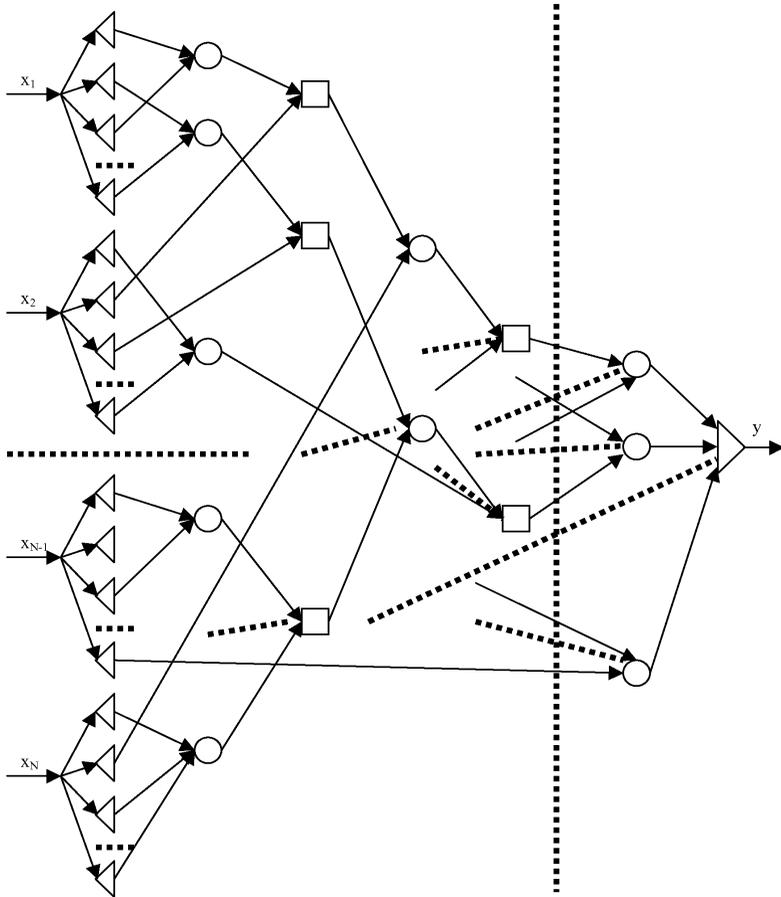


Рисунок – Схема иерархической нейро-нечеткой сети

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \max_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \min_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2;$$

для задач классификации:  $\psi^{(\eta,i)}(x) = \text{round}(x)$ ,  $\eta = h(Z+1)$ ,  $i = 1$ ;

для задач оценивания:  $\psi^{(\eta,i)}(x) = x$ ,  $\eta = h(Z+1)$ ,  $i = 1$ .

Весовые коэффициенты нейронов  $w_j^{(\eta,i)}$ , где  $j$  – номер входа,  $i$  – номер нейрона,  $\eta$  – номер слоя, будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = \begin{cases} j, \eta = h(Z+1), i = 1, j = 1, 2, \dots, K, \\ v(j,i), \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}, \\ 1-v(j,i), \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}. \end{cases}$$

Сеть, синтезированная на основе приведенных выше формул, будет обеспечивать вывод на основе иерархической max–min композиции.

Данную сеть можно также модифицировать для реализации вывода на основе иерархической max–max композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут, как и в предыдущем случае, содержать нейроны типа "ИЛИ", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать также нейроны типа "ИЛИ".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1,$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \max_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = v(j,i), \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}.$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической max–prod композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут, как и в предыдущем случае, содержать нейроны типа "ИЛИ", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "PROD".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \max \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2;$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \max_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \prod_j \varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}), \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = \begin{cases} [v(j,i), \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}, \\ [1-v(j,i), \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}. \end{cases}$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической max–average композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут, как и в предыдущем случае, содержать нейроны типа "ИЛИ", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "AVERAGE".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1,$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \max_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{N_{\eta-1}} \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} \varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}), \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = v(j,i), \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}.$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической average–max композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут содержать нейроны типа "AVERAGE", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "ИЛИ".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1,$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{N_{\eta-1}} \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} \varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}), \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \max_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = v(j,i), \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}.$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической average-min композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут содержать нейроны типа "AVERAGE", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "И".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1,$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \max \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2;$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{N_{\eta-1}} \prod_{j=1}^{N_{\eta-1}} \varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}), \quad \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \min_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = \begin{cases} v(j,i), \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1, i=1, 2, \dots, N_{\eta}, j=1, 2, \dots, N_{\eta-1}, \\ 1-v(j,i), \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2, i=1, 2, \dots, N_{\eta}, j=1, 2, \dots, N_{\eta-1}. \end{cases}$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической average-prod композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут содержать нейроны типа "AVERAGE", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "PROD".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1,$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \max \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2;$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{N_{\eta-1}} \prod_{j=1}^{N_{\eta-1}} \varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}), \quad \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \prod_j \varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}), \quad \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = \begin{cases} v(j,i), \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}, \\ 1 - v(j,i), \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}. \end{cases}$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической average-average композиции. Четные (на рисунке обозначены окружностями) и нечетные (на рисунке обозначены квадратами) скрытые слои будут содержать нейроны типа "AVERAGE".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1,$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{N_{\eta-1}} \prod_{j=1}^{N_{\eta-1}} \varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}), \quad \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = v(j,i), \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}.$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической sum-prod композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут содержать нейроны типа "SUM", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "PROD".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(x) = \prod_{j=1}^{N_{\eta-1}} w_j^{(\eta,i)} x_j^{(\eta,i)}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1,$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \max \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2;$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1,$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \prod_j \varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}), \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = \begin{cases} v(j,i), \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}, \\ 1 - v(j,i), \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2, i = 1, 2, \dots, N_\eta, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}. \end{cases}$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической max–sum композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут содержать нейроны типа "ИЛИ", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "SUM".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} w_j^{(\eta,i)} x_j^{(\eta,i)}}, \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2;$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \max_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1,$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Весовые коэффициенты нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = v(j,i), \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_{\eta}, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}.$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической sum–max композиции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут содержать нейроны типа "SUM", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "ИЛИ".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{\sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} w_j^{(\eta,i)} x_j^{(\eta,i)}}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1;$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \min \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2;$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad \eta = 2, 4, \dots, h(Z+1)-1,$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \max_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta = 3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Веса нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = v(j,i), \eta = 2, 3, \dots, h(Z+1)-1, i = 1, 2, \dots, N_{\eta}, j = 1, 2, \dots, N_{\eta-1}.$$

С помощью предложенного метода также можно синтезировать сеть, реализующую вывод на основе иерархической sum–min компози-

ции. Четные скрытые слои (на рисунке обозначены окружностями) будут содержать нейроны типа "SUM", а нечетные скрытые слои (на рисунке обозначены квадратами) будут содержать нейроны типа "И".

Параметры нейронов первого и последнего слоев будут определяться также как и ранее. Для нейронов скрытых слоев дискриминантные функции будут определяться следующим образом:

$$\varphi^{(\eta,i)}(x) = \sum_{j=1}^{N_{\eta-1}} w_j^{(\eta,i)} x_j^{(\eta,i)}, \quad \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1,$$

$$\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}) = \max \{w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)}\}, \quad \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2,$$

а функции активации будут определяться по формулам:

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}, \quad \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1,$$

$$\psi^{(\eta,i)}(x) = \min_j \{\varphi^{(\eta,i)}(w_j^{(\eta,i)}, x_j^{(\eta,i)})\}, \quad \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2.$$

Веса нейронов скрытых слоев будут определяться по формуле:

$$w_j^{(\eta,i)} = \begin{cases} v(j,i), \eta=2, 4, \dots, h(Z+1)-1, i=1, 2, \dots, N_{\eta}, j=1, 2, \dots, N_{\eta-1}, \\ [1-v(j,i), \eta=3, 5, \dots, h(Z+1)-2, i=1, 2, \dots, N_{\eta}, j=1, 2, \dots, N_{\eta-1}. \end{cases}$$

Предложенный метод синтеза нейро-нечетких сетей обобщает классические методы нечеткого вывода и позволяет строить логически прозрачные нейро-нечеткие сети, удобные не только для анализа и восприятия, но также обладающие высокими обобщающими свойствами и легко реализуемые аппаратно за счет упрощения структуры обрабатываемых элементов и сокращения количества связей между нейроэлементами.

### Заключение

С целью автоматизации процедур выделения и опознавания объектов на сложном фоне в работе решена актуальная задача создания устойчивых к изменениям масштаба и поворота методов, позволяющих обеспечить выделение объектов на статических изображениях со сложным фоном с последующим их распознаванием.

*Научная новизна* работы заключается в том, что: предложены новые методы синтеза моделей детекторов для выделения объектов на сложном фоне, позволяющие в автоматизированном и автоматическом режиме формировать модели для опознавания наличия частей объектов на фрагментах изображений; получил дальнейшее развитие метод разбиения диапазона значений признаков на интервалы, соответствующие группам экземпляров с одинаковым номером класса, который модифицирован для учета взаимопроникновений и нелинейного разделения классов, что позволяет более точно определять параметры топологии обучающей выборки для построения распознающих моделей и оценивать информативность признаков; впервые пред-

ложен метод синтеза иерархических логически прозрачных нейро-нечетких сетей, обобщающий классические методы нечеткого вывода и позволяющий строить логически прозрачные нейро-нечеткие сети, удобные для анализа и восприятия, а также обладающие высокими обобщающими свойствами и легко реализуемые аппаратно за счет упрощения структуры обрабатываемых элементов и сокращения количества связей между нейроэлементами.

*Практическая ценность* работы состоит в том, что разработано математическое обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс выделения и распознавания объектов на сложном фоне.

Работа выполнена как часть НИР ООО "МПА Групп" «Разработка математического и информационного обеспечения интеллектуальной системы визуального контроля транспортных средств» (№ гос. регистрации 0106U012013) по договору творческого содружества между Запорожским национальным техническим университетом и ООО "МПА Групп".

### Перечень ссылок

1. Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2006. – 1072 с.
2. Smith C.E., Richards C.A., Brandt S.A., Papanikolopoulos N.P. Visual Tracking for Intelligent Vehicle-Highway Systems // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 1996. – Vol. 45. – № 4. – P. 744–759.
3. Філінюк М.А., Ліщинська Л.Б. Організація і побудова спецобчислювачів моментних ознак зображення. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 162 с.
4. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии: Учебное пособие. – М.: Триумф, 2003. – 320 с.
5. Субботин С.А. Омнифонтовая система признаков для распознавания символов // Нейронные сети и модели в прикладных задачах науки и техники: Труды международной конференции КЛИН-2002. – Ульяновск: УлГТУ, 2002. – Т.3. – С. 99–100.
6. Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей: Монография / В.И. Дубровин, С.А. Субботин, А.В.Богуслаев, В.К. Яценко. – Запорожье: ОАО "Мотор-Сич", 2003. – 279 с.
7. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер с польск. – М.: Горячая линия-Телеком. – 2004. – 452 с.
8. Субботин С.А. Неитеративный синтез и редукция нейро-нечетких моделей // Искусственный интеллект. – 2006. – № 3. – С. 323–330.
9. Субботин С.А. Методы синтеза нейро-нечетких классификаторов для случая нескольких классов // Информационные технологии. – 2006. – № 11. – С. 31–36.

**Рецензент** – д.т.н., профессор Таланин И.Е. (Запорожье, Гуманитарный университет "ЗИГМУ").

Статья рекомендована к публикации кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.01.2007 г.)

Поступила 10.01.2007 г. После доработки 21.01.2007 г.

***Subbotin S.A. Synthesis of neuro-fuzzy models for object detection and recognition on a difficult background on 2D image***

The actual problem devoted to creation of robust to changes of scale and turn methods of object detection and recognition on the static images with a difficult background is solved. The new methods of detector model synthesis for object detection on a difficult background are offered. The method of splitting of a feature value range on intervals has get the further development. It allows to evaluate topology parameters of a training sample and to estimate the feature informativity. The method of hierarchical logically transparent neuro-fuzzy network synthesis is offered for the first time. It allows to build a model with high generalizing properties and convenient for the analysis.

***Субботин С.А. Синтез нейро-нечетких моделей для выделения и распознавания объектов на сложном фоне по двумерному изображению***

Решена актуальная задача создания устойчивых к изменениям масштаба и поворота методов, позволяющих обеспечить выделение объектов на статических изображениях со сложным фоном с последующим их распознаванием. Предложены новые методы синтеза моделей детекторов для выделения объектов на сложном фоне; получил дальнейшее развитие метод разбиения диапазона значений признаков на интервалы, позволяющий определять параметры топологии обучающей выборки и оценивать информативность признаков; впервые предложен метод синтеза иерархических логически прозрачных нейро-нечетких сетей, позволяющий строить модели, обладающие высокими обобщающими свойствами и удобные для анализа.

***Субботін С.О. Синтез нейро-нечітких моделей для виділення і розпізнавання об'єктів на складному тлі за двовимірним зображенням***

Вирішено актуальне завдання створення стійких до змін масштабу і повороту методів, що дозволяють забезпечити виділення об'єктів на статичних зображеннях зі складним тлом з подальшим їхнім розпізнаванням. Запропоновано нові методи синтезу моделей детекторів для виділення об'єктів на складному тлі; дістав подальшого розвитку метод розбиття діапазону значень ознак на інтервали, що дозволяє визначати параметри топології навчаючої вибірки й оцінювати інформативність ознак; уперше запропоновано метод синтезу ієрархічних логічно прозорих нейро-нечітких мереж, який дозволяє будувати моделі, що володіють високими узагальнюючими властивостями і є зручними для аналізу.



**Системы, основанные на знаниях**  
**Knowledge-based systems**  
**Системы, основанные на знаниях**

УДК 004.89

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА «ТЕХНОМЕХ»  
ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ТЕХНОЛОГА  
ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
НА ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВАЛОВ МЕХАНООБРАБОТКОЙ**

*Молодых Л.С.*

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

**Введение**

Проектирование технологической подготовки производства (ТПП) характеризуется как процесс недостаточно формализованный, сложный, многовариантный по выбору, решаемый в условиях отсутствия необходимой информации, неопределенности, которая обусловлена неполнотой и разнотипностью данных о ситуации, неизвестны правила принятия идентификационных и прогнозных решений. Существующие формализованные методы принятия решений в таких условиях не пригодны. Положительные результаты дает разработка знаниеориентированных систем, которые имитируют принятие решений опытным технологом, опираясь на его знания и опыт.

В настоящее время, на отечественном рынке нет систем, обеспечивающих в полной мере интеллектуальную поддержку принятия решений (ППР) технологом в ТПП. Отсюда следует необходимость создания такой системы для ППР, основываясь на знания и опыт передовых технологов. Тем самым, сохраняя знания, накопленные годами, для дальнейшего их использования.

*Задача работы:* создать интеллектуальную систему для знаниеориентированной ППР технолога при проектировании технологического процесса (ТП) на изготовление валов механообработкой, на основе использования и развития метода профессора И.Б. Сироджи разноуровневых алгоритмических квантов знаний (РАКЗ-метод). Применение РАКЗ-метода в настоящей работе осуществлено на основе учёта ограничений относительно ситуаций на производстве как достоверных событий, которые описываются t-квантами в условиях  $\alpha$ -неопределенности [1].

## 1. Задачи, решаемые технологом при проектировании ТП

Одной из основных задач технологической подготовки производства (ТПП) является проектирование технологического процесса (ТП) изготовления деталей нового изделия. Наряду с формализованными задачами (определению припусков на механическую обработку, операционных технологических размеров, режимов резания), технолог решает в процессе разработки ТП неформализованные задачи (выбор методов обработки, типов оборудования, виды инструмента, назначения схем базирования, способа установки детали, формирование состава технологических операций, определение последовательности операций, выбор вида заготовки, определение последовательности переходов на операции). Цель разработки интеллектуальной системы «ТехноМех» – решение неформализованных задач с использованием ИИ.

## 2. Структура интеллектуальной системы «ТехноМех»

На рис. 1 представлена общая схема структуры системы и принципа работы «ТехноМех».



Рисунок 1 – Схема системы «ТехноМех»

## 2. Принцип работы «ТехноМех» при генерации ТП

Планирование процесса мехобработки деталей типа «вал» в системе «ТехноМех» зиждется на подходе: готовая деталь расчленяется на набор элементарных поверхностей и генерируется последовательность операций с выдачей маршрутной карты. В системе приняты классы, описывающие деталь и заготовку (рис. 2):

Класс «**Поверхность**» включает в себя следующие свойства: 1) № поверхности (проставляет технолог на чертеже, начиная с передней торцевой поверхности и далее по часовой стрелке); 2) Код поверхности

в соответствии с классификатором (рис. 3); 3) Диаметр поверхности  $D$ , мм; 4) Длина поверхности  $L$ , мм; 5) Твердость поверхности HRC; 6) Шероховатость поверхности  $R_a$ ; 7) Точность поверхности  $T$ , кв.

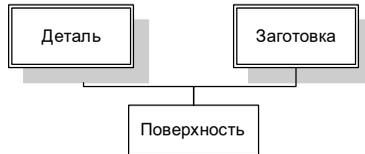


Рисунок 2 – Классы описания детали в системе «ТехноМех»

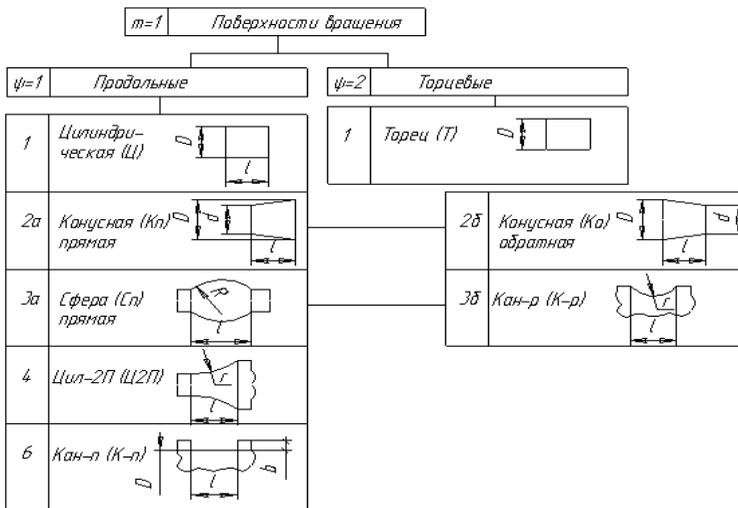


Рисунок 3 – Классификатор поверхностей вращения

Класс «**Деталь**» включает в себя следующие свойства: 1) № детали (указанный на чертеже); 2) Номера поверхностей, принадлежащих детали; 3) Тип производства (размер партии  $n$ ); 4) Материал (указанный конструктором на чертеже); 5) Вид термообработки (указанный конструктором на чертеже).

Класс «**Заготовка**» включает в себя следующие свойства: 1) Вид заготовки; 2) Номера поверхностей, принадлежащих заготовке, с приспусками; 3) Наименование оборудования.

**Задача выбора вида заготовки** для деталей валы решается на базе логической сети вывода решений (ЛСВР) (рис. 4, табл. 1).

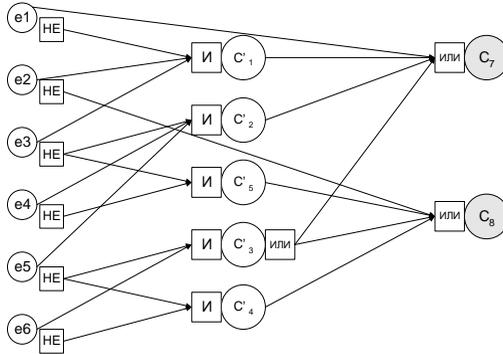


Рисунок 4 – ЛСВР по выбору вида заготовки для валов

Таблица 1 – Семантика узлов ЛСВР выбора вида заготовки

Посылки	Следствия
e1=( $D_{пр} \leq d_1$ )	c7=(пруток)
e2=( $D_{пр} \leq d_{прим}$ )	c8=(поковка)
e3=( $P_{пр} \setminus P_{дет} \leq W_1$ )	
e4=( $P_{пр} \setminus P_{дет} \leq W_2$ )	
e5=( $n \leq n_1$ )	
e6=( $n \leq n_2$ )	

**Вход:** 1) минимально возможный диаметр заготовки  $d_1$  (для валов  $d_1 \leq 0,45$ ); 2) наибольший диаметр прутка по применимости  $d_{прим}$ ; 3) коэффициент использования материала ( $W=W_1 \div W_2$ ); 4) величина партии ( $n=n_1 \div n_2$ ); 5) диаметр заготовки прутка  $D_{пр}$ ; 6) вес заготовки  $P_{пр}$  и детали  $P_{дет}$ .

**Выход:** вид заготовки (пруток, поковка).

Планы процессов представлены в трехуровневой иерархии (рис. 5). Одиночные проходы находятся на нижнем уровне. Проходы, требующие одного и того же инструмента, сгруппированы в операции. Операции, выполнимые с одного и того же станова, группируются в «фазы».

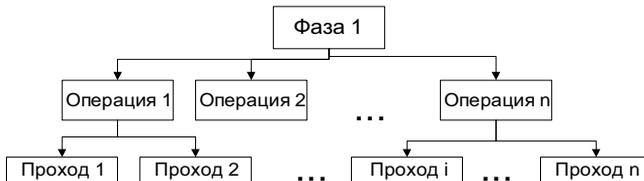


Рисунок 5 – Иерархия процесса получения детали мехобработкой



Таблица 3 – Семантика узлов ЛСВР по плану обработки детали

Посылки		Следствия
e1=( $T \geq 11$ )	e8=( $0,004 \leq Ra < 0,16$ )	C <sup>1</sup> <sub>34</sub> =(Э4: точить)
e2=( $6 \leq T < 11$ )	e9=( $\delta_{ij} \geq 0,15$ )	C <sup>2</sup> <sub>34</sub> =(Э4: шлифовать)
e3=( $5 \leq T < 6$ )	e10=( $0,05 \leq \delta_{ij} < 0,15$ )	C <sup>3</sup> <sub>36</sub> =(Э6: точить)
e4=( $Ra \geq 2,5$ )	e11=( $0,01 \leq \delta_{ij} < 0,01$ )	C <sup>4</sup> <sub>38</sub> =(Э8: шлифовать)
e5=( $1,25 \leq Ra < 2,5$ )	e12=(старение)	C <sup>5</sup> <sub>311</sub> =(Э11: шлифовать)
e6=( $0,32 \leq Ra < 1,25$ )	e13=(закалка и отпуск)	C <sup>6</sup> <sub>313</sub> =(Э13: доводочное шлифование)
e7=( $0,16 \leq Ra < 0,32$ )	e14=(азотирование)	

### Заключение

Разработка знаниеориентированной системы «ТехноМех» позволяет автоматизировать интеллектуальный труд технолога при разработке ТП в процессе ТПП за счет представления и вывода на знаниях.

### Перечень ссылок

1. *Сироджа И.Б.* Квантовые модели и методы искусственного интеллекта для принятия решений и управления. – К.: Наукова думка, 2002. – 420 с.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Пуятин Е.П. (г. Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программного обеспечения автоматизированных систем Национального аэрокосмического университета им Н.Е. Жуковского «ХАИ» (Протокол №6 от 21.12.2006г.).

*Поступила 02.02.2007 г.*

### *Molodykh L.S. Technologist decision support intelligent system “Techno-Mech” of engineering process designing for mechanoprocessing shafts production*

Technologist knowledge-oriented support the system on the base of use RAKZ-method are designed which accumulate experience and automatize intellectual work of technologist.

### *Молодых Л.С. Интеллектуальная система «ТехноМех» для поддержки принятия решений технолога при проектировании технологического процесса на изготовление валов механообработкой*

Разработана система знаниеориентированной поддержки технолога на базе применения РАКЗ-метода, которая накапливает опыт и автоматизирует интеллектуальный труд технолога.

### *Молодых Л.С. Интеллектуальна система «ТехноМех» для підтримки прийняття рішень технолога при проектуванні технологічного процесу на виготовлення валів механообробкою*

Розроблена система знанняорієнтованої підтримки технолога на базі використання РАКЗ-метода, яка накопичує досвід та автоматизує інтелектуальний труд технолога.

УДК 681.5

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АСИМПТОТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

*Самигулина Г.А.*

Институт проблем информатики и управления МОН Республики Казахстан

### Введение

Прогресс в развитии новых поколений интеллектуальных систем напрямую связан с последними достижениями в области информационных технологий, теории информации и управления. Особый интерес представляют нетрадиционные методы. Актуальным является применение биологического подхода искусственным иммунным системам (ИИС), построенного на принципах обработки информации молекулами белков [1]. Чрезвычайно огромен интерес к данной области исследования во всем мире. Прежде всего, притягивает способность естественных биологических систем решать многомерные задачи огромной вычислительной сложности в реальном масштабе времени.

В связи с тем, что современные системы управления характеризуются большой сложностью, неопределенностью параметров и нелинейным характером протекающих процессов актуально использование подхода ИИС при разработке данных систем.

Большинство сложных объектов управления функционируют в стохастической среде. Для исследования динамических свойств выделенного класса систем управления используется метод квазирасщепления [2]. Данный метод позволяет с помощью алгебраических проекторов декомпозировать сложную систему управления на взаимосвязанные подсистемы меньшей размерности, но эквивалентные по динамическим свойствам исходной системе.

### 1. Постановка задачи

Рассмотрим управляемый объект, на входе которого действуют возмущения типа «белого шума» и математическая модель которого представлена в векторно-матричной форме Ланжевена следующим образом:

$$\dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) + D(X)Z(t), t \in I(t_0), \quad (1)$$

где множество  $I(t_0) \subset [0, \infty)$ ,  $t$  – текущее время;

$X(t) = (X_1(t), \dots, X_n(t))^T \in R^n$  – вектор состояний управляемого объ-

екта;  $^T$  – символ транспонирования;  $A(t) = [a_{ij}(t)] \in R^{n \times n}$  – функциональная матрица;  $B(t) = (b_1(t), \dots, b_n(t))^T \in R^n$  – функциональный вектор, соответственно, удовлетворяющие соотношениям:

$$A^- \leq A(t) \leq A^+, B^- \leq B(t) \leq B^+. \quad (2)$$

Неравенства (2) понимаются в покомпонентном смысле, где  $A^+, A^-, B^+, B^-$  – известные константные матрицы и векторы соответствующих размерностей;  $U(t) \in R^1$  – скалярное управление;  $Z(t) \in R^n$  – аддитивное векторное возмущение типа белого шума, которое действует на входе объекта управления:  $Z(t) = (Z_1(t), \dots, Z_n(t))^T$ .

$D(X) \in R^{n \times n}$  – матрица шумов, зависящая от переменных состояний объекта управления.

Управление  $U(t)$  выбирается такое, чтобы обеспечить желаемую динамику в замкнутой системе:

$$U(t) = U(X(t), t). \quad (3)$$

Желаемая динамика замкнутой системы управления задается в виде:

$$\sigma(t) = C^T X = 0, \quad (4)$$

где  $C \in R^n - Const, C^T = [C_1, \dots, C_n], C_n = 1$ .

Соотношения (1–4) определяют математическую модель, далее называемую S-системой [3].

Задача исследования формулируется следующим образом: разработать интеллектуальную экспертную систему прогнозирования асимптотической устойчивости в среднем квадратическом стохастической системы управления (S-системы) на основе метода квазирасщепления и биологического подхода ИИС с целью прогнозирования поведения сложной системы и оперативного управления текущей ситуацией в реальном масштабе времени.

Недостатком математических моделей в форме Ланжевена является наличие возмущения типа белого шума, что ведет к разрывности траекторий движения. Более удобной формой представления математических моделей являются стохастические квазирасщепленные дифференциальные уравнения типа Ито, в которых зависимые возмущения заменяются независимыми винеровскими процессами и корректируются векторы сноса. После данной процедуры имеем две подсистемы:  $\overline{S}_1$  и  $\overline{S}_2$  записанных относительно функций  $x'(t)$  и  $\sigma(t)$  в виде стохастических дифференциальных уравнений типа Ито. При этом сохраняется кинематическое подобие исходной S-системе [3].

## 2. Классификация решений

Для исследования асимптотической устойчивости в среднем квадратическом квазиразщепленных стохастических систем управления на основе перспективного биологического подхода ИИС необходимо осуществить следующую классификацию решений. Пусть управление  $U(t)$  будет таким [2], что для момента времени  $t_1 \geq t_0$  для подсистем  $\overline{S_1}$  и  $\overline{S_2}$  решения  $x'(t)$ ,  $\sigma(t)$  удовлетворяют следующему неравенству:

$$\|\sigma(t)\| \leq \delta \|x'(t)\| + \eta, \quad (5)$$

где  $\delta, \eta - \text{Const.}, \delta \geq 0, \eta \geq 0$ .

В данном случае асимптотика решений S-системы определяется асимптотикой решений  $\overline{S_1}$ -подсистемы.

В случае, когда выполняется обратное неравенство, то есть:

$$\|\sigma(t)\| > \delta \|x'(t)\| + \eta, \quad (6)$$

где  $t \in I(t_1)$ , то асимптотика решений определяется подсистемой  $\overline{S_2}$ .

В пространстве состояний выделим множества конусного типа следующего вида:

$$G_{\delta, \eta} = \{x \in R^n : \|\sigma(x)\| \leq \delta \|x\| + \eta\}, \text{ пусть } \eta = 0. \quad (7)$$

$$\overline{G}_{\delta, \eta} = \{x \in R^n : \|\sigma(x)\| > \delta \|x\| + \eta\}, \text{ пусть } \eta = 0. \quad (8)$$

Таким образом, заданные множества порождают в пространстве  $R^n$  два класса решений:  $\{x(t)\}_1, \{x(t)\}_2, t \in I(t_0)$ . Первый класс решений относится к области  $G_{\delta, \eta}$  – подсистема  $\overline{S_1}$ . Второй класс решений относится к области  $\overline{G}_{\delta, \eta}$  – подсистема  $\overline{S_2}$ . Исследование динамических свойств исходной S-системы сводится к исследованию либо подсистемы  $\overline{S_1}$ , либо подсистемы  $\overline{S_2}$ .

Так как при квазиразщеплении [2] считается, что пространство  $R^n$  представляется прямой суммой подпространств  $L_1$  и  $L_2$ :  $L_1 \subseteq R^n, L_2 \subseteq R^n$ , то область  $G_{\delta, \eta}^1$  будет дополнением множества  $G_{\delta, \eta}$  до подпространства  $L_1$ , а область  $\overline{G}_{\delta, \eta}^2$  будет дополнением множества  $\overline{G}_{\delta, \eta}$  до подпространства  $L_2$ . Область  $G_{\delta, \eta}^1$  будет относиться к третьему классу решений, а область  $\overline{G}_{\delta, \eta}^2$  к четвертому классу.

### 3. Технология обработки информации на основе ИИС

Согласно идеологии ИИС формируются эталонные матрицы управления  $U_1, U_2, \overline{U}_1, \overline{U}_2$  для каждого из 4 классов. Классы выделяются экспертами в зависимости от областей функционирования и определяются особенностями процессов, параметрами квазирасщепленных подсистем  $\overline{S}_1, \overline{S}_2$  и различных факторов, влияющих на систему. После сингулярного разложения, получаем правые и левые сингулярные вектора  $\{x_1, y_1\}, \{x_2, y_2\}$  и т.д. эталонных матриц. Формируются также матрицы управления, рассматриваемые как образы:  $u_1, \dots, u_n$ . Энергии связи  $W_1, W_2, W_3, W_4$  между формальными пептидами для предложенных 4 классов могут быть представлены в следующем виде:

$$W_1 = -x_1^T u y_1, \quad W_2 = -x_2^T u y_2, \quad W_3 = -x_3^T u y_3, \quad W_4 = -x_4^T u y_4, \quad (9)$$

где  $u$  – рассматриваемый образ,  $T$  – символ транспонирования.

Известно, что нативная (функциональная) укладка белковой цепи соответствует минимуму энергии связи, поэтому минимальное значение энергии связи определяет класс  $k$ , к которому принадлежит данный образ:

$$W_k = \min\{W_1, W_2, W_3, W_4\}. \quad (10)$$

Ниже приведен разработанный алгоритм, который состоит из 12 шагов.

*Шаг 1.* Получение выражений операторов проектирования  $P_1$  и  $P_2$  для стохастической системы управления ( $S$  – системы) в форме дифференциальных уравнений Ланжевена.

*Шаг 2.* Получение квазирасщепленных подсистем  $S_1'$  и  $S_2'$  на основе операторов проектирования  $P_1$  и  $P_2$  в форме Ланжевена.

*Шаг 3.* Получение стохастических квазирасщепленных подсистем  $\overline{S}_1$  и  $\overline{S}_2$  в форме дифференциальных уравнений типа Ито [3].

*Шаг 4.* Классификация областей решений квазирасщепленных подсистем  $\overline{S}_1$  и  $\overline{S}_2$ .

*Шаг 5.* Нормировка входных информативных признаков [5].

*Шаг 6.* Выделение информативных признаков на основе методов факторного анализа [4]. Создание оптимальной структуры искусственной иммунной сети по весовым коэффициентам информативных признаков [5].

*Шаг 7.* Создание с помощью экспертов временных рядов, состоящих из информативных признаков характеризующих каждый класс, которые рассматриваются как антигены. Для улучшения специфичности узнавания сворачивание временных рядов в матрицы управления, являющиеся эталонами для каждого класса. Сингулярное разложение данных эталонных матриц управления и определение правых и левых сингулярных векторов.

*Шаг 8.* Процедуры обучения ИИС с учителем или без учителя. Оценка погрешностей обучения.

*Шаг 9.* Создание матриц управления – образов по временным рядам информативных признаков. Матрицы образов рассматриваются как антитела.

*Шаг 10.* Определение минимальной энергии связи между формальными пептидами (антителами и антигенами) и решение задачи распознавания образов.

*Шаг 11.* Оценка энергетических ошибок распознавания образов AIS на основе свойств гомологичных белков [6].

*Шаг 12.* Определение асимптотической устойчивости в среднем квадратическом стохастической системы управления (S-системы) по квазирасщепленным подсистемам  $\overline{S_1}$  или  $\overline{S_2}$ , прогноз поведения сложной стохастической системы и оперативная корректировка управления в реальном масштабе времени.

### Заключение

При разработке данной интеллектуальной экспертной системы управления используется уникальная информационная технология, которая состоит из двух ключевых моментов:

- предварительная обработка данных на основе методов факторного анализа, позволяющая создать эффективные алгоритмы обучения ИИС;
- устранение погрешностей энергетических оценок ИИС при решении задачи распознавания образов на основе свойств гомологичных белков. Погрешности ИИС возникают за счет неполноты данных, корреляции данных и ошибок измерения. Особенно эта проблема актуальна для схожих по структуре пептидов, которые имеют примерно одинаковые параметры и находятся на границах классов. Из-за энергетических погрешностей они могут быть отнесены по ошибке не в свой класс, что существенно влияет на достоверность прогноза и может привести к аварийной ситуации.

### Перечень ссылок

1. *Tarakanov A.O.* Formal peptide as a basic of agent of immune networks: from natural prototype to mathematical theory and applications // Proc. of I Int. workshop of Central and Eastern Europe on Multi-Agent Systems. – 1999.
2. *Емельянов С.В., Коровин С.К.* Дискретные бинарные системы автоматического управления // Итоги науки и техники. Техн. кибернетика. – М.: ВИНТИ, 1984. – № 17. – С. 70–160.
3. *Самигулина Г.А.* Автоматизированное построение бинарных стохастических систем управления на основе метода квазирасщепления. – Алматы: ИПИУ МОН РК. – 2001. – 67с.
4. *Иберла К.* Факторный анализ. – М.: Статистика. – 1980.

5. *Самигулина Г.А., Чебеико С.В.* Выделение информативных признаков штаммов чумного микроба для прогнозирования эпизоотий чумы // Проблемы нелинейного анализа в инженерных системах. – Казань: КГТУ им. А.Т.Туполева, 2004. – Вып.1(20). – Том.10. – С.83–95.

6. *Samigulina G.A., Chebeiko S.V.* Technology of elimination errors the energy estimations of Artificial Immune Systems of the forecasting plague // Proceedings of the 6 international conference on Computational Intelligence and Natural Computation. – Cary, North Carolina, USA, 2003. – P. 1693–1696.

7. *Самигулина Г.А.* Интеллектуальная система прогнозирования асимптотической устойчивости в среднем квадратическом стохастической системы управления // Труды IX Международной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки». – М.: МГУ им. Ломоносова. – 2006. – Т. II. – <http://intsys.msu.ru/science/conference/publ2006.htm>

**Рецензент** – д.т.н., проф. Сыздыков Д.Ж. (Казахстан, Алматы, Казахский национальный технический университет им. Сатпаева).

**Статья рекомендована к публикации** Ученым советом Института проблем информатики и управления Министерства образования и науки Республики Казахстан (Протокол №10 от 14.11.2006г.).

*Поступила* 30.01.2007 г.

***Samigulina G.A. Intellectual expert system of prediction of the asymptotical stability of the stochastic control system***

The intellectual expert system of prediction of the asymptotical stability of the stochastic control system is designed on the basis of the unique information know-how with usage of the biological approach of the Artificial Immune Systems.

***Самигулина Г.А. Интеллектуальная экспертная система прогнозирования асимптотической устойчивости стохастической системы управления***

Разработана интеллектуальная экспертная система прогнозирования асимптотической устойчивости стохастической системы управления на основе уникальной информационной технологии с использованием биологического подхода искусственных иммунных систем.

***Самигуліна Г.А. Інтелектуальна експертна система прогнозування асимптотичної стійкості стохастичної системи керування***

Розроблено інтелектуальну експертну систему прогнозування асимптотичної стійкості стохастичної системи керування на основі унікальної інформаційної технології з використанням біологічного підходу штучних імунних систем.

UDC 681.5:65. 014.1

## THE INFORMATIVE LEVEL ENHANCEMENT METHOD FOR MANAGING OPERATOR

*Serdyuk S.N.*

Zaporizhzhya National Technical University

### Introduction

Information Controlled Man Machine Systems (ICMMS) utilize valuable information depending on how it is important for certain decision-making person (DMP) the proper decision to be done.

Information streams analysis in modern control systems [1] discloses paradox situation for many organizations, where Electronic Data Processing Systems as well as Intelligent Decision Support Systems (IDSS) are widely used. Considerable information volumes exist and are to be continuously created across those organizations having no clear structures, no acceptable consistency resulting in information seeking and utilizing problems. Such problems especially crucial for DMP to obtain and represent required information.

There is a method, suggested in [1] to build up IDSS basing on OLAP technology. A scientific novelty in the method is creation Data Frame (DF) representing definite information according to DMP functions, which requires intelligent support. There a common description model [2] is used to define Man Machine Systems (MMS). According to that model, the DMP functions to be derived during the organization management system analysis stage, there is a need of set of component-system KSS(N), component-element KES(N) and component-function KFS(N) structures to be used. In the method corresponding DFs are generated resulting in decrease of seeking time for information relevant to decision maker request.

The results to achieve are further enhancements of the method basing on proper formalization of DMP interoperation to System Analyst who is procedure generation designer. Keeping terminology used for MMS [2,3] the Top Management DMP role assigned to Managing Operator while System Analyst role to Researching Operator.

### 1. Managing Operator knowledge base model

Structural management of MMS N is a process, which transforms targets, task structures and plans using corresponding technologies. Knowledge necessary for Managing Operator to make his/her decision can be described as:

KBM (N) =< KBMT<sub>r</sub> (N); KBMT<sub>s</sub> (N); KBMPI (N); KBMTI (N) >,

where KBMTr (N) – the knowledge base (KB) for strategic management MMS (targets and its structures changes); KBMTs (N) – KB for operative management (structure changes, tasks and its structures changes); KBMPI (N) – KB for tactic management (task decision plan changes); KBMTl (N) – KB for technological management (task decision technology changes).

Each of above mentioned structural management KB fragments of MMS consists of KBMCX structure:

$$\text{KBMCX}(N) = \langle \text{NMX}; \text{KMX}; \text{P}(X; K; \Phi(t)) \rangle,$$

where  $X \in \{\text{Tr}, \text{Ts}, \text{Pl}, \text{Tl}\}$  – a base fragment name; NMX – a set of names of structure managing components (targets, tasks, plans or technologies); KMX – a set of MMS components participating in structural management components;  $\text{P}(X, K, \Phi(t))$  – the predicate: "Structural Component X managed by a help of a real ergo-technical systems component K according to function  $\Phi(t)$ ".

Functioning process realization management KB:

$$\text{KBC}(N) = \{\text{KBCC}(\text{Fn}_{ijl}) / i = 1 \div K_i; j = 1 \div K_j; l = 1 \div K_l\},$$

where  $\text{KBCC}(\text{Fn}_{ijl})$  – technological management structure KB fragments in other words who/what is to activate and supervise a realization process for l-th function Fn required for j-th task decision used to achieve i-th target.

The fragments structure as follows:

$$\text{KBCC}(\text{Fn}_{ijl}) = \langle \text{NCE}_{it}, \text{P}(E, K, \Phi(t)) \rangle,$$

where  $\text{NCE}_{it}$  – set of names of controlled elements participating in realization of function  $\text{Fn}_{ijl}$  by mean t-th;  $\text{P}(E, K, \Phi(t))$  the predicate: "Element MMS E controlled by a help of real component MMS K according to function  $\Phi(t)$ ".

As the result the formal representation structure of structural MMS KB as an entire KBO (N):

$$\text{KBO}(N) = \langle \text{KBTr}(N); \text{KBTs}(N); \text{KBPl}(N); \text{KBTc}(N), \text{KBMC}(N) \rangle,$$

where KBTr (N) – target KB; KBTs (N) – task KB; KBPl (N) – plan KB; KBTc (N) – technology KB; KBMC (N) – structural management KB by MMS functional process.

As it has been mentioned above, Researching Operator receives this knowledge at a stage of a system administrative activity analysis for an organization by filling in corresponding set of component structures. Basing of the knowledge Researching Operator develops DF generation rules to provide intelligent support for every Managing Operator. Therefore DFs actually are information products of Researching Operator activity workout and can be present as accounting and planning documents, multimedia audio and video information, etc. The given products at the same time are information models (IM) for Managing Operator.

Ability of actual data contained in a certain information product to correspond in meaning, to be brief and viewable, timeliness etc. relative to DMP's subjective information requirements is referred as IM relevance [2]. IM relevance is dialectically connected to informative level of an operator as if can be understood as property of a certain "information-operator" system. Such a property defines ability of that data to reflect on one hand and ability of an operator to perceive on the other hand an objective picture of certain object and its environment in the range as needed to make his/her proper control actions.

On the way towards his/her targets, Managing Operator should raise his/her knowledge level in order to improve quality of decisions he or her accepts. Since the information source for him is IM set generated by the Researching Operator communications between Managing Operator and Researching Operator is inevitable taking place to exactly specify and make consistent requirements to IM.

Let us build the model of interactive communication between Managing Operator and Researching Operator basing on some issues of D. Harrah's communication logical pragmatic model [3].

## 2. Logical pragmatic model to form relevant information

Communicative interaction of the operators is bi-directional, since any operator can play "receiver" or "transmitter" role for information to be sent.

Let us assume concept of language L used by operators in their communicative interaction. It is obvious, that dialogue between them occurs in a natural language limited to frameworks of activity they are working for. Semantic and syntactical analysis of their natural language sentences at an officially formal style of dialogues is described in [5]. Using that analysis a range of requirements to models of their formal description is determined and applied M1 and predicate M2 models of are developed [6].

Applied model DMP knowledge representation is:

$$M1 = \langle K_{nf}, K_{nf}^{fg} \rangle,$$

where  $K_{nf}$  – non formalized DMP knowledge given as natural language sentences;  $K_{nf}^{fg}$  – DMP knowledge given as a formal grammar syntax.

Predicate model DMP knowledge representation is:

$$M2 = \langle K_{nf}^{fg}, K_{nf}^P \rangle,$$

where  $K_{nf}^P$  – DMP knowledge given as knowledge representation language syntax of the first order predicates.

Therefore the second component of communicative interaction model is non contradictory operators' knowledge  $K_{nf}$  (or Managing Operator knowledge  $K_{nf}^P$ , as presented for IDSS KB) which they keeps in certain moment of time  $t$ . As soon as functions IDSS do not include intelligent support for Researching Operator, there is no need to enter his knowledge  $K_{nf}^P$  in KB. Let us define metric set QM, by means of which operators estimate received message (or IM received by his/her request out of data warehouse) in certain moment of time  $t$ . Nowadays their types and meanings are under development. Samples are given in [2, 3].

As far as "it is possible to express interest to certain topics by posting finite question set to sender" (according to D. Harrah [3]), let us define  $Q(V)$  as question set.

For formal operators' questions representation questions that can be raised by both operators model M3 was developed. As the result of answer reception to questions posted or receptions of the information from corresponding IM, there is operator knowledge expansion  $K_{nf}^P$ , in other words there is a change of their informative levels to the current problem situation.

Let us present model M3 as follows:  $M3 = \langle K_{nf}^P, K_{nf+}^P \rangle$ , where  $K_{nf+}^P$  – the expanded knowledge of the operators generated as a result of answers to posted questions.

While operators' interactive communication is taking place an interpretation is formed out of set of allowable interpretations  $Dop(K_{nf}^P)$ . We shall enter definition for  $Dop(K_{nf}^P)$ . For this purpose we would consider reflection  $C$ , which makes definite those variables in kind of statements  $\exists xP(a,x)$  of statements system  $K_{nf}^P$ .

To statements of such kind in Russian there are non-widespread and widespread narrative statements offered with pronominal words. In model M1 to statements of the first type there is to correspond the statement of a kind:

$$V = \text{sub}(w_{-s_1-s_2-\dots-s_n}) \text{Rel}, \quad (1)$$

where  $\text{sub}(w_{-s_1-s_2-\dots-s_n})$  – a subject of the statement;  $w_{-s_1-s_2-\dots-s_n}$  – a compound name of the subject;  $s_i (i = 1..n)$  – elements of a compound

name of the subject; w – a pronominal word such as "some", "a little", "anyone" in a compound name of the subject sub (or object ob) in the statements; Rel – the relation corresponding to a verb.

In model M2 to the statement (1) in case of use a pronominal word "some" or "a little" by operators corresponds the formula:

$$V = \exists x (S_1(x, s_1) \wedge \dots \wedge S_k(x, s_k) \wedge \dots \wedge S_n(x, s_n) \wedge R(x)),$$

where  $S_i(\text{sub}, s_i)$  ( $i=1\dots n$ ) – the double predicate describing connection sub with an element of compound name  $s_i$ ;  $R(\text{sub})$  – the single predicate corresponding to relation Rel;  $x$  – objective variable corresponding to sub or ob.

As a result of a concrete definition, at reception of answers, statements become:  $P(a, C(x))$  where  $a$  and  $C(x)$  are concrete entities of applied area. System of statements  $K_{nf}^P$  after operation of a concrete definition we shall designate  $C(K_{nf}^P)$ . Let us consider set of the elementary statements which are included in system of formulas  $C(K_{nf}^P)$ , having designated it like  $VE(C(K_{nf}^P))$ .

Let us enter reflection  $Z:VE(C(K_{nf}^P)) \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$ , specifying values "true" or "false" to each elementary statement included in the formulas of system  $C(K_{nf}^P)$ . We shall distribute reflection  $Z$  to set of composite statements allowable in models M1, consists of elementary ones connected with help of  $\wedge, \vee, \neg, \rightarrow, \oplus$  by rules:

$$Z(V1 \wedge V2) = Z(V1) \wedge Z(V2), \quad Z(V1 \vee V2) = Z(V1) \vee Z(V2),$$

$$Z(\neg V1) = \neg Z(V1),$$

$$Z(V1 \rightarrow V2) = Z(V1) \rightarrow Z(V2), \quad Z(V1 \oplus V2) = Z(V1) \oplus Z(V2).$$

Pair  $I = \langle C, Z \rangle$  we shall name interpretation. Such an allowable ( $I \in \text{Dop}(K_{nf}^P)$ ) exists for system of statements  $K_{nf}^P$ , in case if  $Z(V) = \text{true}$  for  $\forall V \in C(K_{nf}^P)$ .

The system of statements  $K_{nf}^P$  generates questions of the following types.

Type 1. Disjunctive statements generate questions  $Q(V)$ : "What from suggested statements  $V1, V2, \dots, Vn$  are true?"

Type 2. Statements with an excluding disjunction generate questions  $Q(V)$ : "What from suggested statements  $V1, V2, \dots, Vn$  is true and only the one?"

Type 3. Statements of kind  $V = \exists x P(a, x)$  generate questions  $Q(V)$ : "Find a meaning of  $C(x)$  using variable  $x$  such, that  $Z(P(a, C(x))) = \text{true}$ ".

As a result of answers to system of questions  $\{Q(V)\}$  and completing, thus, allowable interpretation  $I \in \text{Dop}(K_{nf}^P)$  operator knowledge  $K_{nf}^P$  is supplemented with new knowledge:

$$K_+ = \{V \equiv Z(V) \mid \langle C, Z \rangle \in \text{Dop}(K_{nf}^P), V \in VE(C(K_{nf}^P))\},$$

$$\text{where } V \equiv Z(V) = \begin{cases} V, & \text{if } Z(V) = \text{true}, \\ \neg V, & \text{if } Z(V) = \text{false}. \end{cases}$$

Then, the set of operator knowledge  $K_{nf+}^P$  after communicative interaction:  $K_{nf+}^P = K_{nf}^P \cup K_+$ .

Quality of the received information and its influence on Managing Operator's informative level can be defined using approaches [2, 3].

As a whole, the communicative interaction process of operators designated as OP is:  $OP = \langle L, K_{nf}^P, Q(V), K_+ \rangle$ .

### Conclusion

ICMMS Managing Operator's knowledge formalization is produced as necessary for acceptance of organizational – administrative decisions. The developed set of models M1-M3 is a basis for extraction process automation of knowledge which are necessary for Managing Operators' intelligent support at IDSS development cycle and formation relevant IM at an operation phase.

*Scientific novelty* of the challenge consists that on the basis D. Harrah's information logical pragmatic models, the Managing Operator's informative level enhancement method is developed, covering both predesign development cycles and an operation phase of IDSS as part of ICMMS. The formal description of operators' dialogue language has allowed to determine the types of the questions arising during operators' communicative interaction and to describe process of operators' knowledge expansion.

### References

1. Сердюк С.Н., Поздняков А.А. Анализ и синтез систем поддержки принятия решений // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2000. – №1. – С.106–111.
2. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: Исследование, проектирование, испытания: Справочник / А.Н.Адаменко, А.Т.Ашеров, И.Л.Бердников, Е.А.Лавров и др.; Под общ. ред. А.И.Губинского и В.Г.Евграфова. – М.: Машиностроение, 1993. – 528 с.

3. *Гришкин И.И.* Понятие информации. – М.: Наука, 1973. – 232 с.

4. *Войцешко Е.К.* Понятие как форма мышления. – М.: Наука, 1989. – 332 с.

5. *Сердюк С.Н.* Экспертные знания: семантико-синтаксический анализ естественно-языковых предложений // Тези доповідей IV науково-технічної конференції "Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці". – Львів: ДУ "Львівська політехніка", 1997. – С. 161.

6. *Сердюк С.М.* Моделі представлення експертних проблемних знань // Вісник ДУ "Львівська політехніка". Серія "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2000. – №387. – С.387–391.

**The reviewer** – Dr. Tech. Sc., Prof. Lavrov, Ye.A. (Sumy, Sumy national agrarian university).

**The paper is recommended for publication** by the software department of the Zaporizhzhya National Technical University (Protocol № 5 from 10.01.2007).

*Received by 30.01.2007*

*Serdyuk S.N.* **The informative level enhancement method for managing operator**

The actual problem of a decision-making person to system analyst interaction process formalization is brought to a definite solution. The set of the models suggested is used to create a basis for knowledge extraction process automation for top managers to get intelligent support at IDSS development cycle and relevant IM composition at an operation phase.

*Serdyuk S.N.* **Метод повышения информированности оператора-управленца**

Решена актуальная задача формализации процесса интерактивного взаимодействия ЛПР с системным аналитиком организации. Предложен комплекс моделей, создающих основу для автоматизации процесса приобретения знаний, необходимых для интеллектуальной поддержки операторов-управленцев на этапе разработки СИППР и формирования релевантных ИМ, на этапе эксплуатации.

*Serdyuk S.M.* **Метод підвищення інформованості оператора-керівника**

Вирішено актуальне завдання формалізації процесу інтерактивної взаємодії людини що приймає рішення із системним аналитиком організації. Запропоновано комплекс моделей, що створюють основу для автоматизації процесу придбання знань, необхідних для інтелектуальної підтримки операторів-керівників на етапі розробки СИППР і формування релевантних ИМ, на етапі експлуатації.



**Оптимізація та її застосування**  
**Optimization and its applications**  
**Оптимизация и ее приложения**

УДК 518.5:519.2

**ЗАДАЧА О ПАРИТЕТЕ ПРИЗОВЫХ И ШТРАФНЫХ  
МАРШРУТОВ В ОДНОШАГОВЫХ СХЕМАХ БЛУЖДАНИЙ**

*Астионенко И.А., Козуб Н.А., Хомченко А.Н.*

Херсонский национальный технический университет

**Введение**

Проблема создания одношаговых схем случайных блужданий является весьма актуальной для несеточных методов Монте-Карло. Замена апостериорных переходных вероятностей априорными обеспечивает ощутимое ускорение вычислений. Эффективное использование монте-карловских оценок в граничных задачах зависит от удачного выбора схемы маршрутов из контрольной точки в поглощающие граничные узлы и правильного вычисления переходных вероятностей, ассоциированных с этими маршрутами. Интересным объектом для моделирования одношаговых случайных блужданий являются серендиповы конечные элементы высших порядков, на которых возникают оригинальные малоизученные схемы со штрафными маршрутами.

**1. Анализ предшествующих публикаций, постановка задачи**

Одна из первых несеточных схем случайных блужданий была предложена в 1949 г. Брауном и математически обоснована в 1956 г. Мюллером [1]. Это была схема «блужданий по окружностям» [2]. В 1982 г. была разработана несеточная схема «блужданий по симплексам» [3,4], которая легла в основу метода барицентрического усреднения. Дальнейшее развитие вероятностной концепции метода конечных элементов (КЭ) привело к появлению схем случайных блужданий со штрафными маршрутами [5–7], которые ассоциируются с элементами высших порядков. На серендиповых КЭ штраф можно интерпретировать как отрицательную узловую нагрузку в спектре распределения равномерной массовой силы [8].

Основная задача состоит в исследовании возможности калибровки (настройки) модели бикубической серендиповой интерполяции путем взвешенного усреднения моделей – прототипов.

## 2. Модели бикубической интерполяции

Штрафные маршруты ассоциируются с отрицательными переходными вероятностями в схеме случайных блужданий. Обычно они возникают на КЭ высших порядков. Однако задача о паритете штрафных и призовых маршрутов не всегда поддается решению, как и другие задачи, связанные с коррекцией базиса. Для этого необходимо иметь, по крайней мере, две модели одного порядка. Такие модели были построены для серендиповых КЭ, начиная с третьего порядка [9].

Здесь рассматривается элемент бикубической интерполяции (рис.1), имеющий 12 равномерно расположенных узлов на границе. На рис.1 заштрихованы области штрафных стартов для двух моделей. Паритетом мы называем равенство между всеми штрафными и призовыми маршрутами, оканчивающимися в некотором граничном узле  $i$ . В данном случае в центре внимания угловой узел  $i=1$ .

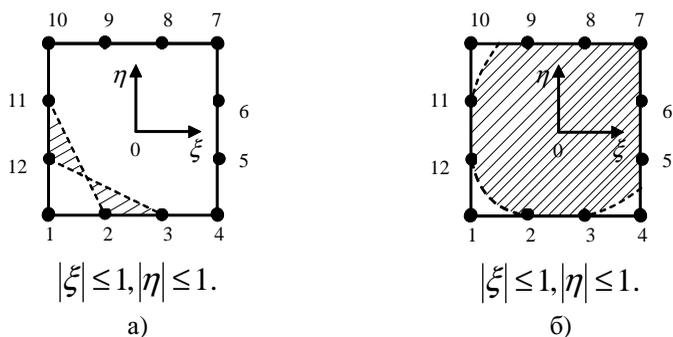


Рисунок 1 – Области штрафных стартов для частиц, финиширующих в узле 1: а) модель ГП; б) модель КПЦ.

Мы сопоставляем две модели бикубической интерполяции: с гиперболическим параболоидом (ГП) и косым параболическим цилиндром (КПЦ). Это означает, что в состав поверхности  $N_1(\xi, \eta)$  в качестве определяющего элемента в первом случае входит ГП, во втором – КПЦ. На рис.1 а, б показаны линии нулевого уровня  $N_1(\xi, \eta)$ .

Базис ГП состоит из:

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{64} (1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(5 - 3\xi_i \xi - 6\eta_i \eta)(5 - 6\xi_i \xi - 3\eta_i \eta),$$

$$i = 1, 4, 7, 10, \quad \xi_i, \eta_i = \pm 1;$$

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{9}{128} (1 - \xi^2)(1 + \eta_i \eta)(36\xi_i \xi + 5\eta_i \eta - 1),$$

$$i = 2, 3, 8, 9, \quad \eta_i = \pm 1, \quad \xi_i = \pm \frac{1}{3};$$

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{9}{128} (1 - \eta^2)(1 + \xi_i \xi)(5\xi_i \xi + 36\eta_i \eta - 1),$$

$$i = 5, 6, 11, 12, \quad \xi_i = \pm 1, \quad \eta_i = \pm \frac{1}{3}.$$

Базис КПЦ состоит из:

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{1}{32} (1 + \xi_i \xi)(1 + \eta_i \eta)(9(-\xi_i \xi + \eta_i \eta)^2 + 18(\xi_i \xi + \eta_i \eta) - 28),$$

$$i = 1, 4, 7, 10, \quad \xi_i, \eta_i = \pm 1;$$

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{9}{32} (1 - \xi^2)(1 + \eta_i \eta)(9\xi_i \xi - \eta_i \eta + 2),$$

$$i = 2, 3, 8, 9, \quad \eta_i = \pm 1, \quad \xi_i = \pm \frac{1}{3};$$

$$N_i(\xi, \eta) = \frac{9}{32} (1 - \eta^2)(1 + \xi_i \xi)(-\xi_i \xi + 9\eta_i \eta + 2),$$

$$i = 5, 6, 11, 12, \quad \xi_i = \pm 1, \quad \eta_i = \pm \frac{1}{3}.$$

По рис.1 можно предположить, что в модели ГП преобладают призовые маршруты, в модели КПЦ – штрафные. Приоритетом мы называем равенство между всеми штрафными и призовыми маршрутами, оканчивающимися в граничном узле  $i=1$ .

Для решения задачи о паритете мы используем процедуру взвешенного усреднения двух моделей:

$$\overline{N}_1(\xi, \eta) = \alpha N_1^{(A)}(\xi, \eta) + (1 - \alpha) N_1^{(B)}(\xi, \eta).$$

Теперь задача о паритете сводится к определению весового параметра  $\alpha$ , при котором многочлен  $\overline{N}_1(\xi, \eta)$  имеет нулевое математическое ожидание на квадратном носителе ( $|\xi| \leq 1, |\eta| \leq 1$ ), т.е.

$$\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 p \overline{N}_1(\xi, \eta) d\xi d\eta = 0, \quad \text{где } p=0,25. \quad (1)$$

Таким образом, паритет наступает при  $\alpha=2/3$ . Это означает, что модели ГП и КПЦ необходимо «смешать» в отношении 2:1. Точно так же из (1) можно установить, что при «смешивании» ГП и КПЦ в отношении 22:5 средние переходные вероятности для всех узлов одинаковы и равны 1/12.

Решение задачи оптимизации базиса стало возможным благодаря наличию альтернатив, которые лучше всего находить прямым геометрическим моделированием [10]. При этом особый интерес представляют модели, «скрывающие» тринадцатый параметр  $\alpha_{13}\xi^2\eta^2$  на 12-узловом КЭ. Изучение роли скрытых параметров на серендиповых моделях является самостоятельной задачей, выходящей за рамки данной статьи. Сейчас, по крайней мере, ясно, что наличие тринадцатого параметра способно устранить в спектре поузлового распределения противоестественный «негативизм», о котором писал О.Зенкевич [8].

### Заключение

В работе рассмотрена оригинальная задача коррекции спектра узловых нагрузок серендиповых КЭ третьего порядка.

*Научная новизна* работы заключается в создании альтернативных моделей бикубической интерполяции, которая позволяет решать актуальную задачу оптимизации базиса.

*Практическая ценность* работы состоит в разработке алгоритма управления процессом одношаговых блужданий по конечному элементу.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР «Разработка информационной технологии геометрического моделирования скалярных полей» (№ гос. регистрации 0105U002749).

### Перечень ссылок

1. *Muller M.E.* Some continuous Monte Carlo methods for the Dirichlet problem // *Annals of Mathematical Statistics.* – 1956. – Vol. 27, №3. – P.19–32.
2. *Ермаков С.М., Михайлов Г.А.* Статистическое моделирование. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
3. *Хомченко А.Н.* Метод конечных элементов: стохастический подход/ Ивано-Франк. ин-т нефти и газа. – Ивано-Франковск, 1982. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 15.10.82, №5167.
4. *Хомченко А.Н.* О базисных функциях МКЭ для уравнений в частных производных // III Республиканский симпозиум по дифференциальным и интегральным уравнениям: Тез. докл. – Одесса, 1982. – С. 257–258.
5. *Хомченко А.Н.* Оптимизация тепловых нагрузок в конечных элементах высших порядков // *Инженерно-физический журнал.* – 1987. – Т.52, №2. – С. 336–337.
6. *Хомченко А.Н.* Случайные блуждания и конечно-элементные аппроксимации температурных полей // *Математические модели, методы реше-*

ния и оптимального проектирования гибких пластин и оболочек: межвуз. сб. науч. тр. – Саратов: СГУ, 1988. – С. 80–82.

7. Хомченко А.Н. Вероятностные схемы в дискретном анализе температурных полей // Инженерно-физический журнал. 1988. – Т.55, №2. – С.323–324.

8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

9. Камаева Л.И., Хомченко А.Н. Вычислительные эксперименты с альтернативными базисами серендиповых аппроксимаций // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюзн. межвуз. сб. – Горький: Горьк. гос. ун-т, 1988. – С. 103–105.

10. Козуб Н.А., Хомченко А.Н., Шерстюк В.Г. Геометрическое моделирование бикубических поверхностей // Системні технології. Регіон. міжвуз. зб. наук. праць. – Вип.6(47). – Дніпропетровськ, 2006. – С. 141–148.

**Рецензент** – д.ф.-м. н., проф. Блинов Е.И. (Херсон, ХМИ).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой прикладной математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета (Протокол № 12 от 20.01.2007 г.).

*Поступила 26.01.2007 г. После доработки 29.01.2007 г.*

***Astionenko I.A., Kozub N.A., Khomchenko A.N. Task about parity of prize-winning and penal routes in single-step schemes of wanderings***

The problem of creation of single-step schemes of casual wanderings is actual for non-net methods of Monte-Carlo. Interesting object for modeling single-step casual wanderings are serendipian final elements of the higher orders on which arise original poorly studied schemes with penal routes.

***Астионенко И.А., Козуб Н.А., Хомченко А.Н. Задача о паритете призовых и штрафных маршрутов в одношаговых схемах блужданий***

Проблема создания одношаговых схем случайных блужданий является актуальной для несеточных методов Монте-Карло. Интересным объектом для моделирования одношаговых случайных блужданий являются серендиповы конечные элементы высших порядков, на которых возникают оригинальные малоизученные схемы со штрафными маршрутами.

***Astionenko I.O., Kozub N.O., Homchenko A.N. Задача про паритет призових та штрафних маршрутів у однокрокових схемах блукань***

Проблема створення однокрокових схем випадкових блукань є актуальною для несіткових методів Монте-Карло. Цікавим об'єктом для моделювання однокрокових випадкових блукань є серендипові скінченні елементи вищих порядків, на котрих виникають оригінальні маловідомі схеми з штрафними маршрутами.

УДК 519.85

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ НА МНОЖЕСТВЕ КОМПОЗИЦИЙ ПЕРЕСТАНОВОК

*Гребенник И.В., Баранов А.В.*

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

### Введение

Проблема генерации и исследования свойств различных комбинаторных множеств является актуальной при математическом моделировании и решении задач во многих областях, в том числе в геометрическом проектировании, принятии решений и других [1–3].

В качестве конструктивных средств описания классов комбинаторных множеств могут быть использованы композиционные образы комбинаторных множеств, предложенные в работе [4]. Введение и описание новых комбинаторных множеств предполагает исследование их комбинаторных свойств, среди которых – экстремальные свойства различных классов функций, заданных на комбинаторных множествах.

*Целью работы* является решение задачи оптимизации линейной функции, заданной на одном новом классе композиционных образов комбинаторных множеств – композиции перестановок.

### 1. Определение композиции перестановок

В статье [5] введено новое комбинаторное множество  $PW_N$  – композиция перестановок, которая представляет собой композиционный образ комбинаторных множеств  $P_{nk}, P_{m_1k_1}, P_{m_2k_2}, \dots, P_{m_nk_n}$ , порожденный множествами  $\{a_1^1, a_2^1, \dots, a_{m_1}^1\}, \{a_1^2, a_2^2, \dots, a_{m_2}^2\}, \dots, \{a_1^n, a_2^n, \dots, a_{m_n}^n\}$ . Здесь  $P_{nk}$  – множество перестановок из  $n$  элементов,  $k$  из которых различны,  $a_i^j \in R^1, i \in J_{m_i}, j \in J_n, J_s = \{1, 2, \dots, s\}$ . Мощность множества  $PW_N$  составляет  $CardPW_N = CardP_{nk} \cdot CardP_{m_1k_1} \cdot \dots \cdot CardP_{m_nk_n}$ .

Множество  $PW_N$  состоит из элементов вида  $w = (\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n)$ , где  $\bar{w}_j = (a_{s_1}^j, a_{s_2}^j, \dots, a_{s_{m_j}}^j)$ ,  $j \in J_n$ . В наборе  $\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n$   $k$  элементов являются различными, среди элементов  $a_{s_1}^j, a_{s_2}^j, \dots, a_{s_{m_j}}^j$  ровно  $k_j$  различных.

Последовательность индексов  $(s_1, s_2, \dots, s_{m_j}) \in L_{m_j}$ , где  $L_k$  – множество перестановок элементов множества  $J_k$ , а  $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in L_n$ .

На основе способа погружения комбинаторных множеств в евклидово пространство [1] в работе [5] выполнено отображение множества  $PW_N$  в пространство  $R^N$ . Образ множества  $PW_N$  в пространстве  $R^N$  обозначим  $EW_{n, m_1, m_2, \dots, m_n}$  или для краткости  $EW_N$ .  $EW_N = f(PW_N)$ ,  $EW_N \subset R^N$ . Элементами множества  $EW_N$  являются векторы  $x \in R^N$  вида:  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N) = (e_{i_1}, e_{i_2}, \dots, e_{i_n})$ , где  $(i_1, i_2, \dots, i_n) \in L_n$ ,  $e_i = (a_{s_1}^j, a_{s_2}^j, \dots, a_{s_{m_i}}^j)$ ,  $(s_1, s_2, \dots, s_{m_i}) \in L_{m_i}$ ,  $i \in J_n$ .

В результате погружения множество  $EW_N = f(PW_N)$  представляет собой множество векторов в  $R^N$ , координаты которых принимают значения всевозможных перестановок векторов  $e_i = (e_1^i, e_2^i, \dots, e_m^i) = (a_{s_1}^i, a_{s_2}^i, \dots, a_{s_{m_i}}^i)$ , где  $(a_{s_1}^i, a_{s_2}^i, \dots, a_{s_{m_i}}^i) \in E_{m_i, k_i}$ , а множество перестановок  $E_{m_i, k_i} = f(P_{m_i, k_i})$  порождено элементами  $a_1^i \leq a_2^i \leq \dots \leq a_{s_{m_i}}^i$  [1].

В дальнейших построениях будем считать, что множество  $PW_N$  является композиционным образом комбинаторных множеств  $P_{nk}, P_{m_1 k_1}, P_{m_2 k_2}, \dots, P_{m_n k_n}$ , таких что  $m_1 = m_2 = \dots = m_n = m$ .

## 2. Постановка и решение задачи оптимизации

Рассмотрим задачу оптимизации

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^N \epsilon_i x_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $x = (x_1, x_2, \dots, x_N) \in EW_N \subset R^N$ ,  $c = (c_1, c_2, \dots, c_N) \in R^N$ .

Зададим на множестве векторов  $e_i$ ,  $i \in J_n$ , следующее отношение порядка:

$$\begin{aligned} e_{i_j} \prec_c e_{i_k} &\Leftrightarrow (e_1^{i_j}, e_2^{i_j}, \dots, e_m^{i_j}) \prec_c (e_1^{i_k}, e_2^{i_k}, \dots, e_m^{i_k}) \Leftrightarrow ((-\epsilon_{(j-1)m+s_r} e_{p_r}^{i_j} + \\ &+ \sum_{t=1}^m \epsilon_{(k-1)m+r_t} e_{q_t}^{i_k} - \sum_{t=1}^m \epsilon_{(j-1)m+\alpha_t} e_{\gamma_t}^{i_k} - \sum_{t=1}^m \epsilon_{(k-1)m+\beta_t} e_{\delta_t}^{i_j}) \leq 0), \quad (2) \end{aligned}$$

где  $i \in J_n$ , а последовательности индексов удовлетворяют условиям:

$$\begin{aligned}
\{s_1, s_2, \dots, s_m\} &: c_{(j-1)m+s_1} \geq c_{(j-1)m+s_2} \geq \dots \geq c_{(j-1)m+s_m}; \\
\{p_1, p_2, \dots, p_m\} &: e_{p_1}^{i_j} \leq e_{p_2}^{i_j} \leq \dots \leq e_{p_m}^{i_j}; \{q_1, q_2, \dots, q_m\} : e_{q_1}^{i_k} \leq e_{q_2}^{i_k} \leq \dots \leq e_{q_m}^{i_k}; \\
\{r_1, r_2, \dots, r_m\} &: c_{(k-1)m+r_1} \geq c_{(k-1)m+r_2} \geq \dots \geq c_{(k-1)m+r_m}; \\
\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\} &: c_{(j-1)m+\alpha_1} \geq c_{(j-1)m+\alpha_2} \geq \dots \geq c_{(j-1)m+\alpha_m}; \\
\{\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_m\} &: e_{\gamma_1}^{i_j} \leq e_{\gamma_2}^{i_j} \leq \dots \leq e_{\gamma_m}^{i_j}; \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m\} : e_{\delta_1}^{i_k} \leq e_{\delta_2}^{i_k} \leq \dots \leq e_{\delta_m}^{i_k}; \\
\{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m\} &: c_{(k-1)m+\beta_1} \geq c_{(k-1)m+\beta_2} \geq \dots \geq c_{(k-1)m+\beta_m}.
\end{aligned}$$

Смысл введенного отношения порядка состоит в том, что два вектора  $e_{i_j}$  и  $e_{i_k}$  находятся в отношении  $\prec_c$ , если при транспозиции значений координат  $x_{m(j-1)+1}, x_{m(j-1)+2}, \dots, x_{m \cdot j}$  и  $x_{m(k-1)+1}, x_{m(k-1)+2}, \dots, x_{m \cdot k}$  точки  $x \in EW_N$ , принимающих соответственно переупорядоченные значения координат векторов  $e_{i_j}$  и  $e_{i_k}$ , значение функции  $\varphi(x)$  вида (1) возрастает. Если обозначить значение функции  $\varphi(x)$  в точке  $x \in EW_N$  до транспозиции и переупорядочения  $\varphi_{i_j}$ , а после этого  $\varphi_{i_k}$ , то  $e_{i_j} \prec_c e_{i_k}$ , если  $\varphi_{i_j} \prec_c \varphi_{i_k}$ .

Отметим некоторые свойства введенного отношения.

1. Из структуры отношения (2) следует, что любые два вектора  $e_{i_j}$  и  $e_{i_k}$  сравнимы между собой.

2. Отношение  $\prec_c$  рефлексивно, так как

$$\frac{m}{t=1} e_{(j-1)m+s_t} e_{p_t}^{i_j} + \frac{m}{t=1} e_{(j-1)m+r_t} e_{q_t}^{i_j} - \frac{m}{t=1} e_{(j-1)m+\alpha_t} e_{\gamma_t}^{i_j} - \frac{m}{t=1} e_{(j-1)m+\beta_t} e_{\delta_t}^{i_j} = 0.$$

3. Отношение  $\prec_c$  антисимметрично, поскольку

$$\begin{aligned}
(e_1^{i_j}, e_2^{i_j}, \dots, e_m^{i_j}) \prec_c (e_1^{i_k}, e_2^{i_k}, \dots, e_m^{i_k}) &\& (e_1^{i_k}, e_2^{i_k}, \dots, e_m^{i_k}) \prec_c (e_1^{i_j}, e_2^{i_j}, \dots, e_m^{i_j}) \Leftrightarrow \\
&\Leftrightarrow (e_1^{i_j}, e_2^{i_j}, \dots, e_m^{i_j}) =_c (e_1^{i_k}, e_2^{i_k}, \dots, e_m^{i_k}).
\end{aligned}$$

4. Отношение  $\prec_c$  транзитивно, так как из соотношений  $e_{i_j} \prec_c e_{i_k}$ ,  $e_{i_k} \prec_c e_{i_s}$  следует  $e_{i_j} \prec_c e_{i_s}$ . Это справедливо, так как соотноше-

ния  $e_{i_j} \prec_c e_{i_k}$ ,  $e_{i_k} \prec_c e_{i_s}$  означают выполнение условий  $\varphi_{i_j} \prec_c \varphi_{i_k}$ ,  $\varphi_{i_k} \prec_c \varphi_{i_s}$ , из которых следует  $\varphi_{i_j} \prec_c \varphi_{i_s}$ , а значит  $e_{i_j} \prec_c e_{i_s}$ .

Поскольку для введенного отношения выполняются свойства рефлексивности, антисимметричности, транзитивности и любые два элемента множества  $EW_N$  сравнимы по отношению  $\prec_c$ , то такое отношение является отношением линейного порядка.

Упорядочим векторы  $e_i$ ,  $i \in J_n$  в соответствии с отношением (2). Пусть последовательность  $\{i_1, i_2, \dots, i_m\}$  такова, что

$$e_{i_1} \prec_c e_{i_2} \prec_c \dots \prec_c e_{i_m}, \quad (3)$$

где  $e_{i_j} = (e_1^j, e_2^j, \dots, e_m^j)$ ,  $i_j \in J_n$ ,  $j \in J_n$ . Справедливо утверждение.

*Теорема.* Минимум линейной функции  $\varphi(x)$  задачи (1) на множестве  $EW_N$  достигается в точке

$$x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) \in EW_N, \quad (4)$$

где  $x_{(j-1)m+r}^* = e_{s_j}^j$ ,  $t \in J_m$ ,  $j \in J_n$ ,  $\{r_1, r_2, \dots, r_m\}$  и  $\{s_1, s_2, \dots, s_m\}$  таковы, что  $c_{(j-1)m+s_1} \geq c_{(j-1)m+s_2} \geq \dots \geq c_{(j-1)m+s_m}$  и  $e_{r_1}^{i_j} \leq e_{r_2}^{i_j} \leq \dots \leq e_{r_m}^{i_j}$ , а последовательность  $\{i_1, i_2, \dots, i_m\}$  удовлетворяет (3).

*Доказательство.* Предположим противное. Пусть минимум  $\varphi(x)$  достигается в точке  $y \in EW_N$ , отличной от  $x^*$ . Значит можно указать такое значение  $p = s \cdot m + \alpha$ ,  $\alpha \in J_m$ ,  $s \in J_{n-2}$ , что  $x_j^* = y_j$ ,  $j \in J_{p-1}$ ,  $x_p^* \neq y_p$ . Тогда в соответствии с комбинаторной структурой множества  $EW_N$  существует такое  $q = t \cdot m + \beta$ ,  $\beta \in J_m$ ,  $t \in J_{n-1}$ ,  $t > s$ , что  $y_j = x_{k_i}^*$ ,  $i \in \{s \cdot m + 1, s \cdot m + 2, \dots, (s+1)m\}$ , а  $\{k_1, k_2, \dots, k_m\}$  представляет собой перестановку индексов  $\{t \cdot m + 1, t \cdot m + 2, \dots, (t+1)m\}$ . В векторе  $y$  выполним транспозицию координат, принимающих значения векторов  $e_s$  и  $e_t$ , при этом переупорядочим значения координат векторов  $e_s$  и  $e_t$ , так, чтобы для последовательностей индексов выполнялись условия:

$$\{s_1, s_2, \dots, s_m\} : c_{(t-1)m+s_1} \geq c_{(t-1)m+s_2} \geq \dots \geq c_{(t-1)m+s_m},$$

$$\{p_1, p_2, \dots, p_m\} : e_{p_1}^s \leq e_{p_2}^s \leq \dots \leq e_{p_m}^s ; \{q_1, q_2, \dots, q_m\} : e_{q_1}^t \leq e_{q_2}^t \leq \dots \leq e_{q_m}^t,$$

$$\{r_1, r_2, \dots, r_m\} : c_{(s-1)m+r_1} \geq c_{(s-1)m+r_2} \geq \dots \geq c_{(s-1)m+r_m}.$$

Полученный вектор обозначим  $\bar{y}$ . Очевидно, что  $\bar{y} \in EW_N$ .

Рассмотрим разность:

$$\begin{aligned} \varphi(\bar{y}) - \varphi(y) &= \sum_{t=1}^m \epsilon_{p-i+t} y_{q-i+t} + \sum_{t=1}^m \epsilon_{q-i+t} y_{p-i+t} - \sum_{t=1}^m \epsilon_{p-i+t} y_{p-i+t} - \\ &- \sum_{t=1}^m \epsilon_{q-i+t} y_{q-i+t} = \sum_{t=1}^m (c_{p-i+t} - c_{q-i+t})(y_{q-i+t} - y_{p-i+t}) = \\ &= \sum_{t=1}^m (c_{p-i+t} - c_{q-i+t})(x_{p-i+t}^* - y_{p-i+t}). \end{aligned}$$

Согласно (3), (4)  $x_{p-i+k_1}^* = e_{d_1}^{i_s}$ ,  $x_{p-i+k_2}^* = e_{d_2}^{i_s}$ , ...,  $x_{p-i+k_m}^* = e_{d_m}^{i_s}$ ,

$$y_{p-i+k_1} = e_{b_1}^{i_v}, \quad y_{p-i+k_2} = e_{b_2}^{i_v}, \quad \dots, \quad y_{p-i+k_m} = e_{b_m}^{i_v}, \quad \text{где}$$

$$c_{p-i+k_1} \geq c_{p-i+k_2} \geq \dots \geq c_{p-i+k_m}, \quad e_{d_1}^{i_s} \leq e_{d_2}^{i_s} \leq \dots \leq e_{d_m}^{i_s}, \quad e_{b_1}^{i_v} \leq e_{b_2}^{i_v} \leq \dots \leq e_{b_m}^{i_v}.$$

При этом,  $i_v > i_s$ ,  $i_v, i_s \in J_n$ ,  $v, s \in J_n$  Тогда

$$\varphi(\bar{y}) - \varphi(y) = \sum_{t=1}^m (c_{p-i+t} - c_{q-i+t})(e_{d_t}^{i_s} - e_{b_t}^{i_v}).$$

Согласно (3), (4):  $e_{i_v} < e_{i_s}$ , поэтому  $\varphi(\bar{y}) - \varphi(y) \leq 0$ . Это противоречит предположению о достижении в точке  $y \in EW_N$  минимума функции  $\varphi(x)$  задачи (1) и приводит к справедливости утверждения теоремы.

### Заключение

Таким образом, в работе решена задача оптимизации линейной функции на новом классе комбинаторных множеств – композиции перестановок. Результаты решения могут быть использованы при математическом моделировании комбинаторных оптимизационных задач геометрического проектирования и решении соответствующих задач комбинаторной оптимизации. На основании доказанной теоремы можно сформулировать оценки и достаточные условия минимума выпуклых функций [6] на композиции перестановок.

### Перечень ссылок

1. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. – К.: Наук. думка, 1986. – 268 с.

2. *Петровский А.Б.* Многокритериальное принятие решений по противоречивым данным: подход теории мультимножеств // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2004. – №2. – С. 56–66.

3. *Тимофеева Н.К.* Об особенностях формирования и упорядочения выборок // Кибернетика и системный анализ. – 2004. – № 3. – С. 179 – 187.

4. *Стоян Ю.Г., Гребенник И.В.* Композиционные образы комбинаторных множеств и некоторые их свойства // Проблемы машиностроения. – 2005. – Т.8. – № 3. – С. 56–62.

5. *Гребенник И.В.* Классы композиционных образов комбинаторных множеств в математических моделях задач геометрического проектирования // Радиоэлектроника и информатика. – 2005.– № 3.– С. 69 – 73.

6. *Стоян Ю.Г., Ємець О.О.* Теорія і методи евклідової комбінаторної оптимізації. – К.: ІСДО, 1993. – 188 с.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Романова Т.Е.(Харьков, ИПМаш НАНУ).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники (протокол № 10 от 26.01.2007 г.).

*Поступила* 30.01.2007 г.

***Grebennik I.V., Baranov A.V. Optimization of linear functions on permutations composition set***

A new combinatorial set – permutations composition is proposed. Optimization problem of linear function on the permutations composition based on linear ordering relationship is solved.

***Гребенник И.В., Баранов А.В. Оптимизация линейных функций на множестве композиций перестановок***

Вводится новое комбинаторное множество – композиция перестановок. Решается задача оптимизации линейной функции на композиции перестановок на основе введенного отношения линейного порядка.

***Гребенник І.В., Баранов А.В. Оптимізація лінійних функцій на множині композицій перестановок***

Вводиться нова комбінаторна множина – композиція перестановок. Розв'язується задача оптимізації лінійної функції на композиції перестановок на основі введенного відношення лінійного порядку.

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ГЛОБАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННЫХ ИММУННЫХ СИСТЕМ**

*Кораблев Н.М., Овчаренко И.В.*

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

### **Введение**

Сложные системы характеризуются большим числом входов-выходов и элементов, связи между которыми имеют разнотипный и нелинейный характер. Функционирование систем происходит в условиях неопределенности, которую вносит человеческий фактор. В этом случае, как правило, получение закона распределения параметров, воздействующих на систему, становится трудной, часто неразрешимой за ограниченное время задачей. Традиционные средства (вероятностный подход на основе аппарата математической статистики, имитационное моделирование и др.) не позволяют строить модели таких систем в условиях ограниченности временных, материальных и трудовых ресурсов. Спектр таких задач постоянно расширяется: управление производственными системами, распознавание образов, классификация, идентификация, оптимизация и др. В этой связи значительный научный и практический интерес представляет использование методов интеллектуальной обработки информации, к которым относятся искусственные нейронные сети, модели на основе нечеткой логики, эволюционное программирование, искусственные иммунные системы (ИИС).

Если использование искусственных нейронных сетей, эволюционных вычислений и нечеткой логики для решения различных практических задач достаточно хорошо проработано, то искусственные иммунные системы – это новая парадигма мягких вычислений, которая может интегрироваться с другими методиками.

В данной работе рассматривается применение ИИС для решения задач восстановления и поиска глобальных экстремумов нелинейных мультимодальных функций.

### **1. Модели искусственных иммунных систем**

Естественная иммунная система человека может рассматриваться как сложная сетевая структура, которая в состоянии реагировать на практически неограниченное множество внешних воздействий, таких как вирусы и бактерии. Следовательно, это параллельная распределен-

ная адаптивная система, которая имеет огромный потенциал для многих интеллектуальных вычислительных приложений [1].

Иммунная система представляет вычислительный интерес благодаря тому, что ей присущи следующие свойства: распознавание, выделение признаков, разнообразие, обучение, память, распределенное обнаружение, саморегулирование, метадинамика, сетевая организация. ИИС используют вычислительные модели обработки информации в иммунологических взаимодействиях с практическими применениями для решения многих проблем, таких как распознавание образов, поиск данных, компьютерная безопасность, обнаружение ошибок, классификация, оптимизация и др. [2]

Основными стандартными блоками ИИС являются антитела, образование которых основывается на теории клонального отбора при распознавании антигенов, являющихся целью. Если антитела распознают антиген, они стимулируются, после чего клонируются и синтезируют новые антитела (осуществляется клональный отбор).

Важной особенностью иммунной системы является то, что она динамически меняется и иммунный ответ базируется не только на взаимодействии антител и антигенов, но и на взаимодействии антител с другими антителами. При этом обеспечивается как эффект стимуляции антител, так и эффект их супрессии (сжатия), т.е. происходит производство и связывание антител, что имеет существенное значение при проектировании ИИС.

В целом ИИС могут быть описаны как своего рода смесь генетических алгоритмов и нейронных сетей. Преимущества ИИС перед генетическими алгоритмами состоит в том, что в ИИС используются эффекты сети, а преимущества перед нейронными сетями – популяция решений, эволюционный отбор и мутация.

При решении практических задач на основе использования ИИС необходимо решать вопросы выбора подходящего кодирования антител и антигенов, а также выбор соответствующих функций близости/различия (функций аффинности).

Антитела и антигены кодируются одинаково. Для большинства задач самым очевидным представлением является символьная строка чисел или характеристик фиксированной длины, где длина равна числу переменных, а величина – действительное значение самой переменной (binary или real). Но используются и другие, более сложные способы кодирования [3].

В зависимости от принятого способа представления антител и антигенов используются те или иные критерии аффинности. Аффинность – это скалярная величина оценки, показывающая близость результата к оптимальному значению и позволяющая осуществлять отбор антител для клонирования или супрессии [4,5]. Чаще всего в качестве критерия аффинности используется расстояние Хэмминга или Евклидово расстояние. В зависимости от того, ре-

пается задача максимизации или минимизации критерия аффинности, лучшим по популяции считается антитело с самым высоким или низким значением аффинности соответственно, которое может клонироваться и видоизменяться (мутировать). Антитела с плохой аффинностью, в соответствии с установленным пороговым значением, могут быть удалены из сети. Тем самым реализуется процедура адаптации, которая управляет динамикой системы.

Мутация, используемая в ИИС, подобна мутации, используемой в генетических алгоритмах. Однако видоизменение данных имеет смысл не для всех задач, где не очевидно, как видоизменить данные таким образом, чтобы вновь полученные искусственные объекты представляли более вероятные данные.

## **2. Восстановление мультимодальных нелинейных функций**

Для решения задачи восстановления мультимодальных нелинейных функций двух переменных в качестве популяции антигенов ИИС (обучающей выборки) используется набор данных, которые нужно распознать. Антитела представлены в виде строки фиксированной длины  $S = \langle s_1, s_2, s_3 \rangle$ , состоящей из двоичных символов и представляющей вещественные значения вектора координат антитела в трехмерном пространстве. Исходный вектор координат генерируется случайным образом путем заполнения разрядов в бинарном коде. Для декодирования значений координат используется код Грея. Следовательно, ИИС представляется сетью в виде графа, состоящего из узлов (антител) и взвешенных ребер, которые определяют степень аффинности между соответствующими узлами.

В процессе восстановления мультимодальной нелинейной функции необходимо находить как аффинность связи «антиген-антитело» (степень различия), так и аффинность связи «антитело-антитело» (степень подобия). Аффинность вычисляется по соответствующим координатам антитела и антигена после декодирования вектора.

Отобранные антитела формируют популяцию клонов, которые затем подвергаются мутации, что ведет к улучшению аффинности антител. Лучшие в популяции антитела формируют клетки памяти, которые восстанавливают нелинейную зависимость.

Решение задачи нахождения глобального экстремума является частным случаем задачи восстановления, при этом в роли антигена выступает целевая функция оптимизации.

## **3. Экспериментальные исследования**

Для исследования возможности нахождения глобальных экстремумов и восстановления мультимодальных нелинейных функций с помощью ИИС были использованы следующие тестовые функции:

$$F_1(x_1, x_2) = 3(1-x_1)^2 \exp(-x_1^2 - (x_2+1)^2) - 10 \frac{\textcircled{R}x_1}{\textcircled{TM}5} - x_1^3 - x_2^5 \left\} \times \right. \quad (1)$$

$$\times \exp(-x_1^2 - x_2^2) - \frac{1}{3} \exp(-(x_1+1)^2 - x_2^2);$$

$$x_1, x_2 \in [-1, 1]; F_1(x_1, x_2) \in [-6.56; 8.11];$$

$$F_2(x_1, x_2) = x_1^2 + x_2^2 - \cos(18x_1) - \cos(18x_2); \quad (2)$$

$$x_1, x_2 \in [-1, 1]; F_1(x_1, x_2) \in [-2; 3.54].$$

Для восстановления функций проведены эксперименты с использованием алгоритмов клонального отбора и теории иммунной сети. В ходе вычислений использовались следующие значения параметров иммунной сети: размер начальной популяции – 121; вероятность мутации – 0.3; количество поколений – 700; разрядность элементов вектора антитела – 22. В качестве меры аффинности выбрано расстояние Хэмминга. Результаты восстановления функции  $F_1$  приведены на рис.1 для 450 поколений (а) и 700 поколений (б).

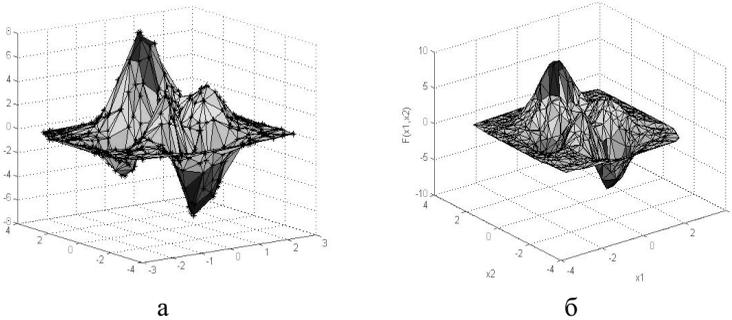


Рисунок 1 – Результаты восстановления функции  $F_1$

Использование эффекта супрессии на основе вычисления аффинности «антитело-антитело» позволяет сократить размер популяции с 691 до 671 для 700 поколений. Для оценки качества восстановления функции используется точечная оценка дисперсии. Для 450 поколений оценка дисперсии равна 0.0035; для 700 поколений – 0.0033. Видно, что после обучения на этапе 450 поколений размер образовавшейся популяции (клеток памяти) недостаточен для восстановления функции  $F_1$ .

Результаты восстановления функции  $F_2$  для 700 поколений приведены на рис.2. В результате сжатия сети размер популяции уменьшился с 1442 до 1244 для 700 поколений. Оценка дисперсии для 700 поколений равна 0,0051.

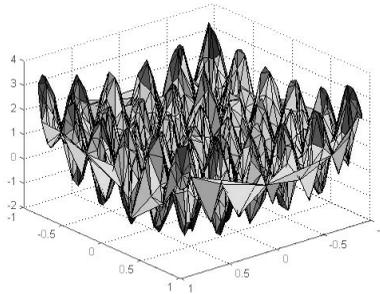


Рисунок 2 – Результаты восстановления функции  $F_2$

При нахождении глобального экстремума вычисление аффинности соответствует вычислению функции  $F(x_1, x_2)$  после декодирования  $x_1, x_2$ . В ходе выполнения иммунного алгоритма большинство антител сосредотачиваются в одном пике. Графики изменения лучшей и средней по популяции функции цели при нахождении глобального максимума функции  $F_1$  и глобального минимума функции  $F_2$  приведены на рис.3 (а) и (б) соответственно.

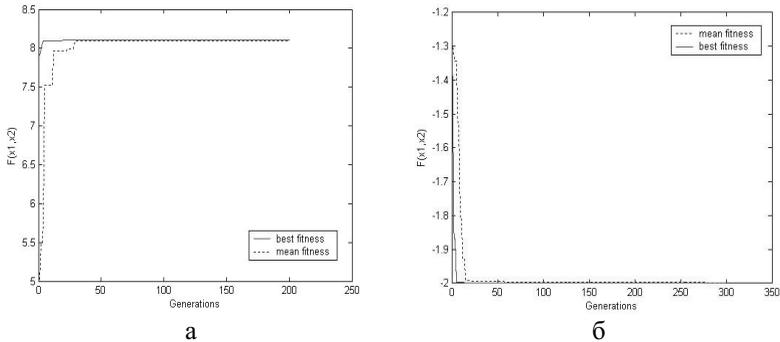


Рисунок 3 – Результаты оптимизации функций  $F_1$  и  $F_2$

### Заключение

В работе решена актуальная задача восстановления и нахождения глобальных экстремумов мультимодальных нелинейных зависимостей на основе использования ИИС.

*Научная новизна* работы заключается в том, что получило дальнейшее развитие использование методов теории ИИС для восстановления и глобальной оптимизации многоэкстремальных функций.

*Практическая ценность* работы состоит в том, что разработаны новые алгоритмы восстановления и оптимизации мультимодальных нелиней-

ных зависимостей, которые основаны на способности самообучаться и могут быть использованы в различных практических задачах, в частности, для структурной и параметрической адаптации правил нечеткого вывода и др.

### Перечень ссылок

1. *Искусственные иммунные системы и их применение* / Под ред. Д. Дасгупты. Пер. с англ. под ред А.А. Романюхи. – М.: Физматлит, 2006. – 344 с.
2. *Timmis J.I., Knight T., De Castro L.N., Hart E.* An Overview of Artificial Immune Systems // *Computation in Cells and Tissues: Perspectives and Tools for Thought*, Natural Computation Series. – Springer, 2004. – P. 51–86.
3. *Литвиненко В.И., Бидюк П.И., Фефелов А.А., Баклан И.В.* Гибридная иммунная сеть для решения задач структурной идентификации // Интеллектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій: Матеріали науково-практичної конференції. – Т. 5. – Херсон: ХМІ, 2005. – С. 41–48.
4. *De Castro L.N., Timmis, J.I.* Artificial Immune Systems: A Novel Paradigm to Pattern Recognition // *Artificial Neural Networks in Pattern Recognition*, SOCO-2002. – University of Paisley, UK, 2002. – P. 67–84.
5. *De Castro L.N., Von Zuben F.J.* The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications // In Proceedings of GECCO'00, Workshop on Artificial Immune Systems and Their Applications, 2000. – P. 36–37.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Шаронова Н.В. (Харьков, НТУ «ХПИ»).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой электронных вычислительных машин Харьковского национального университета радиоелектроники (Протокол №6 от 17.01.2007 г.).

*Поступила* 09.02.2007 г.

### ***Korabliov N.M., Ovcharenko I.V.* Global optimization and reconstruction of multimodal nonlinear dependencies based on artificial immune systems**

The given work considers the use of artificial immune systems in the problems of global optimization and reconstruction of nonlinear multimodal functions.

### ***Кораблев Н.М., Овчаренко И.В.* Глобальная оптимизация и восстановление мультимодальных нелинейных зависимостей на основе искусственных иммунных систем**

В данной работе рассматривается применение ИИС для решения задач поиска глобальных экстремумов и восстановления нелинейных мультимодальных функций.

### ***Кораблев М.М., Овчаренко І.В.* Глобальна оптимізація та відновлення мультимодальних нелінійних залежностей на основі штучних імунних систем**

В даній роботі розглядається застосування штучних імунних систем для розв'язання задач пошуку глобальних екстремумів та відновлення нелінійних мультимодальних функцій.

## ЭФФЕКТИВНЫЕ КЛАССЫ ЗАДАЧ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

*Косолап А.И.*

Днепропетровский национальный университет

### Введение

Многие нелинейные целенаправленные системы могут быть описаны оптимизационными моделями, содержащими полиномиальные функции многих переменных. Класс таких задач достаточно широкий и сложный, поэтому возникает вопрос о выделении в нем максимального подкласса, который допускает эффективное решение. Сложность задач полиномиальной оптимизации заключается в том, что такие задачи многоэкстремальны. При некоторых условиях они могут быть одноэкстремальными, однако определить эти условия достаточно сложно. Поэтому проблема полиномиальной оптимизации интенсивно исследуется в последние годы [1–6] в связи с возросшей потребностью решения многоэкстремальных задач во многих приложениях.

В основе современных исследований в полиномиальной оптимизации лежит преобразование задач этого класса к линейной полуопределенной оптимизации.

Задача полуопределенной оптимизации одноэкстремальная и, следовательно, эффективно разрешима. Однако указанное преобразование возможно только для задач полиномиальной оптимизации, содержащих полиномы, представимые в виде квадратов полиномов меньшей степени [2–6]. К сожалению, такой класс полиномов является достаточно узким даже среди положительных полиномов [7]. Кроме того, преобразование задачи полиномиальной оптимизации к полуопределенной связано со значительным увеличением размерности.

Например, при размерности полинома  $n$  и его максимальной степени  $2q$ , искомая положительно полуопределенная матрица будет иметь размер  $(m \times m)$ , где  $m = C_{n+q}^q$ .

В настоящей работе показано, что класс эффективно разрешимых полиномиальных задач может быть значительно расширен посредством квазивыпуклых суперпозиций полиномиальных функций.

Такой подход не приводит к увеличению размерности решаемых задач и использует хорошо развитый аппарат выпуклой оптимизации.

### 1. Постановка задачи

Рассматривается задача полиномиальной оптимизации

$$\min\{f(x) | g_i(x) \leq 0, i=1, \dots, m, x \in E^n\}, \quad (1)$$

где  $f(x)$  и все  $g_i(x)$  полиномиальные функции, а  $E^n$  –  $n$ -мерное евклидово пространство.

Задача (1) в общем случае является многоэкстремальной, поэтому возникает проблема, при каких условиях может быть эффективно вычислена ее точка глобального минимума. Будем использовать основные свойства полиномов: сумма, разность, произведение и суперпозиция полиномов снова являются полиномами. Важным подклассом полиномов являются выпуклые полиномы (функция выпуклая, если матрица ее вторых частных производных положительно определена). Для таких полиномов задача (1) одноэкстремальна. Будем рассматривать выпуклые суперпозиции выпуклых полиномов. Такие полиномы уже не являются выпуклыми.

Например, полином  $(x_1^2 + x_2^2 - 1)^2$  является выпуклой суперпозицией выпуклого полинома  $x_1^2 + x_2^2 - 1$ , но он не является выпуклой функцией.

Будем различать одноместные и многоместные выпуклые суперпозиции полиномов. К одноместным супервыпуклым полиномам относятся полиномы, которые содержат только одномерные суперпозиции.

Например, одноместным супервыпуклым полиномом будет  $(x^T A x + b^T x - 1)^2$ , где  $A$  – положительно определенная матрица размера  $(n \times n)$ , а  $b$  и  $x$   $n$ -мерные векторы. Полином  $(x_1^2 + x_2^2 - 1)^2 - (2x_1^2 + 4x_2^2 + x_1 - 3)^2$  является многоместным супервыпуклым полиномом, так как является двумерной суперпозицией  $y_1^2 - y_2^2$ .

### 2. Класс супервыпуклых полиномов

Класс супервыпуклых полиномов можно значительно расширить, если включить в него не только выпуклые, но и квазивыпуклые суперпозиции полиномов. Функция  $f(x)$  на выпуклом множестве  $S$  называется квазивыпуклой, если справедливо неравенство

$$f(\alpha x^1 + (1 - \alpha)x^2) \leq \max\{f(x^1), f(x^2)\}$$

для  $\forall x^1, x^2 \in S$  и  $\alpha \in [0, 1]$ . Например, функция  $x^3$  является супервыпуклой, но не выпуклой. Если функция  $f(x)$  квазивыпуклая, то  $-f(x)$  является квазивогнутой.

**Определение.** Функция (полином) называется супервыпуклой, если она может быть представлена в виде суперпозиций квазивыпуклых функций. Супервыпуклая функция одноместна, если все суперпозиции одномерные квазивыпуклые функции, в противном случае она многоместна.

Класс многоместных супервыпуклых функций достаточно широкий. Известно, что любая дважды дифференцируемая функция представима в виде разности двух выпуклых функций и, следовательно, является многоместной супервыпуклой функцией. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать только функции (полиномы), представимые одномерными суперпозициями.

**Лемма 1.** Если функция  $f(x)$  супервыпуклая, то и функция  $f(x)+a$  супервыпуклая.

*Доказательство.* Представим функцию  $f(x) + a$  в виде

$$\ln(\exp(f(x))+\ln(a)) = \ln(a - \exp(f(x)))$$

(если  $a$  отрицательно, то перед вторым логарифмом будет знак минус). Очевидно, что  $\ln(a - \exp(f(x)))$  – супервыпуклая функция.

**Лемма 2.** Ограниченная супервыпуклая функция  $f(x)$  на отрезке  $[a, b]$  может быть продолжена на всю действительную ось с сохранением супервыпуклости.

*Доказательство.* Пусть  $f(x) = f_1(f_2(\dots f_m(x) \dots))$ , где все  $f_i(x)$  – квазивыпуклые функции. Продолжим каждую функцию  $f_i(x)$  на всю действительную ось с сохранением квазивыпуклости, положив  $f_i(x)=f_i(a)+x-a$ , если производная по направлению  $f_i'(a)<0$  и  $f_i(x)=f_i(a)-x+a$ , в противном случае. Аналогично для точки  $b$  положим  $f_i(x)=f_i(b)+x-b$ , если производная  $f_i'(b) \geq 0$  и  $f_i(x) = f_i(b)-x+b$  в противном случае. При таком продолжении каждая функция  $f_i(x)$  будет квазивыпуклой на всей действительной оси. Вне отрезка  $[a, b]$  они линейны, а на отрезке  $[c, d] \not\subset [a, b]$  и  $[c, d] \cup [a, b] \neq \emptyset$ , она так же будет квазивыпуклой, так как в противном случае, когда максимум функции достигается во внутренней точке отрезка  $[c, d]$ , эта точка максимума может быть только внутренней точкой отрезка  $[a, b]$ , но это противоречит квазивыпуклости на отрезке  $[a, b]$ . Следовательно, функция  $f(x)$  супервыпуклая на всей действительной оси.

Справедливо следующее утверждение.

**Теорема 1.** Если ограниченная на отрезке  $[a, c]$  функция  $f(x)$  супервыпуклая на отрезке  $[a, b]$  и  $[b, c]$ , причем

$$\max_{x \in [a, b]} f(x) \leq \min_{x \in [b, c]} f(x),$$

то  $f(x)$  будет супервыпуклой и на отрезке  $[a, c]$ .

*Доказательство.* Не ограничивая общности, положим  $b = 0$ , так как, если функция  $f(x)$  супервыпуклая, то такой же будет и  $f(x - a)$ . В соответствии с леммой 1, положим  $f(b) = 0$ . Построим функции

$$f_1(x) = \begin{cases} f(x), & x \in [a, b]; \\ x, & x \in [b, c]; \end{cases} \quad f_2(x) = \begin{cases} x, & x \in [a, b]; \\ f(x), & x \in [b, c]; \end{cases}$$

которые будут супервыпуклыми в соответствии с леммой 2. Но тогда функция  $f(x) = f_1(f_2(x))$  будет супервыпуклой на отрезке  $[a, c]$ . Утверждение теоремы остается в силе, если знак неравенства в ее условии " $\leq$ " заменить на " $\geq$ ".

Пример. Функция

$$f(x) = \begin{cases} [(x+1)^2 - 1, & x \in [-2, 0]; \\ [-(x-2)^2 + 4, & x \in [0, 4]; \end{cases}$$

выпуклая на отрезке  $[-2, 0]$  и вогнутая на  $[0, 4]$ , тогда

$$f_1(x) = \begin{cases} [(x+1)^2 - 1, & x \in [-2, 0]; \\ [x, & x \in [0, 4]; \end{cases}$$

и

$$f_2(x) = \begin{cases} x, & x \in [-2, 0]; \\ [-(x-2)^2 + 4, & x \in [0, 4]; \end{cases}$$

тогда непосредственной проверкой убеждаемся, что  $f(x) = f_1(f_2(x))$ .

**Следствие.** *Одномерный полином является одноместной супервыпуклой функцией.*

Действительно всю вещественную ось можно разбить на непересекающиеся интервалы, на каждом из которых полином будет квазивыпуклой или квазивогнутой функцией (квазивогнутая функция является супервыпуклой, так как она является линейной суперпозицией квазивыпуклой функции). Достаточно продолжить, рассмотренную в доказательстве теоремы процедуру на следующие интервалы, представляя функцию  $f_2(x)$  в виде суперпозиции двух квазивыпуклых функций и т.д. Учитывая то, что число интервалов конечно (меньше  $n-2$ ), получим представление полинома в виде суперпозиций квазивыпуклых функций. Заметим, что если полином не содержит точек перегиба, в которых производная равна нулю, то он может быть представлен и в виде суперпозиций выпуклых функций.

### 3. Преобразование задач полиномиальной оптимизации

Рассматривая суперпозиции одномерных полиномов от многомерных выпуклых полиномов, получим класс супервыпуклых полиномиальных функций. Для таких функций задача (1) приобретает вид

$$\min \{f_1(f_2(\dots f_p(x)\dots)) | g_{i1}(g_{i2}(\dots g_{ir}(x)\dots)) \leq 0, i=1, \dots, m, x \in E^n\}, \quad (2)$$

где все  $f_i()$ ,  $g_{ij}()$  – квазивыпуклые полиномы. Преобразуем задачу (2) к виду:

$$\min \{y_1 | f_i(y_{i-1}) \leq y_i, i=1, \dots, p, g_{ij}(y_{ij-1}) \leq y_{ij}, i=1, \dots, m, y_{ir}=0, j=1, \dots, r\}. \quad (3)$$

Задача (3) является задачей выпуклого программирования и, следовательно, одноэкстремальной.

**Теорема 2.** Если  $x^*$  – решение задачи (3) и оно допустимо для задачи (2), то  $x^*$  – точка глобального минимума задачи (2).

*Доказательство.* Решение задачи (3) является нижней границей решения задачи (2). Так как точное преобразование (2) в (3) содержало бы только ограничения-равенства, которые являются частным случаем неравенств. Поэтому допустимое множество задачи (3) включает в себя допустимое множество задачи (2), значение минимума задачи (3) меньше минимума задачи (2), но, если точка  $x^*$  допустима для задачи (2), то она оптимальна для задачи (2).

Таким образом,  $x^*$  – лишь нижняя оценка решения задачи (2). Однако, если ограничения задачи (2) содержат только одно супервыпуклое ограничение, то соответствующая нижняя оценка будет точной. Покажем, что решения задач

$$\min\{c^T x / g_1(g_2(\dots g_m(x)\dots)) \leq 0\} \quad (4)$$

и

$$\min\{c^T x / g_1(y_2) \leq 0, g_2(y_3) \leq y_2, \dots g_m(x) \leq y_m\} \quad (5)$$

совпадают для любого вектора  $c$ . Посредством решения уравнений  $g_i(y_{i+1}) = y_i$  ограничения задачи (4) преобразуются к виду  $a \leq g_m(x) \leq b$ , где  $a$  и  $b$  максимально возможные границы. Каждое уравнение  $g_i(y_{i+1}) = y_i$  определяет отрезок и для определения правой части следующего уравнения берется один из концов этого отрезка. Таким образом, все ограничения задачи (5) будут выполняться как равенства, следовательно решение задач (4) и (5) будут совпадать. Если целевой функцией задачи (4) является супервыпуклый полином и множество его точек минимума не принадлежит допустимому множеству, то точка глобального минимума такой задачи находится посредством преобразования ее к выпуклой задаче (3). В общем случае, при наличии множества супервыпуклых ограничений, теорема 2 гарантирует получение нижней оценки решения.

### Выводы

Рассмотрен сложный класс задач полиномиальной оптимизации, который преобразуется посредством квазивыпуклых суперпозиций полиномов к одноэкстремальным задачам. Это означает, что для решения сложных многоэкстремальных задач могут быть использованы эффективные алгоритмы выпуклой оптимизации. Необходимость поиска точки глобального минимума в многоэкстремальных задачах становится все более актуальной в связи с расширением сферы приложений оптимизационных моделей. Предложенный подход выделяет классы задач, когда проблема поиска глобального минимума эффективно разрешима.

### Перечень ссылок

1. *Lasserre J.* Global optimization with polynomials and the problem of moments // *SIAM J. Optim.* – 2001. – No. 3. – P. 796–817.
2. *Parrilo P.* Semidefinite Programming relaxations for semialgebraic problems // *Mathematical Programming, Ser. B* 96. – 2003. – № 2. – P. 293–320.
3. *Schweighofer M.* Optimization of polynomials on compact semialgebraic sets // *SIAM J. Optim.* – 2005. – № 15. – P. 805–825.
4. *Nie J., Demmel J.* Sparse SOS Relaxations for Minimizing Functions that are Summation of Small Polynomials. – University of Minnesota. – 2006. – 24 p. (<http://arxiv.org/abs/math.OA/0606476>).
5. *Lasserre J.* A sum of squares approximation of nonnegative polynomials // *SIAM J. Optim.* – 2006. – № 3. – P. 751–765.
6. *Parrilo P., Sturmfels B.* Minimizing polynomial functions // *Theor. Comput. Sci. Ser. Discrete Math.* – 2003. – vol. 60. – P. 83–99.
7. *Blekherman G.* There are Significantly More Nonnegative Polynomials than Sums of Squares. – 2003. – 12 p. (<http://arXiv:math.AG/0402158>).

**Рецензент** – д.т.н. Тогобицкая Д.Н. (Днепропетровск, ИЧМ).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой компьютерных технологий Днепропетровского национального университета (Протокол № 5 от 03.01.2007 г.).

*Поступила* 30.01.2007 г.

### *Kosolap A.I. Effective classes of problems polynomials optimization*

This paper discusses the new class of optimization of polynomials, that allows to find the point of a global minimum effectively.

### *Косолап А.И. Эффективные классы задач полиномиальной оптимизации*

В этой работе предложен новый класс задач полиномиальной оптимизации, позволяющий эффективно находить точку глобального минимума.

### *Косолап А.И. Ефективні класи задач поліноміальної оптимізації*

В цій статті запропонований новий клас задач поліноміальної оптимізації, який дозволяє ефективно знаходити точку глобального мінімуму.

УДК 62.19:519.7

## **ВЫБОР СИСТЕМЫ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ НА ОСНОВЕ ЭВОЛЮЦИОННОГО ПОИСКА**

*Олейник А.А.*

Запорожский национальный технический университет

### **Введение**

При разработке автоматизированных систем контроля за дорожным движением актуальной является задача автоматической классификации автотранспортных средств, что связано с необходимостью учета типа транспортного средства при принятии решения о соответствии его скорости максимально допустимой для данного вида средств. Кроме того, информация о типе транспортного средства (легковой автомобиль, мотоцикл, грузовой автомобиль и т.п.) позволит быстрее и надежнее идентифицировать конкретное транспортное средство по его номерному знаку.

Таким образом, для автоматизации процесса классификации автотранспортных средств необходимо разработать классифицирующие модели по данным видеонаблюдения. Изображение, получаемое с камер наблюдения, несет избыточную информацию [1]. Поэтому современные методы анализа графических изображений предполагают преобразование полученного изображения к стандартному виду с фиксированным разрешением, после чего рассчитываются дополнительные параметры, характеризующие изображение.

При этом включение в модель признаков, незначительно или вообще не влияющих на выходной параметр, не только затрудняет построение модели, но и усложняет её использование, так как избыточная модель требует больше вычислительных ресурсов [2]. В результате эффективность прогнозирования по такой модели часто гораздо ниже, чем при использовании модели, построенной на основе меньшего набора признаков, обладающих максимальной информативностью.

Поэтому для разработки эффективных систем классификации необходимо выделить систему информативных признаков, наиболее полно характеризующих изображение.

*Задача отбора информативных признаков* состоит в выделении из полного набора признаков сокращённого набора признаков, обладающего максимальной информативностью. При этом вывод об информативности делается на основе построенной по анализируемому набору признаков модели.

Однако известные методы отбора информативных признаков [2] не являются достаточно эффективными и мало пригодны для выделения информативных признаков графических объектов.

В настоящей работе для отбора информативных признаков предлагается использовать эволюционный поиск [3–5], который включает в себя группу стохастических методов, основанных на аналогии с естественными эволюционными процессами. В отличие от других методов многомерного поиска, эволюционный поиск более приспособлен для нахождения новых решений за счет объединения лучших решений из разных популяций и обладает возможностями для выхода из локальных оптимумов.

*Целью работы* являлось выделение системы информативных признаков для классификации транспортных средств с помощью модифицированных методов эволюционного поиска, а также разработка модификации эволюционного поиска для получения системы информативных признаков заданного объема.

### 1. Эволюционный отбор информативных признаков

Для решения задачи отбора информативных признаков эволюционный поиск в [6] предлагается осуществлять путем выполнения следующих шагов.

Шаг 1. Установить счетчик итераций (времени):  $t = 0$ .

Шаг 2. Сгенерировать начальные комбинации информативных признаков в виде хромосом – битовых строк  $H_j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – количество сгенерированных хромосом) размерности  $L$  (количество признаков).

Шаг 3. Для каждой хромосомы  $H_j$  получить зависимость  $y_j(H_j, X)$  с учетом информативности  $i$ -го признака: если  $h_{ij} = 0$  ( $h_{ij}$  –  $i$ -ый бит  $j$ -ой хромосомы  $H_j$ ), то  $i$ -ый признак считается неинформативным и не учитывается для построения модели  $y_j(H_j, X)$ , если  $h_{ij} = 1$ , то  $i$ -ый признак считается информативным и учитывается для построения модели  $y_j(H_j, X)$ .

Поскольку данная операция будет повторяться достаточно часто, математическую модель для  $y_j(H_j, X)$  целесообразно выбрать так, чтобы она не выдвигала больших требований к таким ресурсам ЭВМ, как память, вычислительная мощность и скорость процессора. В качестве такой модели можно использовать многомерную линейную регрессию.

Шаг 4. Для всех  $H_j$  рассчитать ошибку модели:

$$E_j = \frac{1}{m} \sum_{p=1}^m (y^p - y_j^p)^2,$$

где  $E_j$  – ошибка модели  $y_j(H_j, X)$ ,  $y_j^p$  – значение выходного параметра  $p$ -го экземпляра, рассчитанное по модели  $y_j(H_j, X)$ ,  $y^p$  – значение выходного параметра  $p$ -го экземпляра.

Шаг 5. Проверка условий окончания поиска: достижение лимита времени, числа итераций, уровня максимально допустимой ошибки  $E_{\max}$ . Если критерии окончания удовлетворены, перейти на шаг 8.

Шаг 6. Увеличить счетчик итераций (времени):  $t = t + 1$ .

Шаг 7. Применив эволюционный метод (используя операторы отбора, скрещивания и мутации), сгенерировать новый набор хромосом. Перейти на шаг 3.

Шаг 8. В зависимости от хромосомы  $H_j$ , при которой достигается минимум среднеквадратической ошибки, составить оптимальную функцию  $y_j(H_j, X)$ , но уже с применением более сложной математической модели, обеспечивающей высокую точность аппроксимации.

Шаг 9. Останов.

## 2. Отбор заданного количества признаков

При использовании классического эволюционного поиска в случае необходимости отбора строго  $L_0$  (или не более, чем  $L_0$ ) из  $L$  возможных признаков существует проблема появления в результате инициализации, скрещивания и мутации хромосом с количеством единиц, превышающем  $L_0$ . Решение данной проблемы с помощью применения штрафных функций для таких хромосом является неэффективным, поскольку уменьшает пространство поиска, отбрасывая неподходящие хромосомы. Кроме того, при применении такого подхода возможны случаи, когда эволюционный метод не попадет в область допустимых значений и не найдет какой-либо комбинации допустимых значений.

Для устранения такой проблемы необходимо разработать операторы инициализации, скрещивания и мутации, производящие хромосомы, удовлетворяющих данным условиям.

Не зависимо от конкретной реализации того или иного эволюционного оператора целесообразно внести следующие изменения.

Инициализацию хромосом единичными битами можно выполнить в следующей последовательности.

Шаг 1. Сгенерировать случайным образом множество  $A$  ( $|A| = L_0$ ), содержащее различные целые числа из интервала  $[1; L]$ .

Шаг 2. Инициализировать хромосому  $H_j$  по следующей формуле:

$$h_{ji} = \begin{cases} 1, & i \in A, \\ 0, & i \notin A, \end{cases}$$

где  $h_{ji}$  –  $i$ -ый бит  $j$ -ой хромосомы  $H_j$ .

Шаг 3. В случае, если инициализированы не все хромосомы, выполнить переход на шаг 1. В противном случае перейти на выполнение следующего этапа эволюционного поиска.

Важно отметить, что предложенный вариант оператора инициализации (также, как и другие разработанные эволюционные операторы) для отбора не более  $L_0$  из  $L$  заданных признаков можно модифицировать в зависимости от используемого эволюционного метода отбора признаков. Так, при использовании дополнительной информации о значимости признаков можно усиливать вероятность генерации чисел в множество  $A$ , соответствующих более информативным признакам.

После выполнения оператора скрещивания необходимо проверить получившиеся хромосомы-потомки на допустимость, чтобы количество единичных битов в них не превышало заданного количества  $L_0$ . В случае, если это условие не выполняется, необходимо выполнить преобразование недопустимых хромосом к допустимому виду путем изменения случайно выбранных единичных битов на нулевые таким образом, чтобы количество единичных битов в хромосоме не превышало  $L_0$ . Такой подход не предусматривает дополнительные вычисления значений фитнес-функции, так как фитнес-функция недопустимой хромосомы не вычисляется, а фитнес-функция допустимой хромосомы вычисляется один раз при её оценивании для отбора.

В операторе мутации для сохранения количества единичных битов в хромосоме предлагается выполнять оператор мутации не над одним, а над двумя битами с разными значениями. Таким образом, для мутации выбираются два бита (единичный и нулевой), после чего происходит замена их значений на противоположные. В случае, если применяется метод с использованием априорной информации о значимости признаков, необходимо ослабить вероятность мутации единичных битов и усилить её для нулевых битов, соответствующих признакам со значительными оценками индивидуальной значимости, и наоборот выполнить обратные действия для признаков с незначительной индивидуальной информативностью.

### **3. Архивирование вычисленных значений фитнес-функции**

Процедура оценки комбинации признаков является наиболее ресурсоёмкой при решении задачи отбора информативных признаков. В процессе эволюционного поиска в результате применения операторов скрещивания и мутации часто появляются хромосомы, оценивающиеся ранее на предыдущих итерациях поискового метода. Поэтому с целью уменьшения времени, необходимого для выполнения эволюционного отбора информативных признаков, целесообразно проводить архивирование вычисленных значений фитнес-функции.

Для сохранения оценок комбинаций признаков необходимо при выполнении эволюционного оператора инициализации начальной популяции хромосом создать структуру  $\text{FitArc}$ , состоящую из полей  $H$  и  $E$ , где  $H$  – поле

для хранения значений хромосом,  $E$  – поле со значениями фитнес-функции, соответствующими хромосомам, представленным в поле  $H$ . Инициализировать поля  $H$  и  $E$  структуры FitArc пустыми множествами.

Для оценки хромосомы  $H_j$ , соответствующей определенной комбинации признаков, использовать следующую последовательность действий.

Шаг 1. Проверить, существует ли запись в поле  $H$  структуры FitArc, соответствующая хромосоме оцениваемой  $H_j$ . В случае, если такая запись существует, перейти на шаг 2. В противном случае выполнить переход на шаг 3.

Шаг 2. Установить:  $E_j = E_k$ , где  $E_j$  – оценка хромосомы  $H_j$ ;  $E_k$  – значение поля  $E$  структуры FitArc, соответствующее записи со значением  $H_j$  поля  $H$ . Выполнить переход на шаг 5.

Шаг 3. Рассчитать значение критерия оценки  $E_j$  хромосомы  $H_j$ .

Шаг 4. Обновить структуру FitArc путем добавления нового значения фитнес-функции в виде записи  $\langle H_j; E_j \rangle$ .

Шаг 5. Останов.

Применение предложенного подхода при эволюционном поиске позволит сократить количество вычислений значений фитнес-функции, и, следовательно, время, необходимое для поиска системы информативных признаков.

#### 4. Методы эволюционного отбора информативных признаков

Классические эволюционные методы являются высоко итеративными. Длительность их работы сильно зависит от начальных условий поиска. Поэтому эффективность работы традиционных методов эволюционного поиска является недостаточно высокой.

Для повышения эффективности классического эволюционного поиска при решении задачи отбора информативных признаков предлагается использовать одну из следующих модификаций.

1. Эволюционный метод с фиксацией части пространства поиска [7,8] предполагает анализ индивидуальной информативности признаков на этапе инициализации путём применения традиционных методов оценки информативности признаков [2], после чего при эволюционном поиске комбинации наиболее информативных признаков используются определенное количество признаков с наибольшими оценками индивидуальной информативности.

2. Методы эволюционного поиска с использованием априорной информации о значимости признаков [9].

2.1. Эволюционный поиск с группировкой признаков на основе индивидуальных оценок значимости признаков для повышения эффективности аналогично предыдущему методу предполагает расчет информативно-

сти признаков на этапе инициализации. Отличие от предыдущего метода состоит в том, что показатели индивидуальной информативности признаков и тесноты связи признаков между собой используются не только на этапе инициализации параметров эволюционного поиска, но и на всех последующих этапах эволюционного поиска. В операторах скрещивания и мутации априорная информация используется путем увеличения вероятности появления единичных битов в генах хромосомы, соответствующих признаков с высокими оценками индивидуальной информативности.

2.2. Эволюционный поиск с использованием энтропии как меры неопределенности состояния объекта предполагает использование энтропии [2] в качестве оценки индивидуальной информативности признаков. Энтропия характеризует меру неопределенности состояния объекта. Таким образом, чем меньше энтропия признака, тем большее количество обеспечиваемой им информации используется при прогнозировании, и тем больше вероятность включения признака в синтезируемую модель.

2.3. Островная модель эволюционного поиска с учетом априорной информации о значимости признаков предусматривает использование двух островов, на одном из которых идёт развитие популяции с учетом информации о значимости признаков посредством использования разработанного эволюционного метода с группировкой признаков. На втором острове используется эволюционный поиск с применением энтропии. При этом через заданное в качестве параметра метода  $t_m$  количество итераций (интервал миграций) происходят миграции особей с одного острова на другой.

3. Полимодальный эволюционный поиск с кластеризацией хромосом в процессе эволюционного поиска определяет группы близких (подобных) хромосом и повышает разнообразие популяции путем понижения значений фитнес-функций хромосом в зависимости от близости к центру их группы.

## 5. Эксперименты и результаты

Разработанные методы эволюционного поиска применялись для отбора информативных признаков при синтезе моделей для классификации транспортных средств. Исходная выборка содержала преобразованные графические изображения различных транспортных средств, полученные с камер наблюдения. Выборка, предоставленная ООО "МПА Групп" – партнером итальянской компании Multinetworks s.r.l., состояла из 1062 экземпляров, каждый из которых характеризовался 4096 признаками, представляющими собой нормированные значения интенсивности точек изображения, спроецированного на сенсорную матрицу точек размерности  $64 \times 64$ , по которым определялись значения расчетных (искусственных) 26 признаков, обобщающих графическую

информацию об объекте. Транспортные средства классифицировались на: легковые автомобили, микроавтобусы, мотоциклы, грузовые автомобили и автобусы. Для каждого класса транспорта строилась своя модель и отбирались признаки, наиболее полно характеризующие соответствующий тип транспортного средства. Результаты экспериментов приведены для решения задачи отбора информативных признаков при классификации транспортных средств на мотоциклы и не мотоциклы. При этом анализировались только обобщающие показатели.

Задача экспериментального исследования состояла в отборе не более 10 из 26 обобщающих признаков. Для отбора признаков использовались предложенные и классический методы эволюционного поиска. Поддержка ограничения в виде отбора не более 10 признаков осуществлялась с помощью двух различных вариантов. При первом варианте решениям (хромосомам) с количеством единичных битов, превышающем установленное значение, ставилось в соответствие максимально возможное значение фитнес-функции, равное единице. Вторым вариантом поддержки ограничений предусматривал использование разработанного подхода для отбора заданного количества признаков.

Для проведения исследования начальные параметры всех методов эволюционного поиска устанавливались следующими: количество особей в популяции – 10; вероятность скрещивания – 0,8; вероятность мутации – 0,1. Критерии останова: максимально допустимое количество итераций – 20; достижение приемлемого значения фитнес-функции, равного 0,01; отсутствие изменений в лучшем значении фитнес-функции на протяжении десяти итераций.

Для расчета значения фитнес-функции при оценивании хромосом использовалась ошибка классификации по составленной с помощью отобранных признаков модели. В качестве такой модели применялась двухслойная нейронная сеть прямого распространения, первый слой которой содержал 4 нейрона, а второй слой – 1 нейрон, все нейроны сети имели сигмоидную функцию активации.

Результаты экспериментов по отбору заданного количества признаков с помощью классического эволюционного поиска при различных способах поддержки ограничений приведены в табл. 1. При этом во всех таблицах используются следующие сокращения:  $t$  – время в секундах, затраченное на эволюционный поиск комбинации информативных признаков;  $k_f$  – количество вычислений значений фитнес-функции;  $k$  – количество отобранных признаков;  $\varepsilon$  – достигнутая точность решения (ошибка классификации по модели, синтезируемой с помощью отобранных признаков). На рис. 1 изображена достигнутая ошибка классификации на каждой итерации для обоих подходов.

Таблица 1 – Результаты отбора заданного количества признаков

Способ поддержки ограничений в виде заданного количества признаков	Критерий			
	$t$	$k_f$	$k$	$\varepsilon$
Присвоение максимально возможных значений фитнес-функциям недопустимым хромосомам	331,2	210	10	0,0151
Использование предложенного подхода	297,7	190	10	0,0075

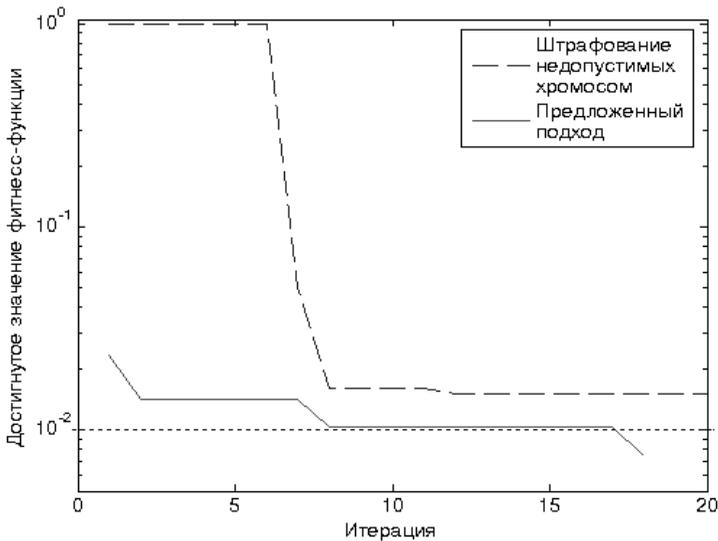


Рисунок 1 – Достигнутая ошибка классификации на различных итерациях при использовании различных подходов к отбору заданного количества признаков

Как видно из табл. 1 и рис. 1, использование предложенного подхода для отбора заданного количества признаков является более эффективным, поскольку не требует нахождения области допустимых значений хромосом, а также в процессе поиска все новые хромосомы удовлетворяют заданным условиям, вследствие чего отыскивается более оптимальная комбинация признаков. Кроме получения лучших значений фитнес-функции применение предложенного подхода к отбору заданного количества признаков также приводит к уменьшению количества вычислений фитнес-функции и уменьшению времени,

необходимого для эволюционного поиска, которое получено за счет достижения приемлемого значения фитнес-функции на восемнадцатой итерации. Поэтому в ходе дальнейших исследований для отбора заданного количества признаков применялся предложенный подход.

В табл. 2 приведены результаты отбора комбинации признаков заданного размера с использованием архивирования вычисленных значений фитнес-функции и без него. На рис. 2 представлен график суммарного количества вычисленных значений фитнес-функции. По оси  $OX$  отложен номер итерации, а по оси  $OY$  – количество всех вычисленных значений фитнес-функции до текущей итерации включительно.

Таблица 2 – Анализ эффективности применения архивирования вычисленных значений фитнес-функции

Архивирование	Критерий			
	$t$	$k_f$	$k$	$\epsilon$
Не используется	297,7	190	10	0,0075
Используется	183,9	122	10	0,0075

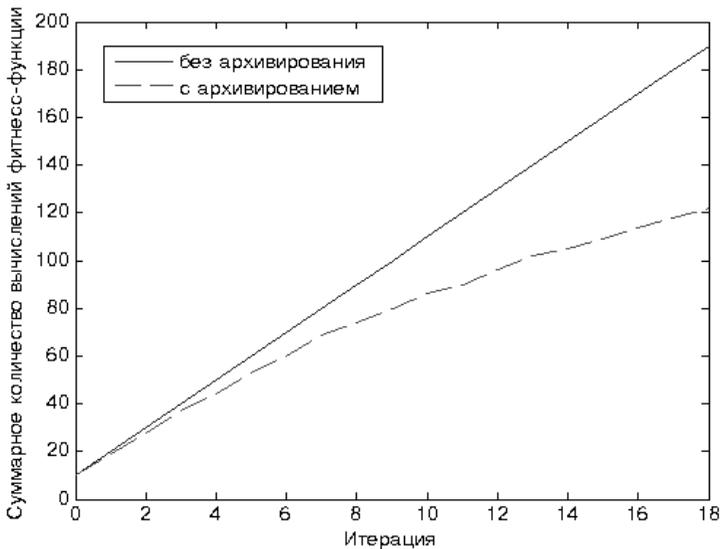


Рисунок 2 – График суммарного количества вычисленных значений фитнес-функции

Результаты, приведенные в табл. 2 и рис. 2 подтверждают, что применение архивирования вычисленных значений фитнес-функции при эволюционном поиске приводит к сокращению времени, необходимого на поиск комбинации информативных признаков, что достигается за счет уменьшения количества вычислений значений фитнес-функции. Вследствие эффективности применения архивирования дальнейшие эксперименты проводились с использованием такого подхода.

Табл. 3 содержит результаты по отбору комбинации признаков при использовании различных эволюционных методов. На рис. 3 представлена достигнутая ошибка классификации сравниваемых методов на каждой итерации.

Таблица 3 – Сравнительный анализ различных эволюционных методов для выделения системы информативных признаков

Метод	Критерий			
	$t$	$k_f$	$k$	$\varepsilon$
Классический эволюционный поиск (КЭП)	183,9	122	10	0,0075
Эволюционный метод с фиксацией части пространства поиска (ЭМФЧПП)	133,4	95	10	0,009
Эволюционный поиск с группировкой признаков на основе индивидуальных оценок значимости признаков (ЭПГПОИОЗ)	102,7	71	10	0,0075
Эволюционный поиск с использованием энтропии (ЭПИЭ)	109,8	75	9	0,0068
Островная модель эволюционного поиска (ОМЭП)	106,9	74	10	0,0075
Полиמודальный эволюционный поиск с кластеризацией хромосом (ПЭПКХ)	142,7	103	10	0,0083

Из рис. 3 видно, что разработанные методы эволюционного отбора информативных признаков уже на начальных итерациях опережают классический эволюционный поиск и находят приемлемое значение целевой функции быстрее, что является следствием использования дополнительной информации об исследуемом объекте.

Результаты проведенных экспериментов показали, что предложенные методы быстрее находят набор информативных признаков по сравнению с классическим эволюционным поиском. Математические модели, построенные на основе отобранных с помощью разработанных методов признаков, обеспечивают большую точность классифи-

кации по сравнению с аналогичными моделями, синтезированными на основе признаков, отобранных путем применения классических методов отбора признаков. Таким образом, предложенные методы могут быть рекомендованы для применения на практике при отборе признаков для синтеза классифицирующих моделей технических изделий.

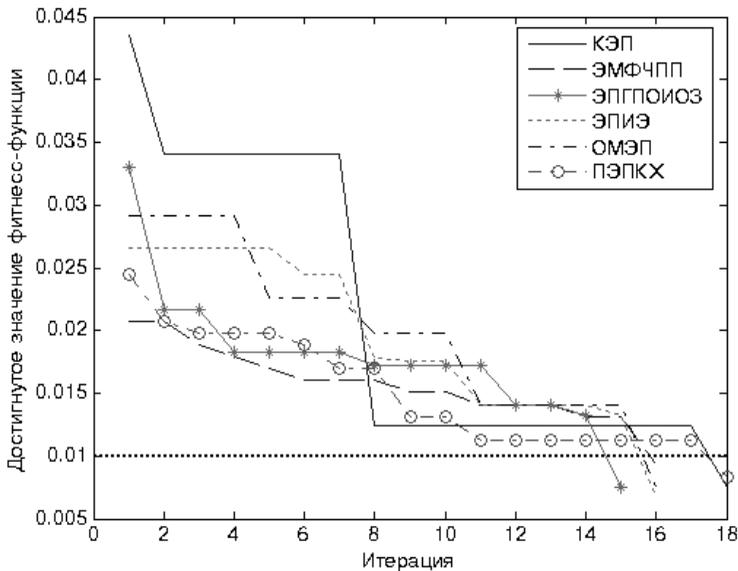


Рисунок 3 – Достигнутая ошибка классификации на различных итерациях при использовании различных эволюционных методов

### Заключение

С целью автоматизации процесса управления транспортным потоком в работе решена актуальная задача отбора признаков для классификации транспортных средств с помощью эволюционного подхода.

*Научная новизна* работы заключается в том, что:

- получил дальнейшее развитие метод эволюционного поиска, который модифицирован для решения задачи отбора информативных признаков при построении распознающих моделей транспортных средств;
- предложены модификации эволюционных операторов для выделения заданного количества признаков, генерирующие новые решения, которые соответствуют определенному количеству признаков;

– с целью уменьшения времени, необходимого для выполнения эволюционного отбора информативных признаков, предложено использование процедуры архивирования вычисленных значений фитнес-функции;

– разработаны новые эволюционные методы отбора признаков: эволюционный метод с фиксацией части пространства поиска, методы эволюционного поиска с использованием априорной информации о значимости признаков, полимодальный эволюционный поиск с кластеризацией хромосом. Предложенные методы позволяют более точно выделить систему информативных признаков по сравнению с традиционными методами отбора признаков.

*Практическая ценность* работы состоит в том, что: разработано программное обеспечение, которое с помощью предложенных методов находит комбинацию информативных признаков, наиболее полно отражающую исследуемый объект; проведены эксперименты по выделению системы признаков для классификации транспортных средств по данным изображения, полученного с камер наблюдения.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР “Научно-методические основы и математическое обеспечение для автоматизации и моделирования процессов управления и поддержки принятия решений на основе процедур распознавания и эволюционной оптимизации в нейросетевом и нечеткологическом базисах” (№ гос. регистрации 0106U008621).

### Перечень ссылок

1. Bow S. Pattern Recognition and Image Preprocessing. Second Edition, Revised and Expanded. – New York: Marcel Dekker, Inc, 2002. – 698 с.
2. Бургер И.А. Техническая диагностика. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
3. *The Practical Handbook of Genetic Algorithms. Volume I. Applications* / Ed. by L.D. Chambers. – Florida: CRC Press, 2000. – 520 p.
4. Haupt R., Haupt S. Practical Genetic Algorithms. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2004. – 261 p.
5. Олейник А.А., Олейник А.А. Эволюционный синтез моделей сложных объектов и процессов // *Радиоелектроніка і молодь в ХХІ сторіччі: Матеріали 10-го міжнародного молодіжного форуму (10–12 квітня 2006 р.)*. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – С. 417.
6. Олейник А.А., Олейник А.А., Субботин С.А., Яценко В.К. Синтез моделей коэффициента упрочнения деталей авиадвигателей после алмазного выглаживания на основе оптимизационного подхода // *Вісник двигунобудування*. – 2005. – №3. – С. 25–30.
7. Subbotin S., Oleynik A. The feature selection method based on the evolutionary approach with a fixation of a search space // *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science: Proc. Int. Conf TCSET'2006*. – Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic, 2006. – P. 574–575.

8. Субботин С.А., Олейник А.А. Ускоренный метод эволюционного отбора признаков // Автоматика-2006: Тези доповідей тринадцятої міжнародної науково-технічної конференції (25–28 вересня 2006 р.). – Вінниця: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2006. – С. 409.

9. Субботин С.А., Олейник А.А. Выбор набора информативных признаков для синтеза моделей объектов управления на основе эволюционного поиска с группировкой признаков // Искусственный интеллект. – 2006. – № 4. – С. 488–494.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Таланин И.Е. (Запорожье, Гуманитарный университет "Запорожский институт государственного и муниципального управления").

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.01.2007 г.)

*Поступила 10.01.2007 г. После доработки 30.01.2007 г.*

*Oleynik An.A. Informative feature system selection for vehicle classification based on evolutionary search*

The actual problem of informative feature selection for vehicle classification model synthesis is solved. For the first time the new evolutionary methods for feature selection, which allow to allocate more precisely system of informative features are offered. The software which finds the informative feature combination based on suggested methods is developed.

*Oleynik An.A. Выбор системы информативных признаков для классификации транспортных средств на основе эволюционного поиска*

Решена актуальная задача отбора информативных признаков для синтеза классификационных моделей транспортных средств. Впервые предложены новые эволюционные методы отбора признаков, которые позволяют более точно выделить систему информативных признаков по сравнению с традиционными методами отбора признаков. Разработано программное обеспечение, которое с помощью предложенных методов находит комбинацию информативных признаков, наиболее полно отражающую исследуемый объект.

*Oleynik An.A. Вибір системи інформативних ознак для класифікації транспортних засобів на основі еволюційного пошуку*

Вирішено актуальне завдання відбору інформативних ознак для синтезу класифікаційних моделей транспортних засобів. Вперше запропоновано нові еволюційні методи відбору ознак, які дозволяють більш точно виділити систему інформативних ознак у порівнянні із традиційними методами відбору ознак. Розроблено програмне забезпечення, що за допомогою запропонованих методів знаходить комбінацію інформативних ознак.

УДК 62.19:519.7

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ

*Олейник Ал.А.*

Запорожский национальный технический университет

### **Введение**

Метод муравьиных колоний является эвристическим, итеративным методом случайного поиска. Данный метод был впервые предложен в [1, 2] и представлял собой мультиагентный метод для решения комбинаторных оптимизационных задач, таких как задача коммивояжёра и квадратичная задача о назначениях. В дальнейшем данный метод нашёл применения в решении других различных оптимизационных задач.

*Целью работы* является анализ модификаций метода муравьиных колоний: его биологических предпосылок, основных моделей работы и применений этих моделей для решения оптимизационных задач.

Модели работы метода муравьиных колоний анализируются на примере решения задачи коммивояжёра – первой задачи, которая решалась с помощью данного метода.

*Постановка задачи* коммивояжёра заключается в следующем. Пусть задан граф  $G = (V, E)$ , где  $V$  – множество городов, по которым может перемещаться коммивояжёр,  $|V|=n$ ;  $E$  – множество граней, которые характеризуют дороги. Коммивояжёр должен совершить путь, начиная от города  $v_1$ , пройдя через все остальные города и вернувшись обратно к городу  $v_1$ . При этом заданы веса граней  $w_{ij}$ , характеризующие длину дорог соответственно между городами  $v_i$  и  $v_j$ . Тогда задача коммивояжёра заключается в нахождении такого пути, при котором суммарная длина пути была бы минимальной.

### **1. Биологические предпосылки метода муравьиных колоний**

Под социальностью подразумевается, что некоторые насекомые, включая муравьев различных видов и термитов, а также некоторые подвиды пчел и ос, живут в колониях, состоящих из большого количества взаимодействующих индивидуумов. Колонии насекомых способны к решению различных задач оптимизации, которые ни одно насекомое не было бы способно решить уединённо, в частности, нахождение кратчайших путей в процессе кормодобывания, решение задачи при назначении рабочей силы и кластеризация при организации гнезд.

Для роя насекомых необходима некоторая форма связи, чтобы сотрудничать при решении задачи. Эта связь между индивидуумами колонии может быть более или менее прямой, в зависимости от их разновидностей. Когда пчела находит источник пищи, она сообщает направление и расстояние до местоположения, где она нашла пищу другим пчелам, выполняя характерный танец. Это пример прямой связи, поскольку другие пчелы должны воспринимать танец, который выполняет одна пчела, чтобы определить местонахождение источника пищи. Другие формы прямой связи: возбуждение физическим контактом или обменом пищей или жидкостью.

Косвенная связь между индивидуумами колонии является более тонкой и требует, чтобы один индивидуум изменил окружающую среду таким способом, чтобы это изменило поведение индивидуумов, проходящих через эту измененную окружающую среду в будущем.

Один вариант этого типа экологически вызванного воздействия в природе – это, когда термиты строят гнездо, имеющее очень сложную структуру. Здесь проявляются свойства, подобные управлению климатом. Всякий раз, когда стадия строительства заканчивается, рабочая среда меняется, и допускается следующая стадия работы, которая в свою очередь заканчивается новой средой, и т.д.

Другой пример косвенной связи – наложение следов феромона, выполняемое некоторыми разновидностями муравьев. Муравей при кормодобывании отмечает дорожку, оставляя определенное количество феромона вслед за собой, за счёт чего побуждает следовать по его пути другого муравья, который также занимается кормодобыванием. Хотя муравьи имеют королеву, она – специализированный муравей, который является ответственным только за то, чтобы класть яйца и не имеет никакой управляющей функции. Вместо этого, муравьиные колонии самоорганизуются.

Термин самоорганизация (СО) используется, чтобы описать сложное поведение, которое возникает при взаимодействии сравнительно простых агентов. С помощью СО муравьи способны решить сложные задачи, с которыми они сталкиваются ежедневно. Выгоды СО как основания при решении задач особенно очевидны в том, что СО имеет распределенный и здоровый характер. Муравьиная колония может эффективно поддерживать осмысленное поведение, даже если большое количество муравьев неспособно к взаимодействию.

Чтобы лучше понять механизм и способность муравьиных колоний находить хорошие решения при поиске кратчайшего пути от гнезда к источнику пищи, были проведены эксперименты [3, 4]. При проведении экспериментов колонии аргентинских муравьев *Linep-ithema humile* дава-

ли два пути идентичной длины, и после того, как прошло некоторое время, было замечено, что муравьи сходились к одной из дорожек, после чего фактически была исключена альтернатива. Чтобы проверить, будет ли этот вид муравьёв находить наиболее короткий путь из множества путей, был проведен двойной эксперимент моста, где муравьи должны были выбрать дважды между коротким и длинным путями (рис. 1).

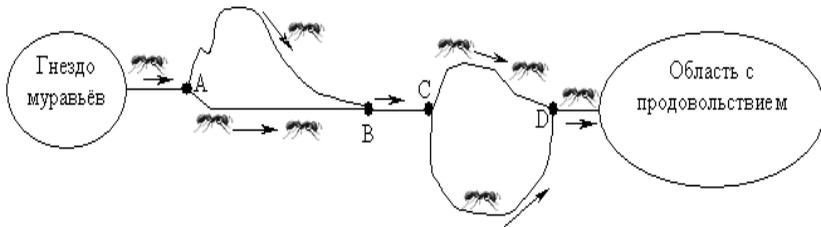


Рисунок 1 – Двойной эксперимент моста

Аргентинский муравей является фактически слепым, поэтому он не имеет никаких непосредственных средств идентификации короткого пути. Однако, несмотря на этот недостаток, как показали результаты эксперимента, колония этих муравьев способна к обнаружению кратчайшего пути, соединяющего гнездо с областью, содержащей пищу.

Первоначально, все муравьи расположены на участке гнезда. Множество муравьев отправляется от гнезда в поиске пищи, каждый муравей оставляет феромон на своём пути, и достигает первойвилки в точке А. Так как муравьи не имеют никакой информации о том, какой путь выбрать, то есть никакой другой муравей не проходил здесь ранее и не оставлял за собой след феромона, каждый муравей будет выбирать идти ему вправо или влево с равной вероятностью. Вследствие этого, приблизительно одна половина муравьев выберет более короткий путь, остальные – более длинный маршрут к пересечению с В.

Муравьи, которые выберут более короткий путь, достигнут этого пересечения быстрее, и должны будут решить, какой способ выбрать, чтобы вернуться. Снова нет никакой информации для муравьев, чтобы использовать её как ориентир, поэтому половина муравьев, достигших пересечения В возвратится к гнезду, в то время как остальные продолжают перемещение к области, содержащей пищу. Муравьи на более длинном участке между пересечениями А и В, незатронутым другими муравьями, которых они встретили ранее на прямом участке, достигают пересечения В и также разделятся; однако, так как интенсивность следа феромона, который находится на пути назад к гнезду приблизительно

вдвое больше, чем следа феромона, достигающего области с пищей, большинство возвратится к гнезду, прибывая туда в то же время как и другие муравьи, которые выбрали длинный путь. Поскольку больше муравьев теперь шло по короткому участку между пересечениями А и В по сравнению с длинным, следующие муравьи, покидающие гнездо теперь уже будут более склонны выбрать короткий путь, который является первым удачным выбором при поиске самого короткого пути.

Поведение муравьев на втором мосту в пересечениях между С и D фактически идентично поведению, показанному прежде на первом мосту между пересечениями А и В. В конечном счете, множество муравьев достигнет пищи и соберет некоторое ее количество, чтобы принести назад к гнезду. Достигая пересечения D, муравьи предпочтут короткий участок по тем же самым причинам, что и муравьи, начинающие перемещение из гнезда, и то же самое происходит снова в пересечение В. Так как количество феромона в пересечениях А и С на пути назад к гнезду примерно равно сумме количества феромона на этих двух участках от гнезда, то также наиболее вероятен самый короткий полный путь от области с пищей назад к гнезду при выборе муравьев при возвращении.

Поскольку муравьи непрерывно распределяют феромон во время своего перемещения, короткий путь непрерывно усиливается все большим количеством муравьев, пока количество феромона, помещенного в дальнейшем, относительно других альтернативных маршрутов настолько не высоко, что фактически все муравьи будут использовать самый короткий путь, то есть система сойдётся к самому короткому пути через самоукрепление.

Отметим также, что феромон, используемый муравьями, медленно испаряется через какое-то время, что не оставляет сомнений при объяснении двойного эксперимента моста. Действительно, длины путей, которые не были выбраны в течение некоторого времени, неизменно большие, и эти пути не будут содержать почти никаких следов феромона из-за их испарения после определённого промежутка времени, далее увеличивается вероятность выбора муравьями коротких путей. Следует обратить внимание, что количество феромона на самом коротком пути имеет максимальную ценность, которая обеспечена большим количеством феромона, оставленным муравьями.

Таким образом, можно сделать вывод, что муравьиные колонии решают в природе оптимизационную задачу – нахождение кратчайшего пути. Следовательно, модель их поведения может быть применена для разработки методов оптимизации. На основании модели поведения муравьев при добыче пищи был разработан соответствующий метод оптимизации – метод муравьиных колоний [1].

## 2. Сущность метода муравьиных колоний

Метод муравьиных колоний основан на взаимодействии нескольких *муравьёв* (программных агентов, являющихся членами большой колонии) и используется для решения различных оптимизационных задач. Моделируемые агенты, перемещаясь по графу решений, совместно решают проблему и помогают другим агентам в дальнейшей оптимизации решения.

Базовая идея метода муравьиных колоний состоит в решении оптимизационной задачи путем применения не прямой связи между автономными агентами.

Обобщённая схема работы метода муравьиных колоний представлена на рис. 2.



Рисунок 2 – Обобщённая схема работы метода муравьиных колоний

На этапе *инициализации* задаются параметры метода, обеспечивающие его правильную работу. Далее происходит *передвижение агентов* между узлами графа, в результате чего, после окончания передвижения каждого агента формируются решения, из которых выбирается лучшее на данной итерации. Далее происходит *проверка на окончание работы метода* (критериями окончания работы может быть: заданное количество итераций или некоторый критерий для выбранного решения). После чего, если проверка закончилась успешно,

то происходит *окончание поиска*, в процессе которого выбирается самое лучшее решение из всех, которые встречались на пройденных итерациях. Если же проверка была неуспешной, то производится *обновление граней*, которое заключается в имитации испарения реальных феромонов в природе, и *перезапуск агентов*.

### 3. Обзор разновидностей метода муравьиных колоний

Первой задачей, к которой был применён метод муравьиных колоний, была **задача коммивояжёра**. Основной причиной, в связи с чем была выбрана данная задача, является то, что в ней необходимо находить кратчайший путь, поэтому метод муравьиных колоний легко приспособляется для решения данной задачи.

Для решения данной задачи было разработано несколько различных методов, основанных на оптимизации с помощью муравьиных колоний.

Первым методом, основанным на оптимизации с помощью муравьиных колоний, был **метод муравьиных систем** (Ant System – AS) [1, 2]. В дальнейшем этот метод послужил основой для многих других методов, работающих на принципе муравьиных колоний.

В методе муравьиных систем агент формирует своё решение в процессе перемещения от одного узла к другому на графе решений. Метод работает до выполнения  $t_{\max}$  итераций. На каждой итерации муравьи составляют свои решения за  $n$  шагов, на каждом из которых применяется правило выбора следующего узла – правило выбора агентом, находящимся в узле  $r$ , следующего узла для перемещения в него.

В [1–2, 5–6] было предложено три метода муравьиных систем, различных между собой способом обновления путей – рёбер. Эти методы назывались: плотностный (ant-density), количественный (ant-quantity) и циклический (ant-cycle) методы муравьиных систем. В плотностном и количественном методах агенты оставляли феромоны в процессе составления решения, в то время как в циклическом методе агенты оставляли феромоны после окончания перемещения, т.е. после составления решения.

Проведенные эксперименты по решению тестовых задач [1, 2, 6] показали, что циклический метод имел значительно лучшие результаты по сравнению с другими двумя. В связи с этим, два худших метода были отброшены. Поэтому, в дальнейшем, под методом муравьиных систем понимается именно циклический метод муравьиных систем.

Количество феромонов  $\tau_m(t)$ , оставляемого агентом, соответствует дуге  $(r, u)$  – это количество характеризует желательность выбора данной грани при перемещении. Информация о феромонах граней изменяется в процессе составления решений. При этом количество феромонов, оставляемое агентами, пропорционально качеству решения, составленного соответ-

ствующим агентом: чем меньше путь, тем больше будет оставлено феромона, и наоборот, чем длиннее путь, тем меньше будет оставлено феромона на соответствующих рёбрах. Такой подход позволяет обеспечить непосредственный поиск в направлении нахождения лучшего решения.

Память об узлах, которые были посещены агентом, обеспечивается путём введения, так называемого списка табу  $tList$  – в нём хранятся номера узлов, уже посещённых агентом. Таким образом, агент должен проходить через каждый узел только один раз. Узлы в списке “текущего путешествия”  $tList$  располагаются в том порядке, в котором агент посещал их. Позже список используется для определения протяженности пути между узлами.

Вероятность выбора  $k$ -ой грани агентом, находящимся в узле  $g$ , определяется формулой:

$$P = \frac{\tau_{ru}(t)^\alpha \cdot \eta_{ru}(t)^\beta}{\sum_{k \in J^r} \tau_{ru}(t)^\alpha \cdot \eta_{ru}(t)^\beta},$$

где  $J^r$  – множество граней, ещё не посещённых агентом, и которые являются смежными для узла  $g$ ;  $\tau_{ru}(t)$  – интенсивность феромона на грани между узлами  $g$  и  $u$ , которые образуют  $k$ -ую грань, в момент времени  $t$ ;  $\eta_{ru}(t)$  – функция, которая представляет измерение обратного расстояния для грани, и является априорной эвристической информацией о пригодности данной грани. Параметры  $\alpha$  и  $\beta$  подчёркивают степень влияния количества феромонов и априорной информации при выборе следующей грани. Т.е. если  $\alpha = 0$ , то выбора следующей грани фактически определяется по  $\eta_{ru}(t)^\beta$ . Если  $\beta = 0$ , то выбор следующей грани основывается исключительно на информации о феромонах, такой подход приводит к стагнации при поиске решения. Эти параметры определяются экспериментально.

Итерация заканчивается, когда каждый агент закончит перемещение, т.е. составит последовательность из  $n$  городов. После чего происходит обновление информации о количестве феромонов граней. В данном методе сначала выполняется уменьшение количества феромонов, которые было ранее (это соответствует испарению феромонов в природе), после чего выполняется добавление количества феромонов, которое было оставлено агентами при перемещении:

$$\tau_{ru}(t+1) = \tau_{ru}(t) \cdot \rho + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ru}^k(t),$$

где  $m$  – количество агентов, решавших задачу;  $\tau_{ru}(t+1)$   $\tau_{ru}(t)$  – новое и старое количество феромонов на грани  $(g, u)$ , соответственно;  $\Delta \tau_{ru}^k(t)$  – количество феромона, оставленное  $k$ -ым агентом при перемещении на грани  $(g, u)$ ; константа  $\rho$  характеризует интенсивность испарения феромона и принимает значение между 0 и 1.

Количество феромона  $\Delta\tau_{ru}^k(t)$ , оставленное  $k$ -ым агентом при перемещении на грани  $(r, u)$  определяется по формуле:

$$\Delta\tau_{ru}^k(t) = \frac{1}{L^k(t)},$$

в случае если дуга  $(r, u)$  была посещена  $k$ -ым агентом, в противном случае:  $\Delta\tau_{ru}^k(t) = 0$ . Здесь  $L^k(t)$  – длина пути  $k$ -го агента.

В дальнейшем были разработаны расширения метода муравьиных систем. К ним относятся: метод муравьиных систем, основанный на элитной стратегии [1, 7]; метод муравьиных систем, основанный на ранжировании ( $AS_{rank}$ ) [8]; метод муравьиных колоний [9–11]; максимальный метод муравьиных систем ( $MAX-MIN AS - MMAS$ ) [12–14].

Первым расширением метода муравьиных систем была **элитная стратегия**, предложенная в [1, 7]. Данный подход основывается на дополнительном увеличении количества феромонов для лучшего глобального пути в данный момент времени  $t$ . Таким образом, процедура добавления феромона для дуг, которые входят лучший на данный момент времени путь, выполняется повторно, при этом количество добавляемого феромона рассчитывается в соответствии с длиной лучшего пути.

Далее был предложен **метод муравьиных систем, основанный на ранжировании ( $AS_{rank}$ )** [8]. Данный метод по своей сути является расширением элитной стратегии и заключается в следующем: агенты сортируются по длине составленных ими путей, после чего на глобально лучшем пути феромоны увеличиваются с весом  $w$ , а также увеличение феромонов производится также только для дуг, вошедших в пути  $(w-1)$  лучших агентов; при этом  $k$ -ый лучший агент будет добавлять феромон с весом  $(w-k)$ :

$$\tau_{ru}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ru}(t) + w \cdot \Delta\tau_{ru}^{gb}(t) + \sum_{k=1}^{w-1} (k-w) \cdot \Delta\tau_{ru}^k(t),$$

где  $\Delta\tau_{ru}^{gb}(t) = 1/L^{gb}(t)$ ,  $L^{gb}(t)$  – длина лучшего глобального пути.

**Метод муравьиных колоний** ( $Ant Colony System - ACS$ ) [9–11] улучшает метод муравьиных систем путём использования информации, полученной предыдущими агентами, для изучения пространства поиска. Это достигается с помощью двух механизмов. Во-первых, используется строгая элитная стратегия при обновлении феромонов на границах. Во-вторых, агенты выбирают следующий город для перемещения, используя, так называемое, *псевдослучайное пропорциональное правило* [10]: с вероятностью  $q_0$  агент перемещается в пункт  $u$ , для которого произведение количества феромонов и эвристической информации является максимальным:  $u = \arg \max_{i \in J'} \{ \tau_{ru} \cdot \eta_{ru}(t)^\beta \}$ , в то время как с вероятностью  $1-q_0$  будет применён базовый подход при определении следующего пункта для пере-

хода, описанный в методе муравьиных систем. Значение  $q_0$  является константой. При этом если  $q_0$  стремится к 1, то используется только псевдослучайное пропорциональное правило, когда же  $q_0 = 0$ , тогда метод муравьиных колоний работает по принципу метода муравьиных систем.

При обновлении путей, как было сказано выше, применяется строгая элитная стратегия, в соответствии с которой только агент, составивший лучшее решение, вырабатывает феромон на пути своего перемещения. Тогда количество феромонов на гранях будет изменяться в соответствии с формулой:  $\tau_{ru}(t+1) = \rho \cdot \tau_{ru}(t) + (1 - \rho) \cdot \Delta \tau_{ru}^{best}(t)$ .

В качестве лучшего агента может использоваться агент, получивший лучшее решение на данной итерации, или глобально лучший агент, получивший лучшее решение на всех итерациях от начала работы метода.

Последним отличием метода муравьиных колоний является то, что агенты обновляют количество феромонов в процессе составления решения (подобно плотностному и количественному методам муравьиных систем). Такой подход приводит к уменьшению вероятности выбора одинаковых путей всеми агентами. За счёт этого понижается вероятность заикливания в локальном оптимуме.

**Макси-минный метод муравьиных систем (MAX-MIN AS – MMAS)** [12–14] вводит нижнюю и верхнюю границу для возможных значений феромонов на грани, а также данный метод отличается подходом к определению их значения при инициализации. Практически в MMAS используется интервал значений феромонов, ограниченный  $\tau_{\min}$  и  $\tau_{\max}$ , т.е.  $\forall \tau_{ru}: \tau_{\min} \leq \tau_{ru} \leq \tau_{\max}$ . Количество феромонов граней при инициализации задаётся равным нижней границе интервала, что обеспечивает лучшее исследование пространства решений. В MMAS, также как и в ACS, только лучший агент (глобально лучший или локально) выполняет добавление феромонов после каждой итерации метода. Результаты вычислений [14] показали, что лучшие результаты получаются, когда обновление феромонов выполняется с использованием глобально лучшего решения. В MMAS также часто применяется локальный поиск для улучшения его свойств.

В общем виде различия между разновидностями метода муравьиных колоний можно отобразить в табл. 1.

В дальнейшем описанные модели метода муравьиных колоний применялись для решения других оптимизационных задач. **Квадратичная задача о назначениях** решалась с помощью метода муравьиных систем [15–17], а также MMAS [18]. Применение данных методов заключалось в использовании соответствующей эвристической информации данной задачи. Также решались следующие задачи: **задача календарного планирования** [7, 19], **транспортная задача** [20–23], **задача выбора кратчайшей общей надпоследовательности** [24, 25], **задача**

**раскраски графа [26], задача последовательного упорядочивания [27].** При решении тестовых задач методы муравьиных колоний показали хорошие результаты по сравнению с традиционными методами оптимизации, предназначенными для решения данных задач [19–27].

Таблица 1 – Различия между разновидностями метода муравьиных колоний

Критерий	AS	AS <sub>rank</sub>	ACS	MMAS
Добавление феромонов	Осуществляется после получения решения		Происходит в процессе составления решения	
Применение элитной стратегии	Все агенты участвуют в обновлении путей	Обновление выполняют ( $w-1$ ) локально лучших агентов и глобально лучший агент	Обновление выполняет только лучший (глобально или локально) агент	
Другие особенности	–	–	Используется псевдослучайное пропорциональное правило	Используется интервал значений феромонов

Также автором данной работы были предложены модификации метода муравьиных колоний для решения задачи отбора информативных признаков: модификация на основе представления пунктов назначения признаками [28, 29] и в виде информативности признаков [30], с использованием операций над чёткими множествами [30], с использованием операций над нечёткими множествами [30]. С помощью разработанных модификаций решены задачи отбора признаков для расчета коэффициентов упрочнения деталей авиадвигателей. Полученные результаты показали, что модели, составленные на основе отбора информативных признаков с помощью предложенных методов, обеспечивают более высокую точность по сравнению со статистическими методами и методом полного перебора [31].

### Заключение

С целью обобщения информации о различных реализациях метода муравьиных колоний проведен сравнительный анализ его разновидностей.

*Практическая ценность* работы состоит в том, что на основе проведенного анализа предложены рекомендации о возможности применения конкретной разновидности метода муравьиных колоний для решения определённого класса оптимизационных задач.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР “Научно-методические основы и математическое обеспечение для автоматизации и моделирования процессов управления и поддержки принятия решений на основе процедур распознавания и эволюционной оптимизации в нейросетевом и нечеткологическом базисах” (№ гос. регистрации 0106U008621).

### Перечень ссылок

1. *Dorigo M.* Optimization, Learning and Natural Algorithms. – Milano: Politecnico di Milano, 1992. – 140 p.
2. *Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A.* Positive feedback as a search strategy. – Milano: Politecnico di Milano, 1991. – 22 p.
3. *Goss S., Aron S., Deneubour J.-L., Pasteels J.M.* Self-organized shortcuts in the argentine ant // *Naturwissenschaften*. – 1981. – №76. – P. 579 – 581.
4. *Deneubour J.-L., Aron S., Goss S., Pasteels J.M.* The self-organizing exploratory pattern of the argentine ant // *Journal of Insect Behavior*. – 1990. – №3. – P. 159–168.
5. *Di Caro G., Dorigo M.* Two ant colony algorithms for best routing in datagram networks // *Proceedings of the Tenth IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS'98)* / Eds.: Y. Pan, S.G. Akl, K. Li. – Anaheim: IASTED/ACTA Press, 1998. – P. 541–546.
6. *Leguizamón G., Michalewicz Z.* A new version of Ant System for subset problems // *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC'99)*. – NJ: IEEE Press, 1999. – P. 1459–1464.
7. *Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A.* The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. – 1996. – Part B, №26(1). – P. 29–41.
8. *Bullnheimer B., Hartl R.F., Strauss C.* A new rank-based version of the Ant System: A computational study // *Central European Journal for Operations Research and Economics*. – 1999. – №7(1). – P. 25–38.
9. *Gambardella L. M., Dorigo M.* Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies // *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'96)*. – NJ: IEEE Press, 1996. – P. 622–627.
10. *Dorigo M., Gambardella L.M.* Ant Colony System: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem // *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. – 1997. – №1(1). – P. 53–66.
11. *Dorigo M., Gambardella L.M.* Ant colonies for the traveling salesman problem // *BioSystems*. – 1997. – №43. – P. 73–81.
12. *Stützle T., Hoos H.H.* The MAX–MIN Ant System and local search for the traveling salesman problem // *Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'97)* / Eds.: T. Back, Z. Michalewicz, and X. Yao. – NJ: IEEE Press, 1997. – P. 309–314.

13. *Stützle T.* Local Search Algorithms for Combinatorial Problems: Analysis, Improvements, and New Applications. – Sankt Augustin: Infix, 1999. – 18 p.

14. *Stützle T., Hoos H.H.* MAX-MIN Ant System // Future Generation Computer Systems. – 2000. – №16(8). – P. 889–914.

15. *Maniezzo V., Colorni A., Dorigo M.* The ant system applied to the quadratic assignment problem. – Bruxelles: Universite Libre de Bruxelles, 1994. – 24 p.

16. *Maniezzo V.* Exact and approximate nondeterministic tree-search procedures for the quadratic assignment problem. – Bologna: Universita di Bologna, 1998 – 102 p.

17. *Maniezzo V., Colorni A.* The ant system applied to the quadratic assignment problem // Knowledge and Data Engineering. – 1999. – №5 (11). – P. 769–778.

18. *Stützle T., Hoos H.* MAX-MIN Ant system and local search for combinatorial optimization problems // Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization / Eds.: S. Vo., S. Martello, I.H. Osman, and C. Roucairol. – Boston: Kluwer, 1998. – P. 137–154.

19. *Colorni A., Dorigo M., Maniezzo V., Trubian M.* Ant system for job-shop scheduling // Belgian Journal of Operations Research, Statistics and Computer Science (JORBEL). – 1994. – №34. – P. :39–53.

20. *Bullnheimer B., Strauss C.* Tourenplanung mit dem ant system. – Wien: Instituts für Betriebswirtschaftslehre, Universit at Wien, 1996. – 26 p.

21. *Bullnheimer B., Hartl R.F., Strauss C.* An improved ant system algorithm for the vehicle routing problem. – Vienna: Institute of Management Science, University of Vienna, 1997. – 28 p.

22. *Bullnheimer B., Hartl R.F., Strauss C.* Applying the ant system to the vehicle routing problem // Meta-Heuristics: Advances and Trends in Local Search Paradigms for Optimization / Eds.: I. H. Osman S. Vo., S. Martello and C. Roucairol. – Boston: Kluwer, 1998. – P. 109–120.

23. *Gambardella L.M., Taillard E., Agazzi G.* Macs-vrptw: A multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows // New Methods in Optimisation / Eds.: D. Corne, M. Dorigo, and F. Glover. – McGraw-Hill, 1999. – P. 63–79.

24. *Michel R., Middendorf M.* An island model based ant system with lookahead for the shortest supersequence problem // Proceedings of PPSN-V, Fifth International Conference on Parallel Problem Solving from Nature / Eds.: A. E. Eiben, T. Back, M. Schoenauer, H.-P. Schwefel. – Verlag: Springer, 1998. – P. 692–701.

25. *Michel R., Middendorf M.* An ACO algorithm for the shortest common supersequence problem // New Methods in Optimisation / Eds.: D. Corne, M. Dorigo, F. Glover. – McGraw-Hill, 1999. – P. 525–537.

26. *Costa D., Hertz A.* Ants can colour graphs // Journal of the Operational Research Society. – 1997. – №48. – P. 295–305.

27. *Gambardella L.M., Dorigo M.* HAS-SOP: An hybrid ant system for the sequential ordering problem. – Lugano: CH, 1997. – P. 237–255.

28. *Олейник Ал.А., Субботин С.А.* Мультиагентный метод выделения информативных признаков для синтеза моделей объектов управления // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та

інформаційних технологій: Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції, м. Запоріжжя, 13-15 квітня 2006 р. / Під заг. ред. Д.М. Пізи. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2006. – С. 181–183.

29. Субботин С.А., Олейник А.А., Яценко В.К. Отбор информативных признаков на основе модифицированного метода муравьиных колоний // Радиоэлектроника та інформатика. – 2006. – № 1. – С. 65–69.

30. Субботин С.А., Олейник Ал.А. Сравнение модификаций метода муравьиных колоний при отборе информативных признаков // Моделирование неравновесных систем: Материалы IX Всероссийского семинара, 13-15 октября 2006 г. / Под ред. В.В. Слабко. Отв. за выпуск М.Ю. Сенашова. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2006. – С. 175–177.

31. Богуслаев В.А., Яценко В.К., Притченко В.Ф. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД. – К.: Манускрипт, 1993. – 333 с.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Таланин И.Е. (Запорожье, Гуманитарный университет "ЗИГМУ").

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.02.2007 г.).

*Поступила 11.01.2007 г. После доработки 30.01.2007 г.*

### ***Oleynik Al.A. The comparative analysis of optimization methods based on ACO-methods***

The actual task of ACO-method versions analysis is solved. The comparative analysis of ACO-method versions and their application for the solving various optimization problems is offered.

### ***Олейник Ал.А. Сравнительный анализ методов оптимизации на основании метода муравьиных колоний***

Решена актуальная задача анализа разновидностей метода муравьиных колоний. На основе проведенного анализа предложены рекомендации о возможности применения конкретной разновидности метода муравьиных колоний для решения определённого класса оптимизационных задач.

### ***Олійник Ол.О. Порівняльний аналіз методів оптимізації на основі методу мурашиних колоній***

Вирішено актуальне завдання аналізу різновидів методу мурашиних колоній. На основі проведеного аналізу запропоновано рекомендації щодо можливості застосування конкретного різновиду методу мурашиних колоній для вирішення визначеного класу оптимізаційних задач.

УДК 519.71

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА НА ПОКАЗАТЕЛИ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

*Федорченко Е.Н.*

Запорожский национальный технический университет

### **Введение**

Исследование и применение генетических алгоритмов (ГА) является важной частью современных информационных технологий. Использование этих алгоритмов позволяет решать различные классы задач оптимизации. Возможно их применение для решения комбинаторных задач или оптимизации различного вида функций, для настройки нейронных сетей или параметров систем поддержки принятия решений. При этом работа алгоритма является эффективной, она позволяет решать сложные оптимизационные задачи и, в тоже время, опирается на твердую теорию [1,2].

Особенностью генетических алгоритмов является то, что они опираются на естественную эволюцию в природе и исходя из принципов наследования и эволюционного отбора. Моделирование процесса естественной эволюции и его применение для решения задач оптимизации – это важная задача для данного направления.

Несмотря на то, что базовые принципы генетических алгоритмов появились еще в середине 70-х годов прошлого века (в первую очередь благодаря работам Дж. Холланда), их исследование и совершенствование остаются актуальными и в настоящее время.

Также можно отметить, что, несмотря на существование ряда программных продуктов, реализующих генетические алгоритмы, говорить о вопросе исследования различных форм ГА как о полностью обработанном явно преждевременно [2,3].

*Задачей* данной работы являлось исследование генетических операторов с целью определения зависимости достигаемой точности оптимизируемого функционала от количества используемых точек мутаций и скрещивания.

### **1. Исследование операторов ГА**

Важным фактором, влияющим на эффективность генетического алгоритма, является оператор отбора. Слепое следование принципу

«выживает сильнейший» может привести к сужению области поиска и попаданию найденного решения в область локального экстремума целевой функции. С другой стороны, слишком слабый оператор отбора, может привести к замедлению роста качества популяций, а значит, и к замедлению поиска. Кроме того, популяция при этом может не только не улучшаться, но и ухудшаться [4–7].

Для выяснения влияния операторов ГА на точность его работы были проведены следующие вычислительные эксперименты.

В ходе работы было проведено более 2500 тестов. Ниже приведена табл. 1 с наилучшими показателями точности относительно количества точек мутации, в которой представлено 10 лидеров. Тесты проводились со следующими параметрами: итераций (поколений) – 100; особей – 10; тип мутации – многоточечная; вероятность мутации – 3%; тип селекции – пропорциональная; тип кроссовера – многоточечный; точность вычислялась по результатам 10 тестов. Точность определялась как 100% – ошибка, выраженная в процентах.

Таблица 1 – Наилучшие показатели точности относительно точек мутации

Количество точек мутации	Точность, %	Количество точек мутации	Точность, %
5	64,02	8	63,5
6	65,19	9	64,13
9	64,13	10	65,33
20	61,9	2	64,83
4	65,15	10	65,33
3	65,31	8	64,65
5	64,02	4	64,79
4	64,79	7	63,06
3	63,69	3	65,31
7	64,56	20	63,38

По данным, представленным в табл. 1, можно выделить два несомненных лидера – это тесты, в которых количество точек мутации и скрещивания было соответственно (5,6) и (4,3), так как при таких параметрах ГА показал наиболее точные результаты.

## 2. Эксперименты и результаты

В табл. 2 приведены результаты тестов, по которым можно выявить наиболее подходящий тип селекции. Тесты проводились при

следующих настройках: итераций – 100; особей – 10; тип мутации – многоточечная; вероятность мутации – 3%; тип кроссовера – многоточечный; точек мутации – 4; точек селекции – 3.

Таблица 2 – Анализ точности (%) для разных типов селекции

Номер эксперимента	Тип селекции			
	Простой	Пропорциональный	Турнир(2)	Усечение(15)
1	50	50	59,38	50
2	50	50	87,5	50
3	50	90,63	71,88	71,88
4	75	50	62,5	50
5	50	90,63	50	50
6	50	90,63	50	50
7	50	50	50	50
8	50	50	50	50
9	59,385	50	56,25	50
10	78,13	90,63	59,38	50
Среднее	56,25	66,25	59,69	52,19

Наилучшие результаты были достигнуты в случае использования пропорционального типа селекции.

В таблице 3 приведены результаты тестов, по которым можно выявить наиболее подходящий тип кроссовера: итераций – 100; особей – 10; тип мутации – многоточечная; вероятность мутации – 3%; тип селекции – пропорциональная; точек мутации – 4; точек селекции – 3.

На рис. 1 показан график разброса точности оценок оптимизируемого функционала.

Данный рисунок подтверждает стохастичность ГА. Вследствие стохастичности ГА все результаты проведенных тестов усреднялись, чтобы более точно отображать общие свойства ГА. Следует отметить, что основная масса точек сконцентрирована между 60 и 70 процентами точности.

На рис. 2 показана зависимость точности от количества точек скрещивания.

Рис. 2 отображает зависимость точности от количества точек скрещивания. На графике наблюдается зависимость, близкая к линейной, однако график содержит сильные отклонения – «всплески» (ранняя сходимость метода либо наоборот – вход в локальный мак-

симум, вследствие чего – низкая точность), что объясняется стохастичностью ГА.

Таблица 3 – Анализ точности (%) для разных типов кроссовера

Номер эксперимента	Случайный кроссовер	Многоточечный кроссовер	Универсальный кроссовер	Сравнительный кроссовер
1	50	90,63	50	90,63
2	90,63	50	50	56,25
3	50	78,13	50	56,25
4	50	53,13	50	50
5	50	50	87,5	93,75
6	50	68,75	50	93,75
7	90,63	59,38	50	93,75
8	78,13	78,13	50	50
9	56,25	75	50	50
10	71,88	62,5	50	50
Среднее	63,75	66,56	53,75	68,44

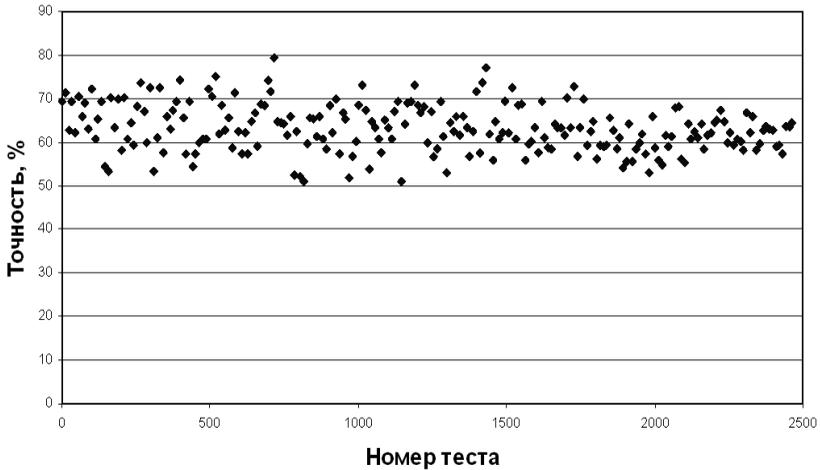


Рисунок 1 – Разброс точности оценок

Опуская «всплески» можно отметить, что для данной модели ГА наблюдается низкая точность при одной точке скрещивания, а потом, уже при двух точках скрещивания следует подъем, далее посте-

пенный спад. Из рис. 2 можно сделать вывод, что при однократном кроссвере данный метод имеет плохую сходимость, что объясняется сложностью выхода ГА из точек локального максимума.

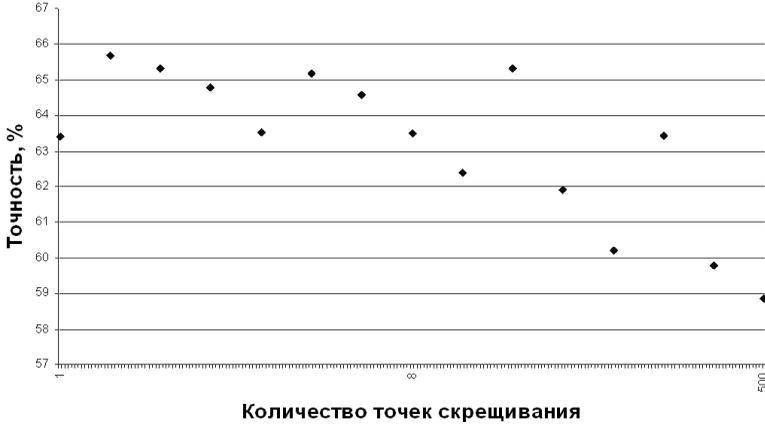


Рисунок 2 – Влияние количества точек скрещивания на точность

На рис. 3 показана зависимость точности ГА от количества точек мутации.

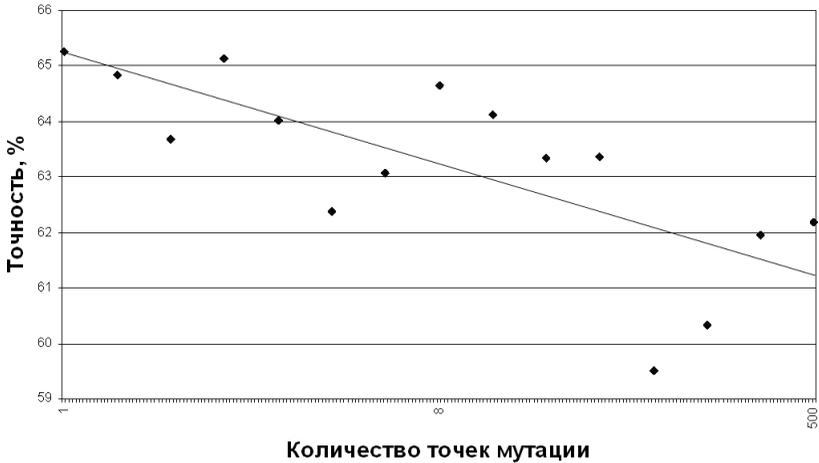


Рисунок 3 – Зависимость точности от количества точек мутации

Зависимость на рис. 3 просматривается с трудом, тем не менее, ее представляется возможным аппроксимировать прямой, которая показана на графике тонкой линией. Таким образом, можно сказать, что при увеличении количества точек мутации, вероятность достижения положительного результата уменьшается. Это можно объяснить тем, что при увеличении количества точек мутации, ГА ведет себя более «агрессивно», что приводит к частым «вредным» мутациям, что в свою очередь приводит к ухудшению сходимости алгоритма.

### Заключение

*Научная новизна* работы заключается в том, что: проведен анализ операторов ГА и выявлены зависимости влияния операторов на точность оптимизируемого функционала.

*Практическая ценность* работы состоит в том, что проведенные исследования позволили выработать рекомендацию по заданию количества точек мутации и скрещивания в ГА: рекомендуется применять 4 точки мутации и 5 точек скрещивания.

Для повышения эффективности ГА необходимо решить следующие задачи:

- увеличить скорость нахождения решения;
- обеспечить возможность сокращения пространства поиска;
- повысить адаптивные свойства алгоритма.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР "Научно-методические основы и математическое обеспечение для автоматизации и моделирования процессов управления и поддержки принятия решений на основе процедур распознавания и эволюционной оптимизации в нейросетевом и нечеткологическом базисах" (№ гос. регистрации 0106U008621).

### Перечень ссылок

1. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. с польск. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
2. Назаров А.В. Лоскутов А.И. Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. – СПб.: Наука и техника, 2003. – 384 с.
3. Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. – Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975. – 97 p.
4. *The Practical Handbook of Genetic Algorithms. Volume I. Applications* / Ed. by L.D. Chambers. – Florida: CRC Press, 2000. – 520 p.
5. Вороновский Г.К., Махотило К.В., Петрашев С.Н., Сергеев С.А. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. – Харьков: Основа, 1997. – 112 с.

6. *Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы: Монография. – Таганрог: ТРТУ, 1998. – 185 с.

7. *Beasley D., Bull D.R., Martin R.R.*, An Overview of Genetic Algorithms: Part I: Fundamentals // *University Computing.*– 1993.– №2.– P. 58–69.

**Рецензент** – д.ф.-м.н., проф. Шамровский А.Д. (Запорожье, Запорожская государственная инженерная академия).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.01.2007 г.).

*Поступила 15.01.2007 г. После доработки 24.01.2007 г.*

***Fedorchenko E.N. Research of influence of genetic algorithm parameters on parameters of its efficiency***

The work is devoted to definition of significant characteristics of genetic algorithm, effective combinations and constructions of genetic operators, optimum likelihood parameters. The analysis of genetic operators such as tournament, simple and proportional selection, and also a crossover (casual, multi-point, universal) is lead in the work. The experiments are conducted and recommendations on application of genetic operators and on choosing of quantities of mutation and crossover points are given.

***Федорченко Е.Н. Исследование влияния параметров генетического алгоритма на показатели его эффективности***

Работа посвящена определению значимых характеристик генетического алгоритма, эффективных сочетаний и конструкций генетических операторов, оптимальных вероятностных параметров. В работе проведен анализ операторов ГА, таких как турнирный, простой, пропорциональный отбор, кроссовер (случайный, многоточечный, универсальный). Проведены эксперименты и даны рекомендации по применению операторов ГА и количества точек мутации и скрещивания.

***Федорченко Є.М. Дослідження впливу параметрів генетичного алгоритму на показники його ефективності***

Роботу присвячено визначенню значимих характеристик генетичного алгоритму, ефективних сполучень і конструкцій генетичних операторів, оптимальних імовірнісних параметрів. У роботі проведений аналіз операторів ГА, таких як турнірний, простий, пропорційний відбір, кроссовер (випадковий, багаточковий, універсальний). Проведено експерименти й дані рекомендації із застосування операторів ГА й кількості точок мутації й схрещування.



**Математичне та комп'ютерне  
моделювання**

**Mathematical and computer modeling**

**Математическое и компьютерное  
моделирование**

УДК 681.3.07

## **ОНТОЛОГИЯ ДИСТАНЦИОННОГО УЧЕБНОГО КУРСА**

*Притула А.В., Табунцик Г.В.*

Запорожский национальный технический университет

### **Введение**

Отличительной особенностью современного образования является использование инновационных технологий, в результате внедрения которых широкое распространение в мире получили методы электронного дистанционного образования (e-learning).

Преимущество e-learning состоит в том, что оно позволяет самостоятельно формировать и изменять образовательный контент обучающимся. E-learning проходит под лозунгом «ориентированность на обучаемого». Переход на данную форму обучения это более чем просто адаптация традиционных программ к различным стилям обучения или возможность для студента сменить шрифт и цвет фона в материале. Это – переход полного контроля за обучением в руки обучаемого, что в свою очередь приводит к переосмыслению правил построения учебных курсов и преподавателем.

*Целью работы* являлось выполнить обзор ресурсов, посвященных поддержке электронного дистанционного образования (ДО) на Украине и рассмотреть общую схему построения учебного курса с учетом международных стандартов.

### **1. Краткий обзор ресурсов и платформ для дистанционного обучения**

Для поддержки развития e-learning в Украине были созданы и успешно функционируют два крупномасштабных портала: Украинский институт информационных технологий в образовании (<http://ude.cntu-kpi.kiev.ua>) и Украинская система дистанционного образования

(www.udl.org.ua). Основными задачами которых являются подготовка проектов нормативно-правовых документов, координация деятельности региональных центров дистанционного образования, разработка международных курсов с учетом международных стандартов ДО, разработка и внедрение наиболее эффективных информационно-обучающих программных средств, проведение обучения специалистов по дистанционному образованию и т.д.

Как видно из вышесказанного, одной из основных задач современного этапа развития дистанционного образования в Украине является разработка учебно-методических комплексов дистанционного обучения и их сертификация.

На сегодняшний день существует множество систем поддержки дистанционного обучения (СПДО). Среди украинских вузов наиболее распространены Международная СПДО платформа Moodle (www.moodle.org) и СПДО IBM Lotus LearningSpace (www.lotus.com). Среди российских СПДО наиболее популярными являются eLearning3000 компании ГиперМетод (www.hypermethod.ru) и СПДО «Прометей» (www.prometeus.ru). Также можно отметить такие СПДО как WebCT(www.webct.com), Integrity eLearning WBTManage (www.ielearning.com), ElenmentK (www.eelementk.com), Planetau (www.planetau.com), Intralearn (www.intralearn.com), Mindflash (www.mindflash.com), BlackBoard (www.blackboard.com), а также на рынке ДО успешно используются и многие другие. Однако одним из наиболее существенных недостатков данных платформ является то, что они не имеют полной совместимости между собой [1].

Соответственно главным остается разработка содержимого самого дистанционного учебного курса (ДУК), таким образом, чтобы его можно было использовать в любой СПДО с минимальными потерями. Далее рассмотрим основные правила построения ДУК, для систем поддерживающих Shareable Object Reference Model (SCORM), которая является набором стандартов и спецификаций для организации электронного содержимого ДУК [2].

## **2. Модель системы дистанционного обучения**

Для анализа требований к информационным системам широко применяют методы объектно-ориентированного проектирования (ООП). Одним из эффективных средств ООП выступает унифицированный язык моделирования, который будет в дальнейшем использоваться для представления процесса дистанционного обучения [3].

Для создания ДУК необходимо в первую очередь определить его место во всей системе дистанционного обучения. На рис. 1 а) отображены требования ко всему курсу дистанционного образования, а на рис. 1 б) раскрыты требования непосредственно к процессу обучения.

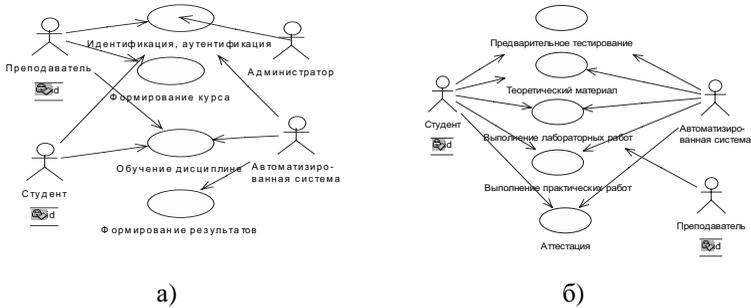


Рисунок 1 – Диаграмма требований к системе дистанционного образования: а) ко всей системе б) к процессу обучения

Содержимое ДУК в соответствии с стандартами SCORM [2] или IMS SS Specification [4] формируется в виде иерархической структуры (рис. 2), где под видом занятий подразумеваются предварительное тестирование, изучение лекционного материала, выполнение онлайн-практических работ, самостоятельное выполнение лабораторных работ при организации соответствующих форм контроля и аттестации, завершающее тестирование, а также другие виды на усмотрение преподавателя.

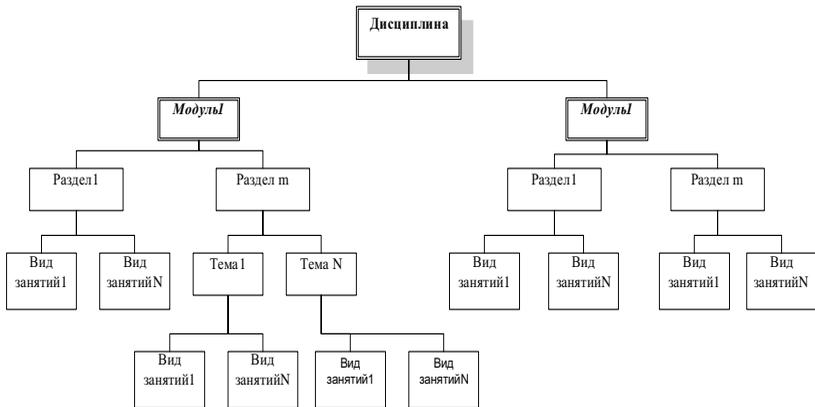


Рисунок 2 – Обобщенная структура ДУК

Данная структура позволяет обеспечивать модульность обучения, возможность использования различных методов обучения в рамках одной дисциплины, возможность повторного использования отдельных модулей в различных курсах.

При организации физических ресурсов для курсов дистанционного образования также целесообразно опираться на стандарты SCORM или IMS SS Specification.

Концептуальная модель ДУК с предложенной структурой приведена на рис. 3.

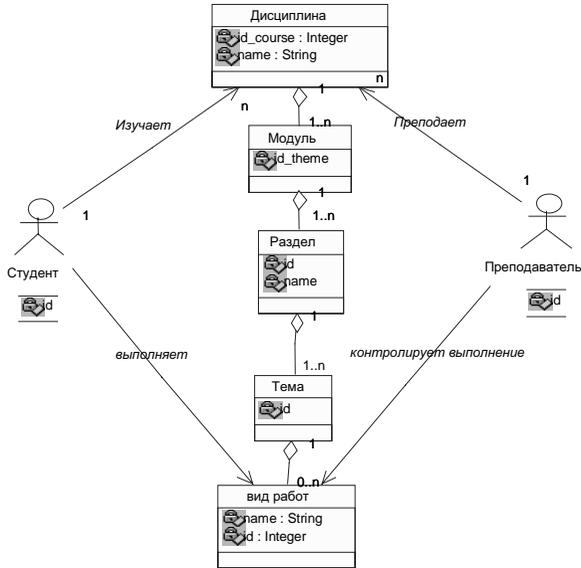


Рисунок 3 – Диаграмма классов для ДУК

Необходимо отметить, для того чтобы обеспечить обучение с учетом начальных знаний студента, необходимо выполнять предварительное тестирование, в результате которого материал, изученный студентом ранее, мог бы быть исключен из процесса обучения (рис. 4).

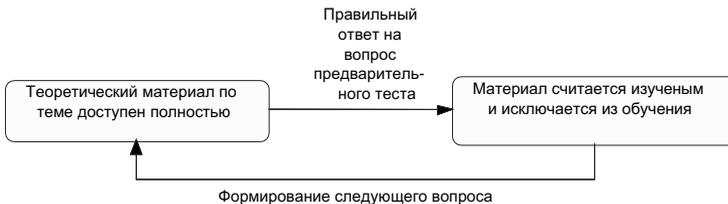


Рисунок 4 – Состояние доступа к теоретическому материалу

Последовательность шагов обучения дистанционному курсу для студента представлена на рис. 5.

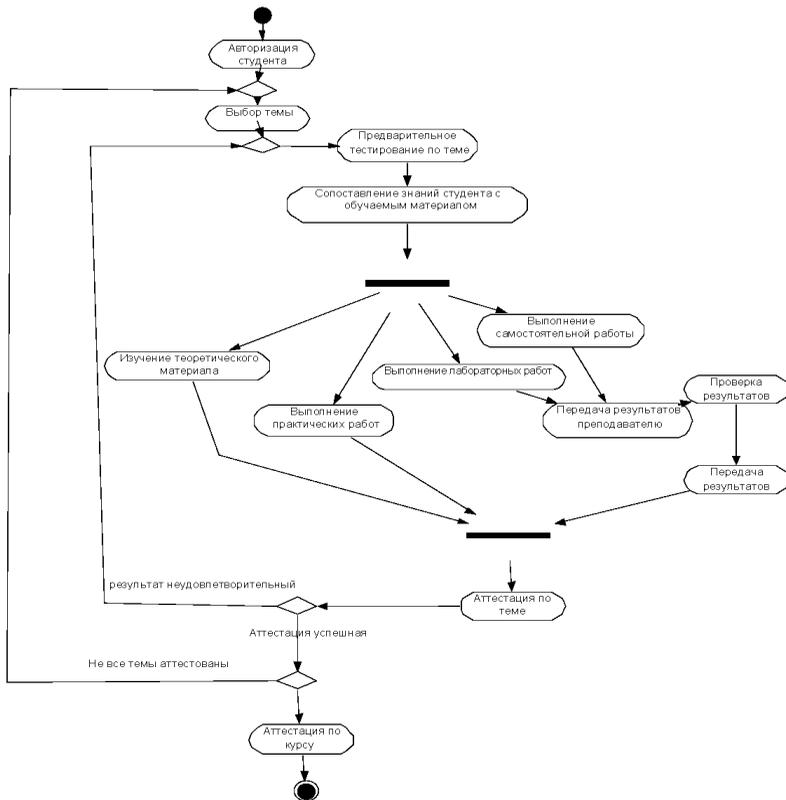


Рисунок 5 – Диаграмма процесса обучения студента

Обобщив вышесказанное необходимо отметить, что для создания дистанционного курса необходимо:

- выполнить анализ аудитории, для которой он предназначен;
- выделить метаданные;
- выполнить проектирование электронного конспекта лекций;
- выполнить разработку физических ресурсов, которые необходимо добавить в курс;
- согласовать виды деятельности и метаданные для дальнейшего внедрения разработанного курса в один из СПДО.

### Заключение

В работе рассмотрен процесс дистанционного обучения в рамках объектно-ориентированной модели, раскрыт процесс обучения дисциплине студента и концептуальная модель изложения дистанционного курса преподавателем.

*Практическая ценность* работы состоит в возможности использования предложенных диаграмм для разработки систем поддержки дистанционного образования, а также для наглядного пособия при разработке курсов дистанционного обучения преподавателями.

Использование рассмотренных принципов построения дистанционных курсов обладает рядом преимуществ, поскольку позволяет учитывать уровни подготовки студентов, а также поддерживать разнообразные методы обучения.

### Перечень ссылок

1. *Valuisky V.* Platforms of distance learning support – the analysis & the compatibility //Journal of Multimedia Aided Educational Research. – 2005. – Vol. 2. – №.1. – P. 103–111.
2. *Dodds Ph., Thropp S.E.* Sharable Content Object Reference Model (SCORM) 2006 3<sup>rd</sup> Edition Content Aggregation Model. – ADL, 2006. – 245p.
3. *Мацяшек Л.А.* Анализ требований и проектирование систем. Разработка информационных систем с использованием UML. Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002. – 432 с.
4. *IMS Simple Sequencing Behavior and Information Model v1.0 Final Specification*, IMS Global Learning Consortium, Inc. – 2003.

#### *Prutula A.V., Tabunshchik G.V.* **E-learning course ontology**

The review of e-learning methods, tools and internet resources are offered in the article. E-learning course architecture based on the tooles of object-oriented analysis is described by the authors.

#### *Притула А.В., Табуницик Г.В.* **Онтология дистанционного учебного курса**

В статье выполнен обзор методов, средств и соответствующих Интернет ресурсов используемых для поддержки дистанционного образования. Представлена архитектура дистанционного курса с использованием средств объектно-ориентированного анализа.

#### *Притула А.В., Табуницик Г.В.* **Онтологія дистанційного навчального курсу**

У статті зроблений огляд методів, засобів та Інтернет ресурсів, що використовуються для підтримки дистанційного навчання. Наведена архітектура дистанційного курсу з використанням засобів об'єктно-орієнтованого аналізу.

УДК 681.3.06

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРЯДКА ГРУППЫ ДИВИЗОРОВ ГИПЕРЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

*Долгов В.И.<sup>1</sup>, Неласая А.В.<sup>2</sup>, Зайцев С.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет радиоэлектроники

<sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет

### Введение

В настоящее время стандарты цифровой подписи основаны на арифметике эллиптических кривых. Действующий украинский стандарт цифровой подписи ДСТУ 4145–2002 основан на преобразованиях в группе точек эллиптических кривых, определенных на поле  $GF(2^m)$ . На сегодня криптопреобразования на эллиптических кривых вполне удовлетворяют требованиям стойкости, однако увеличение мощности вычислительной техники и развитие методов криптоанализа требуют поиска и других источников абелевых групп с улучшенными характеристиками с точки зрения криптостойкости.

Эллиптические кривые являются частным случаем более общего понятия гиперэллиптических кривых. Точки последних не образуют группу, однако источником группы может служить якобиан кривой  $J$ , являющийся факторгруппой группы дивизоров нулевой степени по группе главных дивизоров. Операция сложения дивизоров является более сложной, однако размер основного поля  $F_q$ , над которым определена кривая, уменьшается обратно пропорционально роду кривой при сохранении заданного уровня секретности. Стойкость таких криптосистем зависит от сложности решения задачи дискретного логарифмирования на гиперэллиптической кривой.

Анализ исследований в данном направлении показал, что гиперэллиптические кривые вызвали оживленный интерес у специалистов. Основными проблемами, которые необходимо решить для обеспечения возможности их практического использования, являются: определение классов криптографически стойких кривых, доведение скоростных показателей операций сложения и скалярного умножения дивизоров до практически приемлемых величин, разработка протоколов цифровой подписи и направленного шифрования с использованием данной технологии, разработка методики определения параметров криптосистем на гиперэллиптических кривых за практически приемлемое время.

## 1. Требования к криптосистемам на гиперэллиптических кривых

Гиперэллиптическая кривая – гладкая кривая вида  $y^2 + h(x)y = f(x)$ , где  $f(x)$  – нормированный полином степени  $2g + 1$ ,  $h(x)$  – полином степени максимум  $g$  (род кривой).

В работе [1] рассмотрены некоторые методы решения задачи дискретного логарифмирования на гиперэллиптической кривой. Для построения стойких криптосистем должны соблюдаться следующие условия:

1. Порядок якобиана кривой  $\#J$  должен иметь большой простой делитель  $n$  длиной как минимум 160 бит.

2. Большое простое  $n$  не должно быть делителем  $q^k - 1$  для всех простых  $k$ , для которых проблема дискретного логарифма в конечном поле  $F_{q^k}$  разрешима за практически приемлемое время.

3. Когда  $q$  – простое, не должно быть подгрупп порядка  $q$  в  $J$ .

4. Род кривой  $g$  должен быть достаточно мал. На сегодня известны эффективные методы дискретного логарифмирования кривых большого рода вплоть до рода 4 и 3.

Следовательно, наиболее важным параметром, с точки зрения стойкости, является порядок якобиана  $\#J$ . Зная его, можно проверить приведенные выше условия криптостойкости кривой. Однако, задача определения порядка якобиана не является тривиальной и требует значительных затрат временных и технических ресурсов.

## 2. Методы определения порядка якобиана

Согласно [2] порядок якобиана этой кривой ограничен интервалом Хассе-Вейля

$$\left( (\sqrt{q} - 1)^{2g} \right] \leq \#J / F_q \leq \left( (\sqrt{q} + 1)^{2g} \right\}. \quad (1)$$

Основная идея большинства методов определения порядка заключается в использовании морфизма Фробениуса. Пусть характеристика поля  $K$  равна  $p > 0$ . Тогда возведение элементов поля в степень  $p$  называется абсолютным автоморфизмом Фробениуса:  $\phi_p : x \rightarrow x^p$ .

Расширение  $\phi_p$  на точку проективного пространства дает

$$\phi_p : (x_0, x_1 \dots x_n) \rightarrow (x_0^p, x_1^p \dots x_n^p).$$

Применение  $\phi_p$  к полиномам сводится к возведению в степень  $p$  коэффициентов полинома.

Характеристический полином эндоморфизма Фробениуса – нормированный полином степени  $2g$  с коэффициентами в  $Z$ .

Для кривой рода 2 он имеет вид:

$$\chi_q(t) = t^4 - s_1 t^3 + s_2 t^2 - s_1 q t + q^2. \quad (2)$$

Известно, что  $\#J = \chi_q(1)$ . Следовательно, для кривой 2 рода

$$\#J = \chi_q(1) = q^2 + 1 - s_1(q+1) + s_2. \quad (3)$$

Классический  $l$ -адический алгоритм определения порядка якобиана – гиперэллиптический аналог алгоритма Шуфа заключается в вычислении достаточного количества  $\chi$  по модулю малых простых чисел, работая в подгруппах кручения  $J[l]$ . Затем по китайской теореме об остатках можно восстановить истинное значение  $\chi$ . Основная сложность этого алгоритма связана с высокими порядками обобщенных многочленов деления Кантора. В работе [3] представлена практическая реализация такого алгоритма. Хотя этот алгоритм уже имеет полиномиальную сложность, однако для работы с кривыми, определенными над конечными полями с модулем длиной 80 бит и более, его скорость все еще недостаточна.

Другая группа методов –  $p$ -адические алгоритмы определения порядка якобиана – основаны на каноническом поднятии абелева множества над  $F_p$  в абелево множество над  $\mathcal{O}_p$  (множество  $p$ -адических чисел). Доказано, что такое каноническое поднятие всегда существует, и уникально с точностью до изоморфизма, а, следовательно, существует и поднятие эндоморфизма Фробениуса. Его действие в каноническом поднятии позволяет определить порядок якобиана исходной кривой, определенной над  $F_p$ .

### 3. Расчет порядка якобиана для кривых специального вида

Общими недостатками общих методов являются слишком высокие требования к объемам вычислительных ресурсов, включая время выполнения программ. Выходом из положения может служить применение кривых специального вида, для которых разработаны быстрые алгоритмы определения порядка группы. Алгоритмы определения порядка якобиана для таких кривых выполняются практически мгновенно, что позволяет за приемлемое время протестировать большое количество кривых с целью выбора подходящих для создания криптографической системы. При выборе кривой надо учитывать то обстоятельство, что чем меньше длина модуля, тем быстрее будут выполняться криптографические преобразования, а именно сложение дивизоров, дублирование дивизора, скалярное умножение дивизора на длинное число.

Большинство криптографических приложений базируются на эллиптических или гиперэллиптических кривых с длиной ключа не менее 160 бит, то есть с порядком группы не менее  $2^{160}$ .



рования дивизоров на кривой специального типа  $y^2 = x^5 + ax$  для обеспечения приемлемой скорости выполнения криптографических операций.

### Перечень ссылок

1. Zhang F., Liu S., Kim K. Compact Representation of Domain Parameters of Hyperelliptic Curve Cryptosystems. – 2002. – 11 p. (<http://citeseer.ist.psu.edu/zhang02compact.html>).
2. Cantor D.G. Computing in Jacobian of a Hyperelliptic Curve // Mathematics of Computation. – 1987. – Vol. 48 (177). – P. 95–101.
3. Gaudry P., Harley R. Counting Points on Hyperelliptic Curves over Finite Fields // ANTS IV, LNCS 1838 / Ed. W. Bosma. – Berlin: Springer Verlag, 2000. – P. 297–312.
4. Furukava E., Kawazoe M., Takahashi T. Counting Points for Hyperelliptic Curves of type  $y^2 = x^5 + ax$  over Finite Prime Fields. – 2004. – 14 p. (<http://eprint.iacr.org/181.pdf>).

**Рецензент** – д.т.н., проф. Карпуков Л.М. (Запорожье, ЗНТУ).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.01.2007 г.).

*Поступила* 06.02.2007 г.

### *Dolgov V.I., Nelasa A.V., Zaitcev S.A. Finding the group divisors order of hyperelliptic curve*

The methods of finding of order of the group divisors are considered. The software for special curves by method Furukava allowing to find the order of the Jacobian group was developed. The experiments are conducted. Classes of isomorphic curves which are correspond required for today security level are found.

### *Долгов В.И., Неласая А.В., Зайцев С.А. Определение порядка группы дивизоров гиперэллиптической кривой*

Рассмотрены методы определения порядка группы дивизоров гиперэллиптической кривой. Разработано программное обеспечение, реализующее метод Фурукавы для кривых специального вида и позволяющее определять порядок якобиана кривой за время порядка нескольких секунд. Проведены эксперименты, в результате которых определены классы изоморфных кривых с порядком группы, отвечающим приемлемому уровню секретности.

### *Долгов В.И., Неласа Г.В., Зайцев С.О. Визначення порядку групи дивізорів гіпереліптичної кривої*

Розглянуто методи визначення порядку групи дивізорів гіпереліптичної кривої. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує метод Фурукави для кривих спеціального виду та дозволяє визначити порядок якобіану кривої за декілька секунд. Проведено експерименти, в результаті яких отримано класи ізоморфних кривих с порядком групи, що відповідає прийнятному рівню секретності.

УДК 004.414.23

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕЖПАКЕТНЫХ ИНТЕРВАЛОВ НТТР-СЕАНСА

*Коломоец Г.П.*

Гуманитарный университет "Запорожский институт  
государственного и муниципального управления"

### **Введение**

В настоящее время достаточно распространенным является применение специализированных программных систем для моделирования процессов, происходящих при передаче данных в компьютерных сетях. Такие системы выполняют моделирование на основе данных о топологии сети, используемых протоколах, размере пакетов, интенсивностях их передачи, протяженности линий связи, о типах используемых приложений и т.д. В процессе моделирования активно используются вероятностные методы и стандартные распределения, в частности, при задании продолжительности генерирования/обработки пакетов, определении интервалов времени между пакетами и т.д. [1].

*Целью работы* являлось определение наиболее подходящих распределений плотностей вероятностей для межпакетных временных интервалов экспериментального набора пакетов, захваченных при работе с Интернет.

### **1. Описание эксперимента и экспериментальные данные**

С помощью программы анализатора протоколов NAI Sniffer Pro 4.7 [2] выполнялся захват пакетов при передаче данных между клиентом (компьютером сети с установленным стеком протоколов Ethernet/IP/TCP и НТТР-клиентом MS Internet Explorer) и прокси-сервером локальной сети (программа squid), через который происходит передача НТТР-трафика локальной сети. Кроме исследуемого клиента в локальной сети находились и другие компьютеры, однако сетевую активность они не проявляли (за исключением периодической широковещательной рассылки). Доля служебных (в основном, широковещательных) кадров во время сеанса составила 6,78%. Поскольку запросы НТТР-клиента и ответы НТТР-сервера обычно пересылаются в рамках TCP-сеанса, то достаточно большое количество захваченных пакетов представляли собой TCP-пакеты, устанавливающие и завершающие соединения, в течение которых пересылались данные [3]. Так как в

системах моделирования параметры задаются для приложений, то необходимо отделить HTTP-запросы и ответы от служебных TCP-пакетов (их количества оказываются сравнимыми) (табл. 1).

Таблица 1 – Количественные характеристики выборки

Общее время активности 2-х ПК, сек.	123,94
Общее количество захваченных пакетов	1917
Количество пакетов только между клиентом и сервером	1787
Количество служебных пакетов (широковещательных)	130
Количество HTTP запросов и ответов	887
Количество служебных TCP-пакетов	900
Количество HTTP-запросов	123
Количество HTTP-ответов	764

Количество ответов превышает количество запросов поскольку, если содержимое ответа превышает размер максимального переносимого кадром Ethernet блока в 1500 байт, высылаются несколько кадров с содержимым одного HTTP-ответа. Значения статистических параметров для экспериментальных наборов времен между HTTP-запросами и времен между HTTP-ответами приведены в табл. 2 (времена измеряются в секундах).

Таблица 2 – Статистические параметры наборов времен

Параметр	Для времен между HTTP-запросами	Для времен между HTTP-ответами
Количество испытаний	122	763
Минимальное значение	0,000048	0,000009
Максимальное значение	10,323789	8,849985
Среднее значение	0,992236	0,159238
Дисперсия	4,703899	0,510741
Медиана	0,265827	0,020460
Асимметрия	3,066372	8,812262

## 2. Анализ экспериментальных данных

Одно из важных допущений, принимаемых во многих статистических методах (в частности, при оценке по критерию "Хи-квадрат"), предполагают независимость (или случайность) выборки анализируемых данных из какого-либо распределения. С целью определения выборочной независимости экспериментальных данных были построены диаграммы разброса наблюдений для пар времен между HTTP-запросами и пар времен между HTTP-ответами (рис. 1). Характер разброса позволяет заключить, что выборочные данные обладают определенной степенью незави-

симости, хотя, судя по графикам, типы распределений для времен между НТТР-запросами и времен между НТТР-ответами должны отличаться.

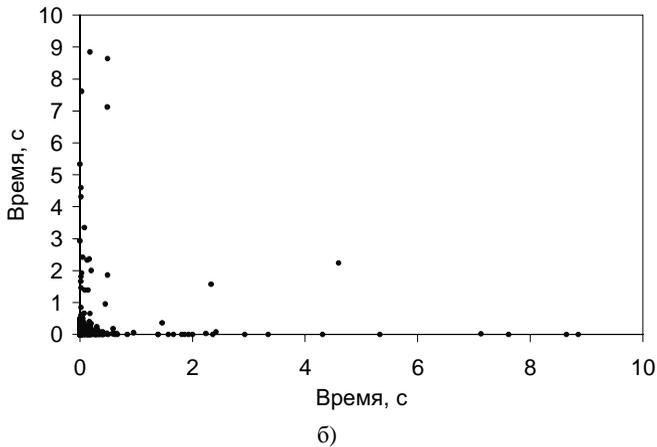
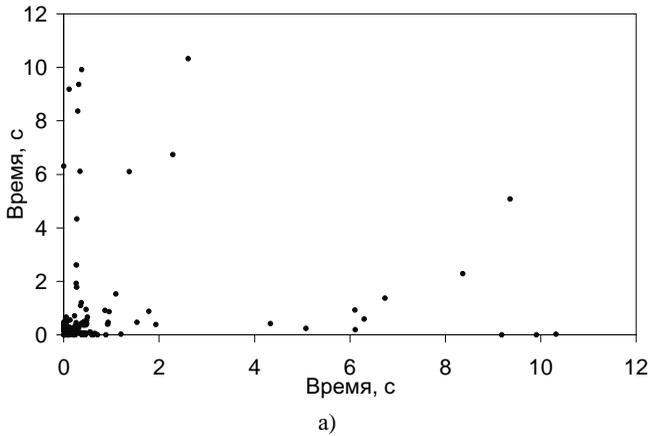


Рисунок 1 – Диаграмма разброса наблюдений для пар времен между НТТР-запросами (а) и между НТТР-ответами (б)

Для определения статистических свойств НТТР-запросов клиента к серверу и ответов сервера был выполнен анализ соответствующих временных рядов на предмет соответствия стандартным непрерывным распределениям вероятностей в Statistica 6.0 [4]. Гистограммы времен между НТТР-запросами и времен между НТТР-ответами, а также кривые плотностей ве-

роятности нормального, равномерного, экспоненциального, гамма, логнормального и Хи-квадратичного распределений приведены на рис. 2 и рис. 3.

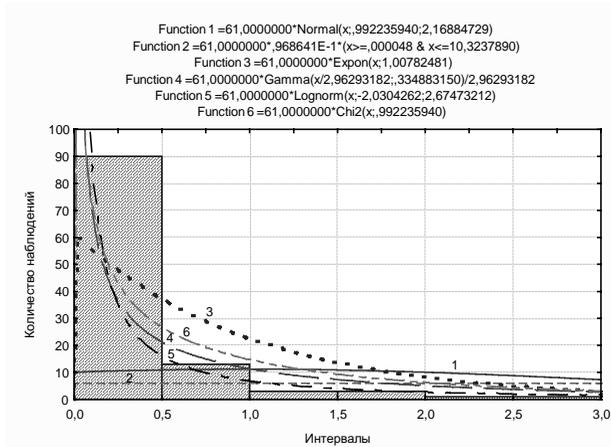


Рисунок 2 – Гистограмма интервалов времени между HTTP-запросами и теоретические плотности распределения:  
 1 – нормальное, 2 – равномерное, 3 – экспоненциальное, 4 – гамма,  
 5 – логнормальное, 6 – Хи-квадратичное

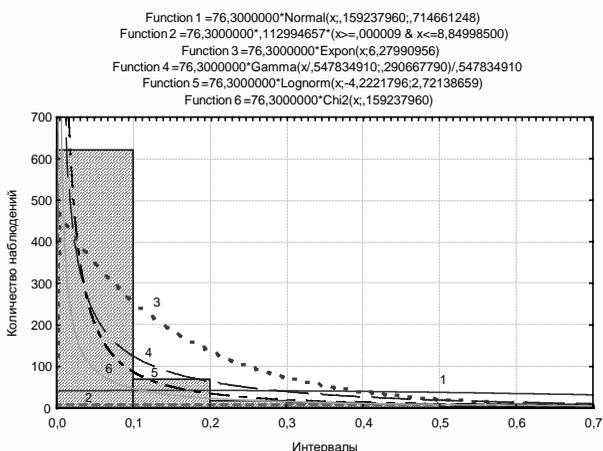


Рисунок 3 – Гистограмма интервалов времени между HTTP-ответами и теоретические плотности распределения:  
 1 – нормальное, 2 – равномерное, 3 – экспоненциальное, 4 – гамма,  
 5 – логнормальное, 6 – Хи-квадратичное

Согласие теоретических плотностей вероятности с экспериментальными значениями оценивалось с помощью критерия "Хи-квадрат" и критерия Колмогорова-Смирнова, доступных в программе Statistica v. 6.0. Кроме численных значений критериев согласия, оценивалось совпадение формы теоретических плотностей вероятности и гистограмм (рис. 2, рис. 3). Учитывая, что проверка по критерию "Хи-квадрат" чувствительна к выбору количества и размеров интервалов гистограмм, эти параметры выбирались в соответствии с рекомендациями, состоящими в выборе интервалов одинакового размера и их количества такого, чтобы произведение доли единичного интервала на количество данных в выборке было не меньше 5 [5]. Этим рекомендациям удовлетворяют 22 интервала для 122 значений времен между НТТР-запросами ( $122/22 \approx 5,55$ ) и 100 интервалов для 763 значений времен между НТТР-ответами ( $763/100 = 7,63$ ).

В табл. 3 приведены значения параметров теста Хи-квадрат и теста Колмогорова-Смирнова для сравниваемых теоретических распределений и экспериментальных данных.

Таблица 3 – Результаты тестов на соответствие

Распределение	Тест Хи-квадрат				Тест Колмогорова-Смирнова	
	$\chi^2$	df	p	$\chi^2(df, 0,99)$	d	$(\frac{n^{1/2}+0,12}{n^{1/2}}) \cdot d$
Параметры для НТТР-запросов (22 интервала)						
Нормальное	68,9129	6	0,00000	16,812	0,3552	3,97
Равномерное	1284,36	17	0,00000	33,409	0,7525	8,41
Экспоненциальное	67,6958	4	0,00000	13,277	0,3465	3,88
Гамма	21,5280	4	0,00025	13,277	0,1521	<b>1,70</b>
Логнормальное	<b>15,0378</b>	4	0,00462	<b>13,277</b>	0,1629	<b>1,82</b>
Хи-квадратичное	32,0046	5	0,00001	15,086	0,2160	2,41
Параметры для НТТР-ответов (100 интервалов)						
Нормальное	485,351	15	0,00000	30,578	0,4118	11,43
Равномерное	44614,7	85	0,00000	$\approx 120$	0,9041	25,08
Экспоненциальное	420,186	6	0,00000	16,812	0,5485	15,22
Гамма	142,735	10	0,00000	23,209	0,2500	6,94
Логнормальное	42,5179	14	0,00010	29,141	0,3185	8,84
Хи-квадратичное	68,2712	13	0,00000	27,688	0,5059	14,04

Здесь  $\chi^2$  – значение подобранного параметра теста, df – количество степеней свободы, p – относительная величина достоверности используемого распределения,  $\chi^2(df, 0,99)$  – табличное значение  $\chi^2$  для указанного числа степеней свободы, не превышение которого позволя-

ет заключить о достоверности используемого приближения на уровне 0,99 (минимально возможный уровень достоверности),  $d$  – наибольшее вертикальное расстояние между теоретической и экспериментальной функциями распределения, в последнем столбце приведена выверенная статистика критерия Колмогорова-Смирнова (минимальным значением этой статистики для выбора с достоверностью на уровне 0,99 является 1,628) [5].

Как видно из табл. 3, ни одно из исследованных распределений не может быть выбрано для описания экспериментальных данных даже с минимальной достоверностью, однако наилучшими кандидатами для задания времен между НТТР-запросами могут быть гамма или логнормальное распределение. Для определения возможных кандидатов для моделирования межпакетных интервалов НТТР-ответов необходимо исследование других распределений плотности вероятности.

### **Заключение**

В работе выполнено исследование соответствия между основными теоретическими распределениями (нормальным, равномерным, экспоненциальным, гамма, логнормальным, Хи-квадратичным) и экспериментальным набором межпакетных временных интервалов НТТР-сессии. Определено, что ни одно из исследованных распределений не может быть выбрано для описания экспериментальных данных даже с минимальной достоверностью, однако наилучшими кандидатами для задания времен между НТТР-запросами могут быть гамма или логнормальное распределение.

*Научная новизна* работы заключается в том, что впервые проведено статистическое исследование для протокольных блоков данных НТТР, отделенных от служебных кадров/пакетов сеанса.

*Практическая ценность* работы состоит в возможности использования ее результатов при выборе входных распределений для межпакетных временных интервалов в системах моделирования процессов в компьютерных сетях.

Работа выполнена в рамках НИР "Технологии и алгоритмы обработки данных в сложных гетерогенных компьютерных сетях" (№ гос. регистрации 0105U002562).

### **Перечень ссылок**

1. Вишневецкий В.М. Теоретические основы проектирования компьютерных сетей. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.
2. Анализатор протоколов Sniffer Pro 4.6 – Network Associates, Inc. – <http://www.nai.com>.

3. *Таненбаум Э.* Компьютерные сети. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2003. – 992 с.

4. Программа статистического анализа данных Statistica v.6.0 - StatSoft, Inc. – <http://www.statsoft.com>.

5. *Лоу А. М., Кельтон В. Д.* Имитационное моделирование. Классика CS. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2004. – 847 с.

**Рецензент** д.ф.-м.н., проф. Корнич Г.В. (Запорожье, Запорожский национальный технический университет).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программирования и информационных технологий Гуманитарного университета "Запорожский институт государственного и муниципального управления" (Протокол № 10 от 9.01.2007 г.).

*Поступила 18.01.2007 г. После доработки 26.01.2007 г.*

***Kolomoets G.P. The experimental research of statistical parameters of http-session inter-packet intervals***

Research of inter-packet time intervals of a HTTP-session is carried out with the purpose of definition of the most approaching probability density distribution. For the first time statistical research for HTTP-session protocol data units, separated from a service frames/packets, is carried out. Results of the work can be used at computer network processes modeling.

***Коломоец Г.П. Экспериментальное исследование статистических параметров межпакетных интервалов HTTP-сеанса***

Выполнено исследование межпакетных временных интервалов HTTP-сеанса с целью определения наиболее подходящего распределения плотности вероятности. Впервые выполнено статистическое исследование для протокольных блоков данных HTTP, отделенных от служебных кадров/пакетов сеанса. Результаты работы могут быть использованы при моделировании процессов в компьютерных сетях.

***Коломосць Г.П. Експериментальне дослідження статистичних параметрів міжпакетних інтервалів HTTP-сеансу***

Виконано дослідження міжпакетних часових інтервалів HTTP-сеансу з метою визначення найбільш підходящого розподілу щільності ймовірності. Вперше виконано статистичне дослідження для протокольних блоків даних HTTP, відділених від службових кадрів/пакетів сеансу. Результати роботи можуть бути використані при моделюванні процесів у комп'ютерних мережах.

УДК 621.3

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ НА СТРУКТУРНОМ УРОВНЕ В ВИДЕ КОНЕЧНОГО АВТОМАТА

*Кривуля Г.Ф., Лантев М.А.*

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

### **Введение**

Современная компьютерная система (КС) представляет собой сложный микроэлектронный объект, имеющий иерархическую схемную структуру с несколькими основными уровнями представления:

- системный (структурный) уровень, на котором рассматривается совокупность отдельных подсистем или устройств КС;
- функционально-логический уровень, для которого осуществляется дальнейшая детализация устройств в виде блоков и узлов КС;
- схмотехнический уровень описания блоков и узлов КС в виде принципиальных электрических схем.

Проектирование диагностического обеспечения КС с учетом всех уровней описания представляет собой сложную техническую задачу.

Для последних двух уровней описания КС существует достаточно много работ, в которых рассматриваются возможные виды диагностических моделей и неисправностей устройств КС. Однако для структурного уровня в основном рассматриваются модели исправного состояния КС с использованием различных языков моделирования GPSS, UML и т. д.

В то же время построение диагностического обеспечения для КС целесообразно начинать с анализа возможных исправных и неисправных функциональных состояний на начальном верхнем уровне описания КС. Поэтому разработка диагностической модели для структурного уровня является *актуальной задачей*. Эта модель должна учитывать основные виды отказов, возникающих при работе КС: проблемы с электропитанием; сбой в работе программного или аппаратного обеспечения; неполадки в телекоммуникационной сети; ошибки персонала; отказы систем контроля; неблагоприятные внешние воздействия.

### **1. Моделирование состояний компьютерной системы на структурном уровне в виде конечного автомата**

Большинство диагностических моделей для структурного уровня используют моделирующие графы представления структуры КС [1,2].

При этом вычисляются показатели общей диагностируемости для всей структуры КС с учетом диагностируемости ее составляющих [3].

Однако в приведенных работах не рассматривается модель функциональных состояний КС на системном (структурном) уровне представления КС. Такая модель необходима для построения диагностического обеспечения КС на начальном структурном уровне описания.

*Целью данной работы* является построение модели функциональных состояний КС в виде конечного автомата (КА). При этом для моделирования будем использовать абстрактный конечный автомат, который обычно задается пятеркой символов  $K = \{Q, A, \delta, \lambda, F\}$ , где:  $Q = \{q_0(t), \dots, q_n(t)\}$  – множество конечных состояний автомата;  $q_0$  – начальное состояние автомата;  $A$  – алфавит автомата (конечное множество входных и промежуточных символов или букв);  $\delta$  – функция переходов – задает отображение вида  $\delta: Q \times A \rightarrow Q$  (переход из одного состояния в другое под воздействием символов входного алфавита);  $\lambda$  – функция выходов, ее вид зависит от типа конечного автомата;  $F$  – множество выделенных состояний, которое является подмножеством множества  $Q$ .

Множество состояний  $F$  используется для моделирования диагностируемых состояний КС. Это, например, состояние f1 неправильного функционирования или состояние f2 нормального завершения процесса. Под воздействием входных сигналов КА переходит из одного состояния в другое и затем – в конечное выделенное состояние из множества  $F$ , если входная последовательность распознана.

## 2. Основные функциональные состояния КС

Кроме стандартных состояний, описывающих исправность и работоспособность, КС может принимать другие возможные состояния, которые приведены ниже.

$q_0$  – начальное состояние. Электропитание КС включено.

$q_1$  – исправное состояние. КС выполняет все требования нормативно–технической и/или конструкторской документации.

$q_2$  – неисправное состояние. КС не способна выполнять заданные функции.

$q_3$  – работоспособное состояние. Значение всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно–технической и/или проектной документации.

$q_4$  – неработоспособное восстанавливаемое состояние. Значение хотя бы одного из параметров, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно–технической и/или проектной документации.

$q_5$  – неработоспособное невозстанавливаемое состояние. Состояние, при котором дальнейшее использование КС невозможно.

$q_6$  – правильное функционирование. Состояние, при котором КС способна выполнять заданные алгоритмы, сохраняя при этом основные параметры, определенные в документации.

$q_7$  – неправильное функционирование. Состояние, при котором значение хотя бы одного параметра КС, характеризующего способность выполнять заданные алгоритмы, не соответствует требованиям, определенным в документации.

$q_8$  – предельное состояние. Дальнейшая эксплуатация КС при этом недопустима или нецелесообразна, либо восстановление исправного или работоспособного состояния КС недопустимо или нецелесообразно.

$q_9$  – зависание КС. Состояние, при котором ее дальнейшая эксплуатация невозможна.

$q_{10}$  – конечное состояние. Электропитание КС отключено.

$q_{11}$  – сохраняемость. Состояние, в котором КС сохраняет свою структуру и значения внутренних параметров в заданных пределах при выключенном электропитании.

### **3. Сигналы (события), изменяющие состояния КС**

Сигналы (события) – действия, под воздействием которых КС переходит из одного состояния в другое, приведены ниже.

$X_1$  – устойчивый отказ, перемежающийся отказ или сбой. Событие, заключающееся в прекращении способности КС выполнять требуемую функцию.

$X_2$  – неисправность (дефект). Событие, при котором происходит недопустимое отклонение по крайней мере одного из характеристических свойств или переменных системы от стандартного (обычного, номинального) значения.

$X_3$  – восстановление (парирование). Это событие, заключающееся в переходе КС из неработоспособного состояния в работоспособное в результате устранения отказа.

$X_4$  – выход из строя (поломка) составляющей КС. Событие, в результате которого составляющая КС переходит из работоспособного состояния в неработоспособное.

$X_5$  – старение элементов КС. Событие, заключающееся в постепенном переходе КС из работоспособного состояния в неработоспособное при интенсивной эксплуатации элементов системы.

$X_6$  – завершение работы КС. Событие, заключающееся в завершении всех процессов, выполняемых КС, а также выполнение подготовительных процедур, необходимых для выключения КС.

$X_7$  – ошибка персонала. Событие, вызывающее неполадки КС в результате некорректного использования системы оператором.

$X_8$  – перезагрузка. Событие, переводящее КС в работоспособное состояние после зависания.

$X_9$  – внешнее воздействие на КС. Событие, переводящее КС в неработоспособное состояние в результате внешнего воздействия.

$X_{10}$  – загрузка КС. Событие, при котором происходит процесс выполнения программы BIOS и подготовка КС к началу работы.

$X_{11}$  – сохранение. Событие, при котором происходит процесс выполнения сохранения состояния КС в момент, предшествующий выключению питания.

$X_{12}$  – проверка сохраняемости структуры. Событие, выполняемое при необходимости проверки сохраняемости структуры КС.

$X_{13}$  – проверка сохраняемости значений внутренних параметров в заданных пределах. Событие, выполняемое при необходимости проверки сохраняемости значений внутренних параметров.

#### 4. Построение модели состояний КС в виде КА

С использованием приведенных выше состояний и сигналов КС сформируем таблицу переходов КА, моделирующую изменение состояний КС в зависимости от входных сигналов.

Таблица 3 – Таблица переходов КА

	q <sub>0</sub>	q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>	q <sub>5</sub>	q <sub>6</sub>	q <sub>7</sub>	q <sub>8</sub>	q <sub>9</sub>	q <sub>10</sub>	q <sub>11</sub>
X <sub>1</sub>		q <sub>2</sub>		q <sub>4</sub> q <sub>5</sub>			q <sub>7</sub>		q <sub>2</sub> q <sub>4</sub> q <sub>5</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>			
X <sub>2</sub>		q <sub>2</sub>		q <sub>4</sub> q <sub>5</sub>			q <sub>7</sub>		q <sub>2</sub> q <sub>4</sub> q <sub>5</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>			
X <sub>3</sub>			q <sub>1</sub>		q <sub>3</sub>			q <sub>6</sub>	q <sub>1</sub> q <sub>3</sub> q <sub>6</sub>			
X <sub>4</sub>		q <sub>2</sub>		q <sub>4</sub>			q <sub>7</sub>		q <sub>2</sub> q <sub>4</sub> q <sub>5</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>			
X <sub>5</sub>		q <sub>2</sub>		q <sub>4</sub>			q <sub>7</sub>		q <sub>2</sub> q <sub>4</sub> q <sub>5</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>			
X <sub>6</sub>		q <sub>10</sub>	q <sub>10</sub>	q <sub>10</sub>	q <sub>10</sub>	q <sub>10</sub>	q <sub>10</sub>	q <sub>10</sub>	q <sub>10</sub>			
X <sub>7</sub>		q <sub>2</sub>		q <sub>4</sub> q <sub>5</sub>	q <sub>5</sub>		q <sub>7</sub>		q <sub>2</sub> q <sub>4</sub> q <sub>5</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>			
X <sub>8</sub>		q <sub>1</sub>	q <sub>2</sub>	q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>		q <sub>6</sub>	q <sub>7</sub>	q <sub>8</sub>	q <sub>1</sub> q <sub>2</sub> q <sub>3</sub> q <sub>4</sub> q <sub>6</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>		
X <sub>9</sub>		q <sub>2</sub>		q <sub>4</sub> q <sub>5</sub>	q <sub>4</sub> q <sub>5</sub>		q <sub>7</sub>		q <sub>2</sub> q <sub>4</sub> q <sub>5</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>	q <sub>1</sub> q <sub>2</sub> q <sub>3</sub> q <sub>4</sub> q <sub>6</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>		
X <sub>10</sub>				q <sub>3</sub>	q <sub>4</sub>		q <sub>6</sub>	q <sub>7</sub>	q <sub>8</sub>			q <sub>1</sub> q <sub>2</sub> q <sub>3</sub> q <sub>4</sub> q <sub>6</sub> q <sub>7</sub> q <sub>8</sub>
X <sub>11</sub>											q <sub>11</sub>	
X <sub>12</sub>	q <sub>11</sub>											
X <sub>13</sub>	q <sub>11</sub>											

В данном случае для построения модели использовался автомат Мура, для которого выходные сигналы зависят только от внутренних состояний автомата, то есть:  $Y_i = q_i, i=1, \dots, m$ .

#### Заключение

Предложена модель функциональных состояний КС в виде КА, позволяющая осуществлять процесс диагностирования по таблице пе-

реходов КА. По значениям входного слова последовательно определяется переход из одного состояния в другое и затем – в конечное состояние, которое соответствует определенному диагнозу.

### Перечень ссылок

1. *Кривуля Г.Ф., Липчанский А.И., Рязанцев А.И.* Классификация и оценка сложности задач проверки компьютерных сетей на структурном уровне моделирования // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2005. – №1(21). – С. 321–326.

2. *Липчанский А.И.* Количественные показатели диагностируемости для графовых моделей электронно-вычислительной аппаратуры // Радиоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2005. – №1. – С.99–103.

3. *Кривуля Г.Ф., Липчанский А.И.* Обеспечение диагностируемости устройств управления на структурном уровне моделирования // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – №5. – С.59–62.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Хаханов В.И. (Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой автоматизации проектирования вычислительной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники (Протокол № 5 от 29.01.2007 г.).

*Поступила* 31.01.2007 г.

### ***Krivoulya G.F , Laptev M.A. The modeling of computer system states on structural level in the form of finite state machine***

The construction of diagnostic model of computer system states in the form of finite state machine is considered in the article. The advantage of the model consists in the fact to determine the transitions from one state of the computer system to another having the number of input signals.

### ***Кривуля Г.Ф., Липтев М.А. Моделирование состояний компьютерной системы на структурном уровне в виде конечного автомата***

В статье рассматривается построение диагностической модели состояний компьютерной системы в виде конечного автомата. Суть модели состоит в том, что для последовательности входных сигналов определяются переходы компьютерной системы из заданного состояния в диагностируемое состояние.

### ***Кривуля Г.Ф., Липтев М.О. Моделювання станів комп'ютерної системи на структурному рівні у вигляді кінцевого автомату***

У статті розглядається побудова діагностичної моделі станів комп'ютерної системи у вигляді кінцевого автомату. Сутність моделі полягає в тому, що для послідовності входних сигналів автомату визначаються переходи комп'ютерної системи з одного стану до стану, що діагностується.

УДК 518.81

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЗАИМНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

*Петров Э.Г., Пискалова О.А.*

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

### **Введение**

Существует большой класс систем, которые являются нестационарными, высокодинамичными, с плохо прогнозируемой динамикой развития, в которых исходные условия, характеристики самой системы заданы неточно (неоднозначно), что приводит к неопределенности информации, и сильно затрудняет процесс принятия решений.

В данной статье авторами ставилась *цель* провести анализ видов неопределенности и сформулировать постановку задачи взаимной трансформации различных видов неопределенности.

### **1. Виды неопределенности**

В задачах организационного управления встречаются ситуации, в которых исходные условия задачи заданы неопределенно. Одной из таких задач является задача принятия решения в условиях большей или меньшей степени неопределенности. Можно выделить три вида неопределенности: 1) вероятностная (статистическая); 2) заданная в виде нечетких множеств; 3) интервальная. Рассмотрим особенности каждого вида неопределенности.

При вероятностной неопределенности переменные задаются в виде интервалов  $a_i \in [a_{i_{\min}}, a_{i_{\max}}]$ ,  $i = \overline{1, n}$ . При этом предполагается, что переменные являются случайными величинами, и внутри интервала они распределены по некоторому закону.

В случае нечетких множеств, переменные заданы с помощью лингвистических переменных типа « $a$  находится приблизительно в интервале от  $b$  до  $c$ ». Для формализации лингвистических переменных используется теория нечетких (размытых) множеств. Согласно этой теории для любого нечеткого множества, определенного лингвистической переменной, можно сформировать функцию принадлежности, которая является непрерывной с областью значений  $[0, 1]$ . Причем ее значение тем ближе к единице, чем больше уверенность в том, что значение некоторой переменной соответствует утверждению лингвистической переменной. Очевидно, что выбор конкретного вида функции принадлежности является эвристической операцией, а сама функция

принадлежности отражает предпочтения лица, принимающего решения (ЛПР) или экспертов.

При интервальной неопределенности переменные заданы количественно, но не точно, а в виде интервала  $[a_{i \min}, a_{i \max}]$  возможных значений, причем предпочтения внутри интервала неизвестны [1].

Для каждого вида неопределенности разработаны и продолжают интенсивно развиваться методы принятия решений, которые поддерживаются специальными разделами «интервальной» математики. Трудности возникают в том случае, если в постановку задачи входят переменные и параметры, описываемые различными видами неопределенности.

Решение таких задач связано с необходимостью приведения всех различных неопределенностей к одному виду или разработки синтетических методов.

## 2. Теория возможностей

В настоящее время проблеме разработки методов трансформации видов неопределенности посвящено ряд работ [2, 4]. Самым известным из существующих методов является теория возможностей.

Впервые меры возможности и необходимости были предложены Заде. Теория возможностей предполагает наличие распределения возможностей  $\pi$  над пространством элементарных событий. В отличие от теории вероятностей элементарные события рассматриваются не как непересекающиеся, но напротив, как образующие цепочку вложенных множеств. Распределение возможностей  $\pi$  есть нечеткое множество, функция принадлежности которого задает возможность каждого из элементарных событий. Меры возможности и необходимости некоторого нечеткого события  $A$  определяются следующим образом [2, 3]:

$$C(A) = \sup_{\Delta \varpi \in \Omega} \min[A(\varpi), \pi(\varpi)], \quad N(A) = \inf_{\Delta \varpi \in \Omega} \max[A(\varpi), 1 - \pi(\varpi)].$$

С точки зрения классификации типов неопределенности, теория возможностей пытается выразить и случайность и нечеткость в терминах только мер нечеткости и, следовательно, в этом смысле является прямой альтернативой теории вероятностей. В определении мер возможности и необходимости не проводится никакого различия между чисто случайными и чисто нечеткими описаниями. С одной стороны, это чрезвычайно удобно, так как позволяет комбинировать случайность и нечеткость в едином информационном блоке – паре возможность – необходимость. В частности, можно естественным образом представить факт отсутствия информации.

Недостатком такой теории является то, что возможностная модель плохо работает в том случае, когда в неопределенности преобладает случайная составляющая.

Альтернативные подходы заключаются в прямой взаимной трансформации неопределенности. Основой для этого является утверждение, что для всех рассматриваемых видов неопределенности границы интервалов возможных значений переменных известны и заданы точно.

Это позволяет путем эвристической компенсации недостающей информации, или, наоборот, с потерей информации взаимно трансформировать неопределенности.

Например, интервальная неопределенность может быть трансформирована в вероятностную путем использования достаточно естественного предположения, что значения внутри интервала распределены по закону равной вероятности.

С другой стороны интервальную неопределенность можно интерпретировать как толерантное нечеткое множество с функцией принадлежности  $\mu(x) = 1$  на всем интервале.

Вместе с этим, возможен и обратный переход, но это сопровождается потерей ценной информации. Так можно вероятностную и нечеткую неопределенности превратить в интервальную путем потери информации о статистических характеристиках распределения или функции принадлежности соответственно.

Менее очевидна взаимная трансформация вероятностной и нечеткой форм неопределенности. Это обусловлено тем, что, несмотря на близость формы функции плотности распределения вероятностей и функции принадлежности эти характеристики принципиально отличаются по семантике.

### **3. Постановка задачи трансформации неопределенности**

Необходимо разработать такой математический аппарат, который позволит с достаточной степенью адекватности за допустимое время преобразовывать один вид неопределенности (из трех) в другой.

В настоящее время ведется разработка системы, которая обеспечит автоматизированное выполнение взаимной трансформации различных видов неопределенности.

### **Заключение**

В работе проведен анализ существующих видов неопределенности, сформулирована постановка задачи взаимной трансформации различных видов неопределенности, были проанализированы самые известные существующие методы трансформации видов неопределенности с определением достоинств и недостатков. Следовательно, решение задачи трансформации связано с необходимостью приведения всех различных неопределенностей к одному виду или разработки синтетических методов.

*Практическая новизна* заключается в том, что на данном этапе ведется проектирование и разработка системы, которая позволит трансформировать различные виды неопределенности друг в друга.

### Перечень ссылок

1 *Овезгельдыев А.О., Петров Э.Г., Петров К.Э.* Синтез и идентификация моделей многофакторного оценивания и оптимизации. – К.: Наукова думка, 2002. – 163 с.

2 *Дюбуа Д., Прад А.* Теория возможностей. Приложение к представлению знаний в информатике / Пер. с фр. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

3 *Борисов А.Н., Алексеев А.В.* Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. – М.: Радио и связь, 1989. – 304с.

4 *Каня А.А.* Мера возможности, нечеткое доверие и некоторые свойства нечетких преобразований // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Пер. с англ.; под ред. Р.Р.Ягера. – М., 1986. – С.264–279.

**Рецензент** д.т.н., проф., зав. кафедрой информатики Путятин Е.П. (Харьков, ХНУРЕ).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники (Протокол № 10 от 29.01.2007 г.).

*Поступила* 30.01.2007 г.

### *Petrov E.G., Pisklakova O.A.* **The statement of the problem to mutual transformation different types to uncertainties**

The given work is devoted to a question of origin to need decision making in condition greater or smaller degree to uncertainties. The analysis was organized existing type to uncertainties, is worded statement of the problem to mutual transformation different type to uncertainties. Also, the most known existing methods were analysed to transformations type to uncertainties with determination value and defect.

### *Петров Э.Г., Пискалова О.А.* **Постановка задачи взаимной трансформации различных видов неопределенности**

Проведен анализ существующих видов неопределенности, сформулирована постановка задачи взаимной трансформации различных видов неопределенности, проанализированы самые известные существующие методы трансформации видов неопределенности с определением достоинств и недостатков.

### *Петров Е.Г., Пискалова О.О.* **Постановка задачі взаємної трансформації різних видів невизначеності**

Проведено аналіз існуючих видів невизначеності, сформульовано постановку задачі взаємної трансформації різних видів невизначеності, проведено аналіз найвідоміших методів трансформації видів невизначеності з визначенням переваг та недоліків.

УДК 519.17 + 681.3.06

## **БИБЛИОТЕЧНЫЙ МОДУЛЬ ALGRAPH/C++: ИНСТРУМЕНТ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ГРАФАХ**

*Пинчук В.П.*

Запорожский национальный технический университет

### **Введение**

Программирование задач, связанных с вычислениями на графах, процесс достаточно трудоемкий. Поэтому любые средства, позволяющие выполнять такую работу эффективно, заслуживают внимания. В полной мере это относится и к разработкам новых инструментальных средств, ориентированных на использование современной технологии объектно-ориентированного программирования (ООП), которая позволяет не только создавать гибкую и мощную среду программирования, но и создает хорошие условия для последующей ее модернизации и развития. Использование такого рода среды позволяет существенно сократить ресурсы, затрачиваемые на создание программного кода с одновременным повышением его надежности и эффективности.

При создании библиотеки Algraph /C++ акцент делался на создание, исследование и реализацию эффективных алгоритмов, в первую очередь для класса так называемых труднорешаемых задач, а также на расширение возможностей численного экспериментирования и решения задач высшей категории вычислительной сложности. Описание идеи разработки такого рода системы и первой ее реализации опубликовано автором в 1998 году [1]. Ядро библиотеки Algraph/C++ составляет библиотечный файл `algraph.h` и его файл реализации `algraph.lib`. Он содержит программные компоненты-классы, процедуры, функции, макросы и других определения и объекты. В состав библиотеки входит также библиотечный модуль общего назначения `sys.h`, этот файл является автономным и может использоваться самостоятельно.

С целью эффективного использования памяти компьютера все классы построены как динамические. Это позволяет создавать программы, которые, благодаря возможностям динамического перераспределения памяти, позволяют использовать ее более эффективно. Все компоненты библиотеки Algraph/C++ соответствуют стандарту ANSI/ISO C++ 1998/2003.

### **1. Представление графов**

Основными способами представления графов в среде `algraph` являются таблица связей (класс `graph`), матрица смежности (класс `matad`) и бинарный код. Для компактного представления графов в оперативной и

внешней памяти используются бинарные коды, операции с которыми поддерживаются набором специальных функций.

Класс `graph` включает в себя следующие компоненты: число вершин, вектор степеней вершин и таблицу связей графа. Кроме того, он содержит набор функций для выполнения ряда операций: получения числа ребер, значения форм-фактора, размера граф-объекта в байтах, свертывания граф-объекта к значению нуль-графа, упорядочивания элементов строк таблицы связей, проверки правильности таблицы связей, вывода таблицы связей в файл или на экран в текстовом формате, ввода таблицы связей из файла в текстовом формате, записи бинарного кода графа в `g`-файл, чтения бинарного кода графа из `g`-файла. Кроме того, класс `graph` содержит набор перегруженных операций присваивания с необходимыми преобразованиями формата, а также функций, обеспечивающих создание, инициализацию и удаление `graph`-объектов.

Класс `matad` содержит описание графа, включающего в себя число вершин и матрицу смежности. Набор функций класса `matad` функционально дублирует набор функций класса `graph`.

Классы `graph` и `matad` могут представлять как неориентированные, так и ориентированные графы, а также графы, имеющие петли и кратные ребра. Оба класса содержат набор функций, проверяющих целостность и корректность создаваемых объектов.

Для оперативной характеристики графов при выполнении расчетов в среде `Algraph` используется так называемый форм-фактор. Первые три его бита несут информацию о некоторых базовых свойствах графа: присутствие ориентированных связей, наличие петель, наличие кратных дуг или ребер.

Для нумерации вершин графа и других данных, связанных с номерами вершин, может быть использован любой целочисленный тип.

Для компактного сохранения больших массивов графов с одинаковым числом вершин предусмотрены специальные форматы файлов (расширения `.bis` и `.g`) и набор функций ввода/вывода и преобразования форматов представления графов и файлов в целом.

## **2. Внешние функции, процедуры и утилиты**

Кроме функций-членов классов, модуль `Algraph/C++` включает в себя обширный набор внешних функций, который делает библиотечный модуль функционально полным. Краткий перечень таких функций приводится ниже.

Функции, обеспечивающих необходимые преобразования графов: создания новой изолированной вершины, создания новой вершины, связанной со всеми остальными вершинами, удаления вершины, удаления

из графа всех изолированных вершин, создания новой дуги или ребра, удаления дуги или ребра, случайной перенумерации вершин графа.

Функции, обеспечивающие унарные и бинарные операции над графами: простое объединение двух графов, реберное объединение графов, реберное пересечение графов, получение дополнительного графа, слабое соединение графов, сильное соединение графов, модульное произведение графов.

Функции для выполнения операций сравнения: непосредственное сравнение таблиц связей или матриц смежности, сравнение таблиц связей, при котором их строки сравниваются как множества, лексикографическое сравнение строк таблицы связей;

Имеется набор функций, которые позволяют получить тот или иной параметр графа или граф-объекта: размер граф-объекта с учетом динамически распределяемых компонент, значение форм-фактора графа, количество ребер и дуг, радиус и диаметр графа, эксцентриситет вершины, количество треугольников и циклов заданной длины, количество гамильтоновых циклов, нижнюю оценку и точное значение плотности графа, порядок группы автоморфизмов графа. Библиотека содержит функции, которые позволяют определить, обладает ли граф заданным свойством: отсутствие вершин, отсутствие ребер, полнота, ацикличность, блочность, связность, двухсвязность, двудольность, эйлеровость, гамильтоновость, регулярность, сильная регулярность.

Для работы с отдельными компонентами графа и, в частности, с кликами, предусмотрены такие функции: поиск максимальной клики, поиск цикла, который проходит через заданную вершину и имеет заданную длину, поиск гамильтонова цикла, получение подграфа ближайших соседей для заданной вершины.

Следующий набор функций позволяет проверять графы на изоморфность, находить изоморфные подстановки, вычислять и сравнивать инварианты графов, проверять их эквивалентность:

- проверить, являются ли два заданных графа изоморфными;
- получить изоморфную подстановку графа  $g_1$  на граф  $g_2$ ;
- найти количество изоморфных подстановок графа  $g_1$  на граф  $g_2$ ;
- проверить, являются ли графы  $g_1$  и  $g_2$  Улам-эквивалентными;
- выполнять лексикографическое сравнение двух  $\pi$ -инвариантов графов (упорядоченных векторов степеней вершин);
- вычислить значение  $s$ -инварианта (свертки табличного инварианта первого порядка) для заданного графа;
- проверить, является ли подстановка  $p$ , отображающая множество вершин графа  $A$  на множество вершин графа  $B$ , изоморфной.

Для построения высокоэффективных систем распознавания, на-

ряду с переборными методами установления изоморфности, активно используются инварианты графов. Для работы с инвариантами в системе предусмотрено использование  $\pi$ -инварианта (упорядоченный вектор степеней вершин) и табличного инварианта 1 порядка. Для программирования операций с  $\pi$ -инвариантом в библиотеке предусмотрен специальный класс `pinv`. Работа с табличным инвариантом обеспечивается набором специальных функций.

Для программирования задач, связанных с маршрутами и использованием метрики на графе предусмотрены функции: получения расстояния между заданными вершинами в графе, вычисления эксцентриситета заданной вершины в графе, поиска центра графа, вычисления диаметра и радиуса графа, выполнения полной или частичной волновой разметки вершин графа, поиска кратчайшего маршрута и его длины, нахождения всех кратчайших маршрутов, определения количества кратчайших путей из одной вершины в другую.

Для работы с графами специального вида предусмотрена возможность создания графов специального вида: полных графов, графов, представляющих линейные структуры ( $k$ -line – графы), кольцевых структур (O-графы,  $k$ -ring-графы,  $fatring$ -графы), графов, представляющих структуры типов "звезда" и "колесо", графов типа булев гиперкуб, графов Хэмминга, Джонсона, Келлера, Петерсена, Санчиса, случайных графов.

Операции с бинарными кодами графов поддерживаются набором специальных функций. Для сохранения графов в устройствах внешней памяти могут использоваться файлы нескольких типов: файлы с расширением `.gt` сохраняют таблицы связей в текстовом формате, `.bic` – бинарные коды в текстовом 16-ричном формате, `.g` – бинарные коды графов в бинарной форме. Помимо функций обмена, имеются также функции взаимного преобразования файлов `.gt`, `.bic`, `.g` – форматов, а также контроля их целостности и корректности. Кроме того, библиотека содержит также ряд программ-утилит, которые позволяют проверить правильность и целостность используемых файлов, а также выполнять преобразование форматов представления данных.

Функция, определяющая плотность графа построена на основе оригинального NB-метода, разработанного автором [2]. Функции, включающие в себя проверку графов на изоморфность, разработаны на основе высокоэффективного ПНВ-алгоритма, разработанного автором [3]. Вычисление  $s$ -инвариантов графа, имеющих наилучшее разрешение среди всех известных эффективно вычисляемых инвариантов, построено на основе табличного инварианта первого порядка, предложенного автором [4]. На основе предложенных ранее волновых процессов построены алгоритмы решения задач маршрутизации.

### 3. Примеры использования библиотеки: труднорешаемые задачи

Разработана эффективная процедура распознавания изоморфности графов в потоке данных по образцу на основе которой создана программа, позволяющая получать полные наборы неизоморфных графов с заданными числом вершин, ребер и другими свойствами. С ее помощью создан каталог непометенных неориентированных графов с числом вершин по 11 включительно (всего 1 018 997 864 графов).

Путем прямых вычислений показано, что гипотеза Улама о восстановлении графов выполняется для  $n \leq 11$ , где  $n$  – число вершин.

Создана программа получения полные наборы оптимальных блок-графов, которые используются в качестве базовых графов при конструировании топологий сложных вычислительных сред, в том числе суперкомпьютеров и высоконадежных коммуникационных систем большой сложности. С помощью указанной программы получены полные наборы регулярных оптимальных блок-графов. Показано, что строить эффективные топологии можно на основе графа Петерсена в сочетании с приемами структурного синтеза, предложенными автором [5].

Разработан метод и программа решения задачи коммивояжера с регулируемой глубиной просмотра. Создана программа структурной параметризации ребер графа, позволяющая оценивать потенциальную способность коммуникационных систем к оптимальному распределению потоков по отдельным линиям связи.

#### Перечень ссылок

1. Пинчук В.П. Проблемно-ориентированное расширение C++ для задач обработки структурной информации // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 1998. – №2. – С. 104–107.
2. Пинчук В.П. NB-дерево та алгоритм визначення кількості вершин максимальної кліки у графі. // Міжнар. конф. "Питання оптимізації обчислень", 6-8 жовтня 1997 р., м. Київ: Праці. – К.: ІК НАНУ, 1997. – С. 258–262.
3. Пинчук В.П. Элементы оптимізації і можливості деяких складних обчислень на графах // Комп'ютерна математика. Оптимізація обчислень: Зб. наук. праць. – К.: ІК НАНУ, 2001. – Т.2. – С.353–359.
4. Пинчук В.П. Табличные инварианты на графах и их применение // Кибернетика и системный анализ. – 2001. – № 4. – С.33–45.
5. Пинчук В.П. Структурированные графы и построение топологии сложных вычислительных сетей // Искусственный интеллект. – 2003. – № 4. – С. 40–48.

**Рецензент** д.ф.-м.н., профессор Бахрушин В.Е. (Запорожье, Гуманитарный университет "ЗИГМУ").

**Статья рекомендована к публикации** программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.01.2007 г.).

*Поступила* 06.02.2007 г.

*Pinchuk V.P.* **Library module Algraph/C++: a tool for graph computations**

The description of the library module Algraph/C ++, intended for programming the problems connected to calculations on graphs is presented. The module includes functionally full set of classes, procedures, functions and other definitions which allow increasing efficiency of process of development of a program code and, at the same time, to improve its qualitative characteristics, essentially expanding opportunities C++-programming systems in the given area. The original algorithms developed by the author of the report are put in a basis of some program components of the library.

*Пинчук В.П.* **Библиотечный модуль Algraph/C++: инструмент вычислений на графах**

Приводится описание библиотечного модуля Algraph/C++, предназначенного для программирования задач, связанных с вычислениями на графах. Модуль включает в себя функционально полный набор классов, процедур, функций и других определений, который позволяет повысить эффективность процесса разработки программного кода и, в то же время, улучшить его качественные характеристики, существенно расширяя возможности C++-систем программирования в данной области. В основу некоторых программных компонентов библиотеки положены оригинальные алгоритмы, разработанные автором.

*Пинчук В.П.* **Бібліотечний модуль Algraph/C++: інструмент обчислень на графах**

Наведено опис бібліотечного модуля Algraph/C++, призначеного для програмування задач, пов'язаних з обчисленнями на графах. Модуль містить у собі функціонально повний набір класів, процедур, функцій і інших визначень, які дозволяють підвищити ефективність процесу розробки програмного коду і, в той же час, підвищити його якісні характеристики, суттєво розширюючи можливості C++-систем програмування у даному напрямку. В основу деяких програмних компонентів бібліотеки покладені оригінальні алгоритми, що були розроблені автором.

УДК 621.039.58

## ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ЯДЕРНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ОПАСНОСТЬЮ

*Прохорец И.М., Прохорец С.И., Рудычев Е.В.,  
Федорченко Д.В., Хажмурадов М.А., Лукьянова В.П.*

Национальный научный центр  
«Харьковский физико-технический институт»

### **Введение**

Украина в настоящее время является развитым в промышленном отношении государством, в котором широко используется атомная энергия для производства электричества. На конец 2006 года в Украине находилось в эксплуатации 15 блоков на действующих атомных электростанциях (АЭС): 6 блоков реактора ВВЭР-1000 (Запорожская АЭС), 3 блока реактора ВВЭР-1000 (Южно-Украинская АЭС), 2 блока ВВЭР-1000 (Хмельницкая АЭС), 2 блока реактора ВВЭР-1000 и 2 блока реактора ВВЭР-440 (Ровенская АЭС). Кроме этого, на Чернобыльской АЭС, выведенной из эксплуатации, имеется еще 4 блока типа РБМК.

В результате эксплуатации атомных электростанций образуется отработанное ядерное топливо в виде тепловыделяющих сборок и радиоактивные отходы. Радиоактивные отходы АЭС – это активированные радиоизотопы конструкционных материалов, замедлителя, охладителя и т.д. Радиоактивные материалы образуются не только в результате работы АЭС, но и от применения радиационных технологий в промышленности и научных исследованиях. Источником опасного излучения может стать ядерное топливо, отработанное в мишенном устройстве (ADS), управляемом ускорителем заряженных частиц. Отработанное ядерное топливо и радиоактивные отходы подлежат долговременному хранению или захоронению.

Коренным отличием хранилищ от захоронений можно считать возможность использования находящихся в них материалов спустя длительное время. Свежее ядерное топливо, поставляемое на площадку АЭС, также является объектом ядерной опасности как в транспортном устройстве, так и в процессе хранения. Кроме того, ядерную и радиационную опасность представляют остатки ядерного топлива после аварии на Чернобыльской АЭС.

Из неполного перечня объектов с ядерной и радиационной опасностью вытекает *актуальность и цель исследований* – определение опасности объектов с делящимися веществами.

*Методом исследований* является математическое (имитационное) моделирование, описывающее процессы транспорта нейтронов и фотонов при их прохождении через вещество.

В данной работе представлены результаты исследований коэффициента размножения нейтронов в объектах, состоящих из тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 в транспортном контейнере, в котором они поставляются на площадку атомной электростанции, и мишенного устройства нейтронного источника, управляемого ускорителем заряженных частиц. Методика исследования названных выше объектов – имитационное моделирование с использованием программных кодов MCNP4C и MCNPX.

### **1. Оценка ядерной опасности объектов с делящимися веществами**

Ядерную опасность любого объекта можно характеризовать коэффициентом размножения нейтронов. Коэффициент размножения нейтронов представляет собой отношение нейтронов в последующем поколении к нейтронам в предыдущем. Если  $K_{\text{eff}}$  – коэффициент размножения нейтронов в одном поколении, то количество нейтронов в единице объема моделируемого объекта, в качестве которого можно рассматривать ядерный реактор, сборку с тепловыделяющимися элементами, гомогенный объем с делящимся материалом и т.д., растет в геометрической прогрессии и стремится к предельному значению

$$N = n_0 / (1 - K_{\text{eff}}),$$

где  $n_0$  – начальное количество нейтронов. Наиболее известными программными кодами, в которых заложена возможность определения  $K_{\text{eff}}$ , являются коды SCALE [1], MCNP4C [2], MCNPX [3]. В коде MCNP  $K_{\text{eff}}$  находится из интегрального транспортного уравнения Больцмана, которое фиксирует скорость рождения и убыль нейтронов в результате упругих и неупругих взаимодействий. Ниже приводятся примеры расчетов  $K_{\text{eff}}$  для двух разных объектов.

### **2. Расчет коэффициента размножения нейтронов для гомогенной подкритической сборки**

Гомогенная подкритическая ядерная сборка может считаться простейшим источником нейтронов. Для моделирования параметров такой сборки предположим, что подкритическая сборка высотой  $H$  и диаметром  $D$  заполнена  $\text{UO}_2$  в алюминиевой матрице. Кроме этого,

предположим, что источник нейтронов, характеризуемый спектром Ватта, находится в центре сборки. Проведем расчеты для материала подкритической сборки обогащенным  $^{235}\text{U}$  на уровне 90 % (подкритическая сборка с большим процентом обогащения HEU) и 20 % (подкритическая сборка с малым процентом обогащения LEU). Сборка с таким ядерным материалом окружена замедлителем-отражателем из бериллия. Результаты расчета такой подкритической системы приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Параметры подкритической сборки с HEU

Параметры	HEU						UO <sub>2</sub>
	1,0	2,0	4,0	5,0	7,0	9,0	
Плотность $U$ , г/см <sup>3</sup>							
$K_{\text{eff}}$	0,9759	0,9799	0,9756	0,9771	0,9766	0,9763	0,9741
Поток нейтронов, н/см <sup>2</sup>	$1,47\text{e}^{-3}$	$1,13\text{e}^{-3}$	$5,76\text{e}^{-4}$	$3,46\text{e}^{-4}$	$6,41\text{e}^{-4}$	$3,97\text{e}^{-4}$	$5,06\text{e}^{-4}$
$H/D$	1	1	1	1	0,815	0,815	0,778

Таблица 2 – Параметры подкритической сборки с LEU

Параметры	LEU			UO <sub>2</sub>
	2,0	3,0	7,0	
Плотность $U$ , г/см <sup>3</sup>				
$K_{\text{eff}}$	0,9769	0,9753	0,9741	0,9779
Поток нейтронов, н/см <sup>2</sup>	$8,78\text{e}^{-4}$	$1,08\text{e}^{-3}$	$3,67\text{e}^{-4}$	$1,07\text{e}^{-3}$
$H/D$	1,286	1,186	1,56	1

Полный поток нейтронов, показанный в таблицах 1 и 2, отнесен к первоначальному источнику нейтронов.

### 3. Результаты расчета коэффициента размножения нейтронов в транспортном контейнере с тепловыделяющими элементами

В данном разделе представлены результаты исследований коэффициента размножения нейтронов в объектах, состоящих из тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 в транспортном контейнере, в котором они поставляются на площадку атомной электростанции (АЭС). Тепловыделяющая сборка представляет собой по форме шестигранник, содержащий 331 стержня шестигранной формы. Сборка имеет длину 457 см. В каждой сборке смонтировано 312 топливных элементов, 18 контрольных стержней и один монтажный. Каждый тепловыделяющий элемент имеет форму цилиндра и оболочку из циркония. В тепловыделяющем стержне содержатся топливные элементы с внутренним и

внешним диаметрами 0,15 и 0,755 см соответственно. Активная зона топливного элемента 353 см. Геометрические параметры тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-1000 представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Геометрические параметры тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР-1000

Параметр ТВС	Параметры	Значения
Топливные элементы	Число топливных элементов	312
	Число контрольных стержней	18
	Число монтажных стержней	1
	Шаг решетки, см	1,275
	Внутренний диаметр таблетки, см	0,15
	Внешний диаметр таблетки, см	0,755
	Внешний диаметр оболочки, см	0,772
	Внутренний диаметр оболочки, см	0,910
	Материал оболочки	Zr
	Длина топлива, см	353,0
Контрольные стержни	Внутренний диаметр, см	1,090
	Внешний диаметр, см	1,265
	Материал	Zr
Центральная монтажная трубка	Внутренний диаметр, см	0,960
	Внешний диаметр, см	1,125
	Материал	Zr
Размер сборки	Шаг элементов, см	23,6

Тепловыделяющая сборка загружена слабообогащенным по урану 235 топливом. Она состоит из тепловыделяющих элементов с обогащением 3,7% и 4,2%. Контрольные стержни состоят из урана 235 с обогащением 3,6% по весу. Гадолиний в этих стержнях находится в виде  $Gd_2O_3$ . Это вещество составляет 4% по весу от топлива в стержне.

Транспортное устройство с 16 свежими тепловыделяющими сборками имеет внутренний диаметр 200 см и толщину стенок 30 см. Детали сетки, поддерживающей тепловыделяющие сборки, авторам неизвестны. Расстояние между центрами тепловыделяющихборок, измеренное между плоскими гранями двух соседнихборок, составляет 40 см. Транспортное устройство расположено вертикально на бетонном полу. Толщина дна транспортного устройства из нержавеющей стали составляет 30 см, а его высота – 567 см.

Результаты расчета  $K_{eff}$  с использованием MCNPX и сравнение с результатами, полученными в аналогичных исследованиях критичности ТВС реактора ВВЭР-1000 с использованием кода SCALE4.3 [4], приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты моделирования ТВС

Описание	$K_{\text{eff}}$ (SCALE)	$\sigma$ (SCALE)	$K_{\text{eff}}$ (MCNPX)	$\sigma$ (MCNPX)
Одна ТВС в транспортном устройстве; вода с естественной плотностью в транспортном устройстве и ТВС	0,8488	0,0008	0,8722	0,0013
Одна ТВС в транспортном устройстве; вода с пониженной плотностью (0,2 г/см <sup>3</sup> ) в транспортном устройстве и в ТВС	0,3872	0,0006	0,40175	0,0011
16 ТВС в транспортном устройстве; без воды	0,2805	0,0002	0,2798	0,00036
Одна ТВС в транспортном устройстве; вода (1 г/см <sup>3</sup> ) в транспортном устройстве и в ТВС	0,8704	0,0007	0,90566	0,00098
16 ТВС в транспортном устройстве; вода с пониженной плотностью (0,2 г/см <sup>3</sup> ) в транспортном устройстве и в ТВС	0,9342	0,0007	0,9734	0,00109
16 ТВС в транспортном устройстве; вода с пониженной плотностью (0,1 г/см <sup>3</sup> ) в транспортном устройстве и в ТВС	0,8903	0,0007	0,8873	0,00127

### Заключение

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- программы, созданные на основе кодов SCALE и MCNPX для расчета коэффициента размножения нейтронов в тепловыделяющих сборках реактора типа ВВЭР-1000, дают почти одинаковые результаты для рассмотренных случаев;

- коэффициент размножения нейтронов для рассмотренных случаев от 1 до 16 тепловыделяющих сборок реактора ВВЭР-1000 не превышает единицы, что говорит о ядерной безопасности сборок в транспортном устройстве;

- отличие в абсолютной величине  $K_{\text{eff}}$  полученное с использованием программ на основе кодов SCALE и MCNPX, в некоторой степени может быть обусловлено неполными сведениями об объекте моделирования.

*Научная новизна* работы заключается в том, что получил дальнейшее развитие метод определения ядерной и радиационной опасности объектов с делящимися материалами.

*Практическая ценность* работы заключается в том, что разработаны программы на основе кода MCNP для расчета характеристик опасных объектов.

Работа выполнена в рамках проекта УНТЦ 3511.

### Перечень ссылок

1. *SCALE*. A Modular Code System for Licensing Evaluation. NUREG / CR-0200. – Vols. 1,2,3. – May, 2000.
2. *MCNP-A*. General Monte-Carlo N-Particle Transport Code. Version 4C / Ed. Briesmeister J.F. – 2000.
3. *MCNPX 2.4-0*. RSICC Computer Code Collection. Monte-Carlo N-Particle Transport Code System for Multiparticle and High Energy Applications / CCC-715. – 2002.
4. *Goluoglu S.* Criticality Calculation of Fresh LEU and MOX Assemblies for Transport and Storage at the Balakovo Nuclear Power Plant. – ORNL / TM-2000/286. – P.52.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Авраменко В.П. (Харьков, Харьковский национальный университет радиоэлектроники).

**Статья рекомендована к публикации** отделом математического моделирования физических процессов и систем Харьковского физико-технического института (Протокол №1 от 19.01.2007 г.).

Поступила 26.01.2007 г.

*Prokhorets I.M., Prokhorets S.I., Rudychev Y.V., Fedorchenko D.V., Khazhmuradov M.A., Lukyanova V.P.* **Imitation modeling of the objects with nuclear and radiation risks**

Results of the safety investigations for objects with fission materials are given. The method of definition of nuclear and radiating danger of objects with fission materials has get the further development. The programs are developed on the basis of MCNP code for computing of the characteristics of dangerous objects.

*Прохорец И.М., Прохорец С.И., Рудычев Е.В., Федорченко Д.В., Хажмурадов М.А., Лукьянова В.П.* **Имитационное моделирование объектов с ядерной и радиационной опасностью**

Приведены результаты исследования опасности объектов с делящимися материалами. Получил дальнейшее развитие метод определения ядерной и радиационной опасности объектов с делящимися материалами. Разработаны программы на основе кода MCNP для расчета характеристик опасных объектов.

*Прохорець І.М, Прохорець С.І., Рудичев Є.В., Федорченко Д.В., Хажмурадов М.А., Лук'янова В.П.* **Імітаційне моделювання об'єктів з ядерною і радіаційною небезпекою**

Наведено результати дослідження небезпеки об'єктів з матеріалів, що діляться. Дістав подальшого розвитку метод визначення ядерної та радіаційної небезпеки об'єктів з матеріалами, що діляться. Розроблено програми на основі коду MCNP для розрахунку характеристик небезпечних об'єктів.

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОТСУТСТВУЮЩИХ ДАННЫХ В СИМВОЛЬНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ

*Рубцов А.Г., Садовский М.Г., Сенашова М.Ю.*

Институт вычислительного моделирования СО РАН

### Введение

Проблема восстановления отсутствующих или утерянных данных актуальна как для фундаментальных, так и для прикладных областей науки. В качестве данных будем рассматривать конечные символьные последовательности. Будем полагать, что алфавит, в котором записаны изучаемые последовательности, заранее известен. Теоретически, любые данные можно свести к этой форме. Отсутствие части такой последовательности будем рассматривать как потерю данных. При этом будем считать, что длина утерянной части известна, а сама отсутствующая часть является связным диапазоном. В такой постановке проблема весьма актуальна для самых различных областей знания — от теории передачи данных до молекулярной биологии. В данной работе изложены результаты, связанные с восстановлением таких данных на основе принципа максимального подобия.

Мы решаем *задачу* восстановления утерянных данных при помощи имитатора мелкозернистого высоко параллельного вычислителя. Этот вычислитель (кинетическая машина Кирдина) основан на идее молекулярных вычислений [1–5].

### 1. Постановка задачи

Рассматривается символьная последовательность, состоящая из символов алфавита  $\Omega$ . Пусть  $L$  — длина участка, который необходимо восстановить (будем называть его лакуной). Словом длины  $q$  будем называть любую связную последовательность этой длины, составленную из символов алфавита  $\Omega$ . Опорным частотным словарём  $W$  толщины  $q$  будем называть список всех слов этой длины, встречающихся в доступных исследователю частях, с указанием частот этих слов  $f_\omega$ . Словарь  $W$  называется полным, если он содержит слова, состоящие из всех возможных сочетаний символов алфавита  $\Omega$ . В противном случае словарь неполный. Пополненным частотным словарём  $\bar{W}$  будем называть частотный словарь (толщины  $q$ ), составленный по той последовательности, которая возникает в результате заполнения пробела.

Левой (соответственно, правой) опорой длины,  $0 \leq t \leq q-1$  будем называть слово этой длины, расположенное сразу слева (соответ-

ственно, сразу справа) от лакуны. Тем самым, в зависимости от величины  $t$ , восстанавливаемая часть имеет длину  $L + 2t$ , при том условии, что первые и последние  $t$  символов являются фиксированными.

Построить заполнение лакуны означает построить из слов длины  $q$  цепочку

$$\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_{L+2t-q}, \omega_{L+2t-q+1} \quad (1)$$

длиной  $L + 2t$ , у которого первые  $t$  и последние  $t$  символов заданы, а для каждой пары соседних слов выполнялось условие

$$\omega_j = i_1 \bar{\omega}; \quad \bar{\omega} i_q = \omega_{j+1},$$

т.е. два соседних слова пересекаются по общему подслову длины  $q - 1$ , а первое слово в этой цепочке (соответственно, последнее) начиналось (соответственно, заканчивалось) левой опорой  $\alpha_l$  (соответственно, правой опорой  $\alpha_r$ ). Для построения цепочки (1) на первом шаге к какой-либо из опор (возьмем для определенности левую опору  $\alpha_l$ ) присоединим слово из частотного словаря, у которого первые  $q - 1$  символов совпадают с последними  $q - 1$  символами опоры. В общем случае таких слов найдется несколько. Выбор присоединяемого слова производится случайным образом. Присоединение производится добавлением к опоре последнего символа слова из частотного словаря. Присоединение символов продолжается, пока длина цепочки не достигнет  $L + 2t$  символов, либо в словаре не найдется слова, которое может быть присоединено к цепочке. Из всех цепочек, достигших длины  $L + 2t$  нас интересуют только те, у которых последние  $t$  символов совпадают с правой опорой  $\alpha_r$ . Так как на каждом шаге выбор следующего присоединяемого слова осуществлялся случайным образом, то число всех возможных заполнений для полного словаря  $W$  составляет  $|\Omega|^L$ . Это число является верхней границей количества возможных заполнений. Для неполного словаря число возможных заполнений меньше. Задача построения заполнения является очень ресурсоёмкой, поэтому нам требуется оценить количество заполнений, правые концы которых совпадут с правой опорой  $\alpha_r$ .

## 2. Матричное представление частотных словарей

Задачу поиска замощений, эффективно восстанавливающих отсутствующие данные, помогает решить специальное представление частотного словаря. Всякий частотный словарь представляет собой (упорядоченный) список слов длины  $q$ . Такой список можно однозначно преобразовать в матрицу  $A$  порядка  $N^{q-1} \times N^{q-1}$  ( $N$  – мощность алфавита  $\Omega$ ), в которой строки и столбцы помечены словами и  $\omega''$  длины  $q$  каждое. Тогда любое слово из словаря  $W(q)$ , начинающееся последними  $q - 1$  символами слова  $\omega'$  и заканчивающееся подсловом  $\omega''$ , соответствует

элементу матрицы, находящемуся на пересечении соответствующих строки и столбца; а сам этот элемент является частотой слова  $\omega$ .

Заменив в матрице  $\mathbf{A}$  элементы в каждой строке таким образом, чтобы их сумма по строке стала равной единице, а соотношение между элементами сохранилось, получаем матричное представление  $\mathbf{A}$  модифицированного частотного словаря. Наконец, введём ещё одно представление частотного словаря. Заменив в матрице все ненулевые элементы на единицу, а нулевые оставив неизменными, получаем матрицу  $\mathbf{A}$ , которую будем называть индикаторной матрицей.

Матричное представление частотного словаря позволяет пролить свет на решение вопроса о существовании (и построении) замощения из слов заданного частотного словаря. Действительно, построение замощения (1) эквивалентно возведению матрицы  $\mathbf{A}$  в степень  $L+t$ . Пусть  $t = q-1$ ; тогда вопрос о существовании замощения из словаря  $W(q)$  сводится к вопросу о существовании ненулевого элемента в матрице  $\mathbf{A}^{L+t}$ , стоящего на пересечении строки и столбца, соответствующих опорам  $\alpha_l$  и  $\alpha_r$ .

Кроме вопроса о существовании замощения из словаря  $W(q)$ , соответствующего матрице  $\mathbf{A}$ , важным является вопрос о числе таких замощений, удовлетворяющих граничным условиям (то есть, опирающимся на заданные опоры). Ответ на этот вопрос может быть получен с помощью индикаторной матрицы  $\mathbf{A}$ . Действительно, в силу построения самой этой матрицы, её произведение с самой собой даст возможное число продолжений исходной затравки на два символа "вперёд". Вообще, элементами матрицы  $\mathbf{A}^{L+t}$  будут только натуральные числа; соответственно, элементы этой матрицы будут соответствовать числу замощений, которые могут начаться с заданной опоры (затравки) и заканчиваться также заданной опорой.

Таким образом, для всякого частотного словаря возможны три (различных) матричных представления. Первое полностью эквивалентно самому частотному словарю, второе соответствует Марковскому процессу порядка  $q-1$ , который реализует гипотезу о наиболее вероятном продолжении слов этой длины, третье представление эквивалентно задаче определения числа маршрутов на графе, соответствующем матрице.

### 3. Эксперименты и результаты

В работе представлены результаты восстановления отсутствующих данных, проведённого в силу принципа максимального подобия. В вычислительных экспериментах, результаты которых изложены в настоящей статье, использовались символьные последовательности

различной природы: искусственно сгенерированные последовательности из двухбуквенного алфавита, генетические тексты (использовались последовательности полностью расшифрованных геномов различных организмов) и последовательности из естественных языков.

Таблица 1 – Значения условной энтропии для наилучшего заполнения, построенного по полному словарю, в силу критерия минимума условной энтропии (2,3 – двухбуквенные тексты,  $p$  – двухбуквенные периодические последовательности, 4 – генетические тексты, 32 – текст Всемирной декларации прав человека)

	Виды текстовых последовательностей				
$q$	2	3	$p$	4	32
3	$2.11001 \cdot 10^{-7}$	$2.11731 \cdot 10^{-7}$	$1.31713 \cdot 10^{-6}$	$1.08111 \cdot 10^{-6}$	0.002501334
4	$8.63964 \cdot 10^{-7}$	$1.15992 \cdot 10^{-6}$	$5.68907 \cdot 10^{-7}$	$7.28976 \cdot 10^{-6}$	0.004114464
5	$8.80001 \cdot 10^{-6}$	$9.15474 \cdot 10^{-6}$	$4.37778 \cdot 10^{-6}$	$3.55110 \cdot 10^{-5}$	0.005274570
6	$3.25038 \cdot 10^{-5}$	$2.83748 \cdot 10^{-5}$	$2.17838 \cdot 10^{-5}$	0.000127584	0.006469274
7	$8.54041 \cdot 10^{-5}$	$9.11896 \cdot 10^{-5}$	$2.43775 \cdot 10^{-5}$	0.000383415	0.007102911
8	0.000250881	0.000225592	$1.81110 \cdot 10^{-5}$	0.000727322	0.006994414
9	0.000533898	0.000531811	$9.28852 \cdot 10^{-6}$		0.007878056
10	0.00102765	0.00104568	$1.12619 \cdot 10^{-5}$		0.00755565
11	0.0018486	0.00176425	$1.32075 \cdot 10^{-5}$		0.00835729
12	0.0025176	0.00244363	$1.43811 \cdot 10^{-5}$		
13	0.0034176	0.00342195	$1.55263 \cdot 10^{-5}$		

Двоичные последовательности, использовавшиеся как тест-объекты, были получены с помощью простых правил. Первая последовательность была составлена из записанных подряд, без пробелов, натуральных чисел в двоичной системе счисления. Ещё один вариант двоичной последовательности был получен путём записи подряд, без пробелов, натуральных чисел в троичной системе счисления, после чего из записи вычёркивались все цифры 2. Длина последовательностей составляла не менее 6000 символов.

Во всех последовательностях искусственно создавались лакуны длиной от 50 до 200 символов. Затем для различных значений  $q$  строился опорный частотный словарь  $W(q)$  и по нему строились замощения.

Непосредственная интерпретация результатов, полученных на двоичных последовательностях, затруднена. Для того, чтобы облегчить восприятие работы предложенного способа восстановления утерянных данных, мы провели серию вычислительных экспериментов на текстах из естественных языков. Из оригинального текста Декларации были удалены пробелы и знаки препинания. Длина получившейся символьной последовательности составила около 7500 символов, длина лакуны – 100 симво-

лов. Использовались словари толщиной  $3 \leq q \leq 8$  символов.

Ниже приведены варианты замощений лакуны для словарей толщины  $q=4$ ,  $q=6$ ,  $q=8$  и собственно текст, который был удален из Декларации для получения лакуны. После удаления знаков препинания и пробелов исходный (удалённый) текст выглядел следующим образом:

егоимуществакаждыйчеловекимеетправонасвободумыслисоветии  
религииэтоправовключаетсвободуменятьсвоюрел

При восстановлении удалённого текста по словарям  $W(4)$ ,  $W(6)$  и  $W(8)$ , соответственно, были получены следующие цепочки:

имладатьсяниисовявляющеедолжностиправонасвободисоциальностиидруг  
иминациякаждыйчеловекимеетправонасторойирел  
егогражданствоиработающийимеетправонаравнуюзащитойкаждыйч  
еловекимеетправоприниматьучаствоватьсвоюрел  
егогражданстваилитакихпосягательствкаждыйчеловекимеетправ  
онаобеспечивающихсвободуисповедоватьсвоюрел

Хорошо видно, что длина слов в шесть символов (и более) обеспечивает восстановление утерянного фрагмента, который поддаётся интерпретации.

### Заключение

Работы, посвященные восстановлению пропущенных данных, в основной своей массе посвящены многомерным данным [6–10]. В этих работах объекты (данные) представляются точкой в многомерном пространстве, а параметры объекта являются координатами этой точки. При этом для восстановления пропущенных координат зачастую требуется некоторая априорная информация. Научная новизна изложенного здесь метода состоит в том, что он работает с символьными последовательностями, при этом утерянная часть символьной последовательности восстанавливается с использованием только той информации, которая содержится в самой символьной последовательности (частотные словари). На практике метод может применяться во всех задачах, которые требуют восстановления пропусков в символьных последовательностях — от теории передачи данных до молекулярной биологии.

### Перечень ссылок

1. Горбунова Е.О. Формально-кинетическая модель бесструктурного мелкозернистого параллелизма // Сиб. журн. вычисл. математики. – Новосибирск, 1999. – Т. 2, № 3. – С. 239–256.
2. Gorban A.N., Gorbunova K.O., Wunsch D.C. Liquid Brain: Kinetic Model of Structureless Parallelism // Advances in Modelling & Analysis. – ASME, Vol. 5. – No5. – 2000.
3. Gorban A.N., Gorbunova K.O., Wunsch D.C. Liquid Brain: The Proof of Algorithmic Universality of Quasichemical Model of Fine-Grained Parallelism // Neural Network World. – 2001. – № 4. – P. 391–412.
4. Немецкинский Е.О., Кондратенко Ю.В., Садовский М.Г. Предварительные результаты в проблеме восстановления утерянных данных с помощью кинетической машины Кирдина // Вычислительные технологии. – 2004. – Т. 9. – № 1. – С. 42–57.

5. *Gorbutnova E.O., Kondratenko Yu.V., Sadovsky M.G.* Data loss reparation due to indeterminate fine-grained parallel computation // ICCS 2003, LNCS 2658 / Eds.: P.M.A.Sloot et al. – Berlin: Springer-Verlag, 2003. – P. 794–801.

6. *Загоруйко Н.Г., Ёлкина В.Н., Тимеркаев В.С.* Алгоритм заполнения пропусков в эмпирических таблицах (алгоритм "ZET") // Вычислительные системы. – Новосибирск, 1975. – Вып. 61. – С. 3–27.

7. *Злоба Е., Якув И.* Статистические методы восстановления пропущенных данных. // Computer Modelling & New Technologies. – 2002. – Vol. 6, № 1. – P. 51–61.

8. *Гояндина Н., Осипов Е.* Метод "Гусеница"-SSA для анализа временных рядов с пропусками // Математические модели. Теория и приложения, СПб.: НИИХ, 2005.

9. *Jaap P. L. Brand.* Development, implementation and evaluation of multiple imputation strategies for the statistical analysis of incomplete data // Print partners ispkamp, Enschede, 1999.

10. *Горбань А.Н., Макаров С.В., Россиев А.А.* Нейронный конвейер для восстановления пробелов в таблицах и построения регрессии по малым выборкам с неполными данными // V Международная конференция "Математика, компьютер, образование". –Дубна, 1998. – С. 53.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Проворова О.Г. (Красноярск, Красноярский государственный университет).

*Поступила 30.01.2007 г.*

*Rubtsov A.G., Sadovsky M.G., Senashova M.Yu.* **Data loss recovery at the symbolic sequences**

Data loss recovery is provided due to the principle of maximal likelihood. The matrix representations of the frequency dictionary, which are allows to calculate the number of possible fillings and the probability of its receiving are describe. The defined method is applied for various area of knowledge, for example at communications theory and molecular biology.

*Рубцов А.Г., Садовский М.Г., Сенашова М.Ю.* **Восстановление отсутствующих данных в символьных последовательностях**

В работе рассматривается восстановление пропущенных данных в символьных последовательностях в силу принципа максимального подобия. Описано матричное представление частотного словаря, которое позволяет вычислить число возможных заполнений и вероятность их получения. Изложенный метод применим для самых различных областей знания – от теории передачи данных до молекулярной биологии.

*Рубцов А.Г., Садовський М.Г., Сенашова М.Ю.* **Відновлення відсутніх даних у символьних послідовностях**

У роботі розглядається відновлення пропущених даних у символьних послідовностях у силу принципу максимальної подоби. Описано матричне подання частотного словника, що дозволяє обчислити число можливих заповнень та імовірність їхнього одержання. Викладений метод є застосовним для різних областей знання – від теорії передачі даних до молекулярної біології.



Керування технічними та соціально-економічними об'єктами та системами

Control of technical and social-economic objects and systems

Управление техническими и социально-экономическими объектами и системами

УДК 681.511.4

## РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМОЙ

*Потапенко Е.М., Казурова А.Е., Васильева Е.В.*

Запорожский национальный технический университет

### Введение

Все системы управления (СУ) в той или иной степени являются неопределенными. Неопределенности могут быть:

- структурными, связанными с наличием паразитной динамики,
- параметрическими,
- координатными (не полностью и не точно известен вектор состояния),
- экзогенными, определяемыми внешними воздействиями.

Неопределенности ухудшают работу СУ и могут привести к потере их работоспособности. Для рационального построения СУ необходимо знание всего вектора состояния. Однако на практике измерить весь вектор состояния обычно не представляется возможным. В этом случае используют динамические фильтры и наблюдатели.

Уравнения движения большинства динамических объектов естественным образом получаются в виде матричных дифференциальных уравнений второго порядка с матричными коэффициентами, обладающими такими полезными свойствами как симметричность, кососимметричность, определенно и знакоположительность, разреженность. В то же время, вся теория наблюдателей, а также регуляторов приспособлена к описанию СУ в виде матричных дифференциальных уравнений первого порядка в форме Коши. Поэтому для синтеза и анализа СУ уравнения второго порядка приводят к форме Коши, в результате чего теряются перечисленные выше свойства, а порядок матриц увеличивается в 2 раза.

Известно [1, 2], что для одного и того же объекта объем вычислений при интегрировании уравнений движения в виде системы уравнений второго порядка в несколько раз меньше, чем для уравнений первого порядка. Кроме того, критерии устойчивости для систем второго порядка более простые и разнообразные. Поэтому была начата разработка теории наблюдателей, представленных в виде дифференциальных уравнений второго порядка [2–4]. Было выявлено, что наблюдатели второго порядка требуют большего количества измерителей, чем наблюдатели первого порядка. В работе [5] предложено преобразование координат, устраняющее необходимость в дополнительных датчиках. Анализ методов исследования устойчивости решений матричных дифференциальных уравнений второго порядка посвящена работа [6].

В данной статье на простом примере рассматриваются процессы управления нелинейной нестационарной неопределенной системой с неполной информацией о векторе состояния.

### 1. Постановка задачи

Пусть объект управления описывается уравнением

$$m\ddot{x} = bsat(u) + m_l, \quad (1)$$

где  $x$  – перемещение,  $m$  – неизвестный момент инерции,  $sat(u)$  – управляющее воздействие с ограничением,  $b$  – коэффициент усиления,  $m_l$  – неизвестное внешнее воздействие. Будем полагать

$$m = m_0 + m_\delta, \quad b = b_0 + b_\delta. \quad (2)$$

Здесь  $m_0, b_0$  – детерминированные части (номинальные значения),  $m_\delta, b_\delta$  – неизвестные погрешности. С учетом (2) уравнение (1) примет вид

$$m_0\ddot{x} = b_0sat(u) + f, \quad (3)$$

где неопределенность

$$f = m_l - m_\delta\ddot{x} + b_\delta sat(u). \quad (4)$$

Будем полагать, что  $f$  – кусочно дифференцируемая функция времени. В свете сказанного, неопределенность  $f$  будем аппроксимировать следующей системой уравнений:

$$f = z_1, \quad \dot{z}_1 = z_2, \quad \dot{z}_2 = 0, \quad (5)$$

откуда можно записать

$$f = z_1, \quad \ddot{z}_1 = 0. \quad (6)$$

Измерением является перемещение  $x$ , т.е.

$$y = x. \quad (7)$$

В качестве датчика перемещения рассматривается инкрементный датчик, вырабатывающий импульсы приращений сигналов  $x_{\Delta}$ . Для получения перемещения эти импульсы суммируют, в результате чего получается релейный ступенчатый сигнал.

В статье ставится *задача* синтеза и сравнительного анализа наблюдателей, оценивающих вектор состояния  $(x, \dot{x})$ , ускорение  $\ddot{x}$  и неопределенность  $f$  (4), которые сравниваются с известным наблюдателем работы [5], а также управления перемещением по полученной информации.

## 2. Основной результат

Информацию о скорости и ускорении можно получить с помощью асимптотического дифференциатора, который описывается уравнением [7, 8]:

$$\dot{\hat{r}} = A\hat{r} + L_r(\hat{r}_1 - x), \quad (8)$$

где

$$\hat{r} = \begin{Bmatrix} \hat{r}_1 \\ \hat{r}_2 \\ \hat{r}_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \hat{x} \\ \dot{\hat{x}} \\ \ddot{\hat{x}} \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad L_r = [l_{r1} \quad l_{r2} \quad l_{r3}]^T,$$

$L_r$  – матрица коэффициентов наблюдателя, символом “^” обозначены оценки соответствующих переменных. При известном  $\ddot{x}$  из уравнения (3) можно найти

$$\dot{f} \approx m_0 \ddot{x} - b_0 \text{sat}(u), \quad (9)$$

где, в отличие от (4), истинное ускорение  $\ddot{x}$  заменено его оценкой  $\ddot{\hat{x}}$ .

Избавимся от необходимости получения оценки  $\ddot{\hat{x}}$  следующим образом. Будем полагать быстродействие наблюдателя  $f$ , настолько большим, что в масштабе времени наблюдателя можно считать

$$\dot{f} = 0. \quad (10)$$

По уравнениям (10), (9) построим наблюдатель для оценки  $f$  в виде

$$\dot{\hat{f}} = l_f(\hat{f} - f), \quad (11)$$

где  $\hat{f}$  – оценка  $f$ ,  $l_f$  – коэффициент передачи наблюдателя. Подстановка (9) в (11) дает

$$\dot{\hat{f}} = l_f(\hat{f} + b_0 \text{sat}(u) - m_0 \ddot{\hat{x}}). \quad (12)$$

Введем обозначение

$$z = \hat{f} + l_f m_0 \dot{x} \quad \heartsuit \quad \dot{\hat{f}} = z - l_f m_0 \dot{x}, \quad (13)$$

с учетом которого уравнение (12) принимает вид

$$\dot{z} = l_f (\dot{\hat{f}} + b_0 \text{sat}(u)). \quad (14)$$

$\hat{f}$  определяется по результату интегрирования уравнения (14) и второму выражению в (13). Пусть ошибка наблюдателя

$$\tilde{f} = \hat{f} - f. \quad (15)$$

Вычитая из уравнения (11) уравнение (10), получим уравнение

$$\dot{\tilde{f}} = l_f \tilde{f} \quad \text{с решением}$$

$$\varepsilon \tilde{f}(0) = \varepsilon \tilde{f}(t_t) \exp(l_f t_t), \quad (16)$$

где  $\varepsilon$  – зона, при захождении в которую переходный процесс считается закончившимся,  $t_t$  – заданное время переходного процесса. Из (16) следует, что при  $l_f < 0$  решение  $\tilde{f} = 0$  является асимптотически устойчивым, поэтому на основании (15) можно записать  $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{f} = f$  при  $t \rightarrow \infty$ . На основании выражения (16) по заданному времени переходного процесса можно определить коэффициент  $l_f$

$$l_f = \frac{1}{t_t} \ln \varepsilon. \quad (17)$$

В работе [5] для оценки вектора состояния и неопределенности синтезирован наблюдатель в виде матричного дифференциального уравнения второго порядка, который для системы (3), (6), (7) имеет вид

$$m_0 \ddot{v} - l_v \dot{v} - l_d v - w = b_0 \text{sat}(u) - \left[ l_d + l_v^2 m_0^{-1} \right] x - \left[ l_{zv} + l_d m_0^{-1} l_v \right] \int_0^t x dt, \quad (18)$$

$$\ddot{w} - l_{zv} \dot{v} - l_{zd} v = - \left[ l_{zd} + l_{zv} m_0^{-1} l_v \right] x - l_{zd} m_0^{-1} l_v \int_0^t x dt,$$

где

$$\hat{x} = v - m_0^{-1} l_v \int_0^t y dt, \quad \dot{\hat{x}} = \dot{v} - m_0^{-1} l_v y, \quad \ddot{\hat{x}} = \ddot{v} - m_0^{-1} l_v \dot{y}, \quad (19)$$

$$\hat{z} = w - l_{zv} \int_0^t y dt, \quad \dot{\hat{z}} = \dot{w} - l_{zv} y, \quad \ddot{\hat{z}} = \ddot{w} - l_{zv} \dot{y},$$

$l_v, l_d, l_{zv}, l_{zd}$  – коэффициенты передачи наблюдателя.

Управление перемещением осуществляется посредством робастного комбинированного компенсатора [10], регулятор которого, в соответствии с (3), описывается уравнением

$$u = u_{00} - \hat{f}, \quad (20)$$

где составляющая  $\hat{f}$  предназначена для компенсации неопределенности,  $u_{00}$  – часть регулятора, которая формирует вид переходного процесса и записывается в виде

$$u_{00} = -k_1(x - x_p) - k_2(\dot{x} - \dot{x}_p) + m_0\ddot{x}_p. \quad (21)$$

Индекс “ $p$ ” указывает на программное значение перемещения.

### 3. Результаты моделирования

При компьютерном моделировании принимались следующие параметры:  $m_0 = 1,17 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ,  $m = 2m_0$ ,  $b = 0,7$ ,  $b_0 = 1$ ,  $f = 0 \dots 262 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , дискретность инкрементного датчика  $0,0174 \text{ рад}$  ( $1^\circ$ ).

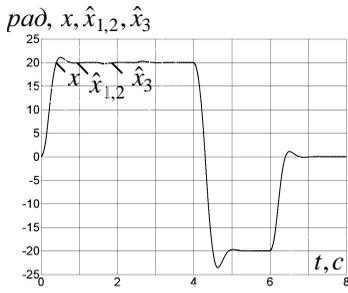
Моделировались уравнения (1) – (4) со следующими наблюдателями: 1) уравнения (8), (9); 2) уравнения (8), (13), (14); 3) уравнения (18), (19).

Расчет коэффициентов наблюдателей осуществлялся по стандартным полиномам Баттерворта [9]. Коэффициенты  $k_1$ ,  $k_2$  также выбирались с помощью модального управления по стандартному полиному Баттерворта для системы уравнений (3), (20), (21).

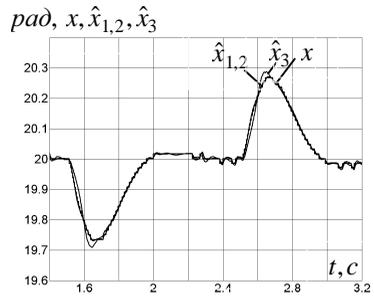
При управлении перемещение моделировались уравнения (1) – (4), (8), (13), (14), (20), (21).

На рис. 1а, 2а, 3а дано сравнение оценок перемещения ( $x$ ), скорости ( $\dot{x}$ ) и неопределенности ( $f$ ) соответственно с их истинными значениями. На рис. 1б, 2б, 3б представлены укрупненные фрагменты соответствующих процессов. Индексами 1, 2, 3 обозначены номера наблюдателей. Процесс состоит из разгона, стабилизации отклонения  $20 \text{ рад}$ , приложения при  $t = 1,5 \text{ с}$  и снятия при  $t = 2,5 \text{ с}$  внешнего воздействия, реверса, стабилизации угла  $-20 \text{ рад}$  и торможения до  $0 \text{ рад}$ .

Как следует из рисунков, несмотря на наличие большой неопределенности в моменте инерции, управляющем воздействии и неопределенности внешнего воздействия при их наихудшем сочетании осуществляется качественное управление во всех рассмотренных режимах. Все три наблюдателя обеспечивают точную оценку перемещений, скоростей и достаточно точную оценку неопределенности. При оценке неопределенности наблюдаются пульсации обусловленные спецификой инкрементного датчика.

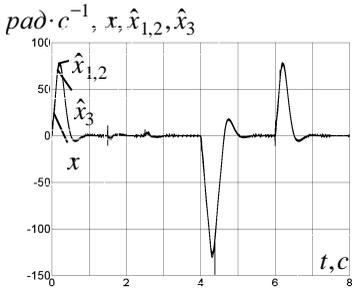


а)

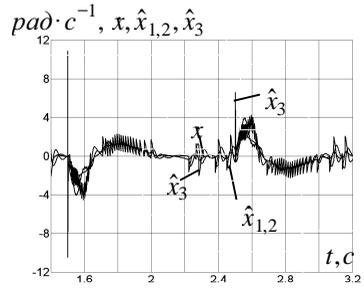


б)

Рисунок 1

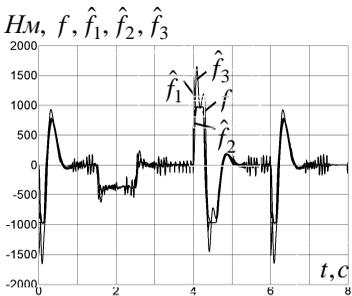


а)

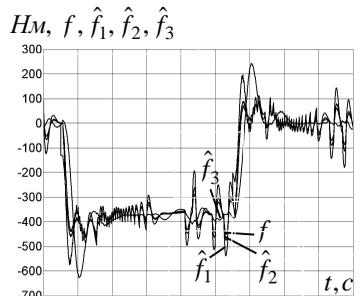


б)

Рисунок 2



а)



б)

Рисунок 3

### Заключение

В работе исследовано робастное управление неопределенной системой.

*Научной новизной* работы является сравнение систем управления с тремя типами наблюдателей вектора состояния и неопределенности системы.

Для формирования законов управления движением могут применяться каждый из исследованных наблюдателей. Для рассмотренной упрощенной задачи, с точки зрения точности и объема вычислений в управляющем процессоре, предпочтение следует отдать второму наблюдателю.

*Практическая ценность* работы состоит в демонстрации возможности обеспечения качественной работы системы управления в условиях большой неопределенности.

### Перечень ссылок

1. *Серебряный И.А.* Алгоритм численного интегрирования систем дифференциальных уравнений второго порядка // Колебания сложных механических систем: Сб. научн. тр. Ин-т технической механики АН УССР. Киев: Наукова думка, 1990. – С. 15–19.

2. *Belvin W.K., Park K.C.* On the state estimation of structures with second-order observers // Proc. 30<sup>th</sup> Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. – AIAA paper №89-1241, April 3-5, 1989. – P. 721–727.

3. *Juang J.N., Maghami P.G.* Robust eigensystem assignment for state estimators using second-order models // AIAA Guidance, Navig. and Contr. Conf., Portland, Ore, Aug. 20-22, 1990. – Collect. Tech. Pap. 1990. Pt. 2. – P. 1428–1438.

4. *Хашемипур Х.Р., Лауб А.Дж.* Фильтр Калмана для моделей второго порядка // Аэрокосмическая техника. – 1989. – №1. – С. 127–133.

5. *Потапенко Е.М.* Робастные системы управления с наблюдателями второго порядка // Автоматика и телемеханика. – 1996. – №2. – С. 100–107.

6. *Потапенко Е.М.* Робастная устойчивость управляемых динамических систем // Известия РАН. Механика твердого тела. – 1993. – №5. – С. 15–22.

7. *Дылевский А.В., Лозгачёв Г.И.* Применение метода пространства состояний для синтеза дифференциаторов // Автоматика и телемеханика. – 1999. – № 9. – С. 13–20

8. *Потапенко Е.М., Потапенко Е.Е., Казурова А.Е.* Асимптотическое дифференцирование ступенчатых сигналов в задачах управ-

ления скоростью и перемещением // *Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. Міжвідомчий науково-технічний збірник.* – Вип. 66. – Київ: «Техніка». – С. 286–288.

9. *Кузовков Н.Т.* Модальное управление и наблюдающие устройства. – М.: Машиностроение, 1976. – 184с.

10. *Потапенко Е.Е., Потапенко Е.М.* Синтез экстремального робастного управления асинхронным приводом // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск “Проблеми сучасної електротехніки”.* – 2000. – Ч.6. – С. 34–37.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Труфанов И.Д. (Запорожье, ЗНТУ).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой электропривода Запорожского национального технического университета (протокол №11 от 15.01.2007 г.).

*Поступила 31.01.2007 г.*

*Potapenko Ye.M., Kazurova A.Ye., Vasilyeva Ye.V.* **Robust control of the uncertain system**

On a prime instance position control process by means of the robust combined compensator consisting of the state vector and control system uncertainty observer and a regulator is considered. Comparison of three type observers of the compensator is carried out. Computer simulation has confirmed functionality of the synthesized control system.

*Potapenko E.M., Kazurova A.E., Vasilyeva E.V.* **Робастное управление неопределенной системой**

На простом примере рассматривается процесс управления перемещением посредством робастного комбинированного компенсатора, состоящего из наблюдателя вектора состояния и неопределенности системы управления и регулятора. Проведено сравнение трех типов наблюдателей компенсатора. Компьютерное моделирование подтвердило работоспособность синтезированной системы управления.

*Potapenko S.M., Kazurova A.S., Vasilyeva S.V.* **Робастне керування невизначеною системою**

На простому прикладі розглядається процес керування переміщенням за допомогою робастного комбінованого компенсатора, що складається з спостережника вектора стану та невизначеності системи керування та регулятора. Проведено порівняння трьох типів спостережників компенсатора. Комп'ютерне моделювання підтвердило працездатність синтезованої системи керування.

УДК 378

## **РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ ИМИТАТОРОВ ОТКАЗОВ ДЛЯ ОТРАБОТКИ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Лученко О.А.<sup>1</sup>, Гавриленко О.И.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>НПП "Хартрон-ПЛАНТ"

<sup>2</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»

### **Введение**

В испытаниях при помощи имитаторов могут быть обеспечены все условия для проявления и регистрации как определяющих, так и сопутствующих процессов и, следовательно, для формирования общей и частной оценок качества систем управления космических летательных аппаратов (СУ КЛА). Современные системы испытаний используют для имитации условий эксплуатации аппаратные и программные имитаторы. При чем, как показывает знакомство с системами испытаний НПП "Хартрон", аппаратные имитаторы преобладают. В связи с тем, что программные имитаторы обладают рядом существенных на наш взгляд преимуществ (возможность быстрой модификации, имитации более широкого множества эксплуатационных условий, простота интерпретации результатов, меньшие энергозатраты, хорошая адаптируемость и др.) остановимся более подробно на них.

### **1. Особенности создания программных имитаторов**

Отличительными особенностями процесса создания программных имитаторов являются следующие свойства:

*1. Перераспределение функций между программным и аппаратным обеспечением.* В силу необходимости снижения времени разработки новых имитаторов, невозможности физически проимитировать большую часть условий эксплуатации, снижения затрат на всех этапах их жизненного цикла, а также в связи с повышением интеллекта подобных систем, все большую функциональную нагрузку перекладывается разработчиком систем испытаний на программное обеспечение, оставляя за аппаратной составляющей лишь отдельные легко моделируемые условия эксплуатации КЛА. Преимущества такого подхода очевидны как для разработчика, так и для эксплуатационщика, кото-

рый получает возможность последующей функциональной модернизации имитатора без замены аппаратной части, однако технологический цикл разработки и эксплуатации таких имитаторов требует новых подходов, отвечающих новым потребностям.

2. *Повышенная степень ответственности.* Наряду с высокими требованиями по надежности и корректности работы, возлагаемыми на имитаторы, относящиеся к классу КЛА, расширение функциональных возможностей одновременно возлагает и большую ответственность на имитаторы подобного рода.

3. *Усложнение математического (алгоритмического) обеспечения имитаторов.* Расширение функциональных возможностей и обеспечение современных требований, предъявляемых к СУ КЛА, обуславливает создание все более сложных алгоритмов работы имитаторов. При этом, зачастую, эффективность таких алгоритмов не может быть обоснована теоретически или полностью подтверждена в ходе ограниченного срока испытаний. Таким образом, реализация экспертного метода оценки логики работы системы, а также возможность оперативного уточнения алгоритмов работы имитаторов на всех этапах его жизненного цикла, обеспечивает эффективную эксплуатацию.

4. *Независимость программного обеспечения от аппаратного обеспечения имитаторов.* С повышением интеллекта имитаторов систем испытаний, логика их работы, в конечном итоге реализованная в виде программного обеспечения, должна становится независимой от аппаратной части.

## **2. Разработка программного имитатора исполнительного механизма систем ориентации и стабилизации КЛА**

Некоторые СУ КЛА можно рассматривать как «серые ящики», т.е. функционально завершенные системы, структура которых известна (усилитель мощности, исполнительный механизм, датчик), но обладающие малым количеством контрольных точек (в самом худшем случае – только вход и выход системы). В подобных СУ разработчики при проектировании не закладывают функциональные возможности контролирования промежуточных параметров. Это может быть оправдано при эксплуатации (особенно высоко надежных систем), но не оправдано при экспериментальной наземной отработке, когда необходимо исследовать поведение, как элементов системы, так и всей системы не только в номинальных режимах функционирования, но и в аварийных. К таким системам относится, например, блок двигателей-маховиков (БДМ), который применяется в качестве исполнительного механизма в автоматических системах ориентации и стабилизации космических летательных аппаратов. Структурная схема БДМ представлена на рисунке 1. В рассматриваемой системе контролируются только два сигнала:  $U_{\omega_0}^{\text{Sett.}}(s)$  и  $U_{\omega_0}^{\text{EFU}}(s)$ .

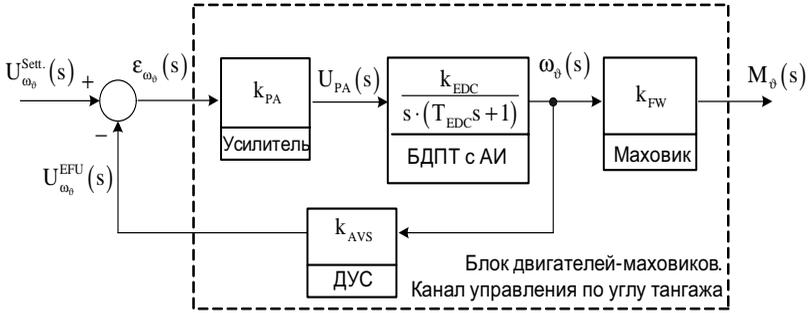


Рисунок 1 – Структурная схема БДМ:

БДПТ с АИ – бесконтактный двигатель постоянного тока с аналоговым интегратором, ДУС – датчик угловой скорости

Анализ представленной схемы позволяет сделать вывод, что исследование аварийных режимов для такой системы ограничено, т.к. в данной системе разработчики не предусмотрели дополнительные контрольные точки, что приводит к возможности исследования только одного класса параметрических отказов – изменение общего коэффициента передачи системы. Тем не менее, при экспериментальной наземной отработке этой системы необходимо исследовать как будут влиять остальные параметры на динамику поведения. Поэтому возникает необходимость в создании программного имитатора, который бы позволял осуществлять введение в систему параметрических отказов, таких как, например, изменение коэффициентов передач функциональных элементов и изменение постоянной времени БДПТ.

На рисунке 2 представлена обобщенная функциональная схема предлагаемого программного имитатора.

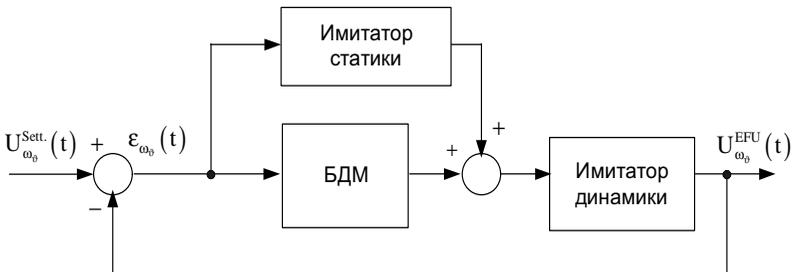


Рисунок 2 – Обобщенная функциональная схема имитатора с БДМ

В предлагаемом программном имитаторе предусмотрена возможность имитации параметрических отказов: изменения коэффициентов передачи  $k_{PA}, k_{EDC}, k_{FW}, k_{AVS}$  и постоянной времени  $T_{EDC}$ . А это значит, что в предлагаемом имитаторе предлагается реализовывать имитатор статики (SI) и имитатор динамики (DI). Как видно из рисунка 2 имитация изменения коэффициентов и постоянной времени происходит с использованием разных принципов.

На рис. 3 представлена структурная схема блока БДМ и имитатора отказа. Имитатор представлен в виде передаточных функций в непрерывном виде.

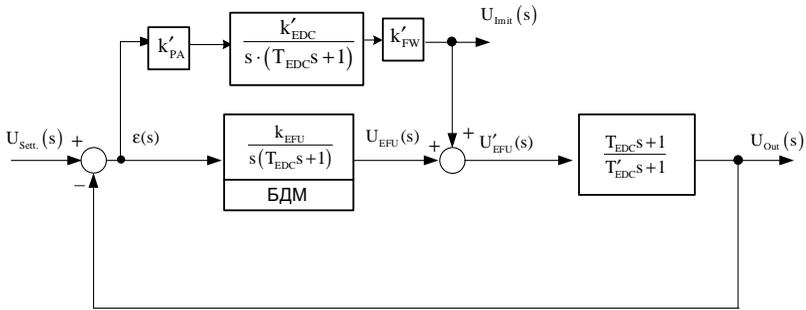


Рисунок 3 – Структурная схема блока БДМ с имитатором отказов

На этой схеме приняты следующие обозначения:  $U_{imit}(s)$  – выход имитатора статики БДМ;  $U'_{EFU}(s)$  – сумма реального выхода БДМ и имитатора статики,  $U'_{EFU}(s) = U_{imit}(s) + U_{EFU}(s)$ ;  $k'_{PA}, k'_{EDC}, k'_{FW}$  – задаваемая величина изменения коэффициентов передачи элементов БДМ (при отсутствии отказа должен быть равен нулю);  $T'_{EFU}$  – значение постоянной времени БДПТ при отказе (при отсутствии должна быть равной постоянной времени БДПТ).

Докажем правомерность ввода в БДМ имитатора и правильность его функционирования. Получим передаточную функцию разомкнутого контура по управлению. Для этого запишем передаточные функции блоков имитации и БДМ.

$$W_{SI}(s) = \frac{U_{imit}(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{k'_{EFU}}{s(T_{EDC}s + 1)}; W_{DI}(s) = \frac{U_{Out}(s)}{U'_{EFU}(s)} = \frac{(T_{EDC}s + 1)}{(T'_{EDC}s + 1)}; \quad (1)$$

$$W_{БДМ}(s) = \frac{U_{EFU}(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{k_{EFU}}{s(T_{EDC}s + 1)};$$

Исходя из передаточных функций в формуле (1), получим передаточную функцию разомкнутой цепи:

$$W_{OLS}(s) = \frac{U_{out}(s)}{\varepsilon(s)} = (W_{SI}(s) + W_{БДМ}(s))W_{DI}(s) = \frac{k'_{EFU} + k_{EFU} \cdot (T_{EDC}s + 1)}{s(T_{EDC}s + 1)(T'_{EDC}s + 1)}; \quad (2)$$

Как видно из формул (1–2) передаточные функции БДМ идентичны с учетом введенных выше ограничений.

Для реализации предлагаемых имитаторов необходимо перейти от непрерывного описания в форме передаточных функций к описанию уравнений вход-выход предлагаемых имитаторов в цифровом виде.

Рассмотрим процесс построения цифровой модели имитатора статики БДМ. На основании уравнения (1) составляем дифференциальное уравнение:  $T_{EDC}\ddot{y}_{SI} + \dot{y}_{SI} = k_{EFU}u_{SI}$ . Сделав замену  $y_{SI} = x_1$ , получаем непрерывную модель имитатора статики в пространстве состояний (3):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{T_{EDC}}x_2 + \frac{k_{EFU}}{T_{EDC}}u_{SI}; \\ y_{SI} = x_1. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_{SI} = A_{SI}x_{SI} + B_{SI}u_{SI}; \\ y_{SI} = C_{SI}x_{SI}. \end{cases} \quad (3)$$

$$x_{SI} = [x_1 \quad x_2]^T; u_{SI} = [\varepsilon]^T; y_{SI} = [U_{imit}]^T;$$

$$A_{SI} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_{EDC}} \end{pmatrix}; B_{SI} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{k_{EFU}}{T_{EDC}} \end{pmatrix}; C_{SI} = [1 \quad 0];$$

Для перевода полученной модели в цифровой вид необходимо воспользоваться стандартными преобразованиями:

$$A_d = e^{A_H T_0}; B_d = \int_0^{T_0} e^{A_H(T_0-\tau)} d\tau \cdot B_H, \quad (4)$$

где  $A_d$  и  $B_d$  – матрицы состояния и входа в цифровом виде.

Рассмотрим процесс построения модели имитатора динамики в пространстве состояний, передаточная функция которого представлена в (1). Перейдя от передаточной функции к дифференциальному уравнению получим:  $T'_{EDC}\dot{y}_{DI} + y_{DI} = T_{EDC}u'_{DI} + u_{DI}$ . Произведя замену

$\dot{x}_1 = \frac{1}{T'_{EFU}}(-y_{DI} + u_{DI})$ , и выполнив преобразования, получаем модель

имитатора динамики в пространстве состояний (5):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{T'_{EDC}}(-y_{DI} + u_{DI}); \\ y_{DI} = x_1 + \frac{T_{EDC}}{T'_{EDC}} u_{DI}. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_1 = -\frac{1}{T'_{EDC}} x_1 + \frac{T'_{EDC} - T_{EDC}}{(T'_{EDC})^2} u_{DI}; \\ y_{DI} = x_1 + \frac{T_{EDC}}{T'_{EDC}} u_{DI}. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}_{DI} = A_{DI} x_{DI} + B_{DI} u_{DI}; \\ y_{DI} = C_{DI} x_{DI} + D_{DI} u_{DI}. \end{cases}$$

$$x_{DI} = [x_1]^T; \quad u_{DI} = [U'_{EFU}]^T; \quad y_{DI} = [U_{Out}]^T; \quad (5)$$

$$A_{DI} = \left\{ -\frac{1}{T'_{EDC}} \right\}; \quad B_{DI} = \left\{ \frac{T'_{EDC} - T_{EDC}}{(T'_{EDC})^2} \right\}; \quad C_{DI} = [1]; \quad D_{DI} = \left\{ \frac{T_{EDC}}{T'_{EDC}} \right\}.$$

После получения дискретной модели статического и динамического имитаторов можно переходить к реализации имитатора в алгоритмическом плане.

## 2. Исследование программного имитатора исполнительного механизма систем ориентации и стабилизации КЛА

В разработанном исследовательском стенде системы стабилизации КЛА имитатор отказов БДМ реализован на ПЭВМ в виде отдельного, независимого модуля. Внешний вид стенда и экранная форма имитатора представлены на рис. 4.

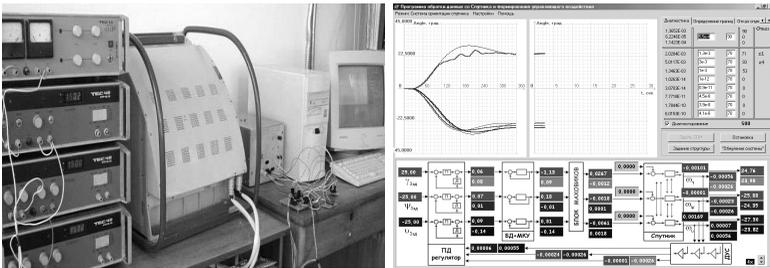


Рисунок 4 – Исследовательский стенд системы стабилизации КЛА

Проведенный цикл экспериментальных исследований показал целесообразность использования предложенной методики построения программных имитаторов отказов для экспериментальной отработки аварийных режимов работы систем управления КЛА.

## Заключение

С целью повышения качества экспериментальной отработки СУ КЛА в работе решена актуальная задача построения программных имитаторов отказов.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР “Разработка моделей, методов и средств проектирования интеллектуальных отказоустойчивых систем управления аэрокосмическими объектами” (номер гос. регистрации 0106U001033).

**Рецензент** – д.т.н., проф. Харченко В.С. (Харьков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ").

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой систем управления летательными аппаратами Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ" (Протокол № 7 от 12.01.2007 г.).

*Поступила* 02.02.2007 г.

***Luchenko O.A., Gavrilenko O.I. Development of fault program simulators for improvement of emergency operation of spacecraft control systems activity***

The actual problem of parametrical faults program simulators synthesis for improvement spacecraft control systems is solved. For the first time the simulators construction technique for systems such as «a grey box» that allows to increase experimental improvement quality is offered. Results of experimental researches on the developed research stand have proved expediency of the offered program simulators construction technique use.

***Лученко О.А., Гавриленко О.И. Разработка программных имитаторов отказов для отработки аварийных режимов работы систем управления космических летательных аппаратов***

Решена актуальная задача синтеза программных имитаторов параметрических отказов для отработки систем управления КЛА. Впервые предложена методика построения имитаторов для систем типа «серый ящик», что позволяет повысить качество экспериментальной отработки. Результаты экспериментальных исследований на разработанном исследовательском стенде доказали целесообразность использования предложенной методики построения программных имитаторов.

***Лученко О.О., Гавриленко О.І. Розробка програмних імітаторів відмов для відпрацювання аварійних режимів роботи систем управління космічних літальних апаратів***

Вирішено актуальне завдання синтезу програмних імітаторів параметричних відмов для відпрацювання систем управління КЛА. Вперше запропоновано методику побудови імітаторів для систем типу «сірий ящик», що дозволяє підвищити якість експериментального відпрацювання. Результати експериментальних досліджень на розробленому дослідницькому стенді доказали доцільність використання запропонованої методики побудови програмних імітаторів.

УДК 621.365.2:517.1(075.8)

## **СИНТЕЗ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНОГО УРОВНЯ СИСТЕМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

*Труфанов И.Д.<sup>1</sup>, Лютый А.П.<sup>2</sup>, Чумаков К.И.<sup>1</sup>, Андрияс И.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Запорожский национальный технический университет

<sup>2</sup>ОАО электрометаллургический завод

“Днепрспецсталь” им. А.Н. Кузьмина

### **Введение**

Для построения систем автоматизации технологическими процессами в электросталеплавлении на современном этапе развития науки и техники в области силовой и управляющей электроники на микрокомпьютерах в целях идентификации качественных и количественных характеристик регулирования координат электротехнологических комплексов широко применяются математические модели как модели-наблюдатели параметров контуров различных уровней иерархии [1–5].

*Целью* настоящей работы являлось теоретическое обоснование и аналитическое конструирование параметров системы регулирования координат электротехнического комплекса компенсации реактивной энергии мощной дуговой сталеплавильной печи.

### **1. Методы построения микрокомпьютерной системы идентификации и регулирования координат электротехнологического комплекса дуговой печи**

В работах авторов [1–5] предложены методология и пути практической реализации современных систем автоматизации основных и вспомогательных технологических процессов электросталеплавления в мощных (50–200 т) дуговых печах с альтернативными источниками технологической теплоты. Важнейшей компонентой таких систем является компьютерно-управляемый комплекс компенсации реактивной энергии (см. рисунок). На рис. обозначено: QS, QF – сетевой разъединитель и выключатель мощности цехового трансформатора (ЦТ) с РПН; QS1 – то же печного трансформатора (ПТ) с РПН; 1 – ТА – измерительный трансформатор тока регулятора мощности; 2 – TV – измерительный трансформатор напряжения регулятора мощности; РПН – система регулирования под напряжением трансформатора; ГЭ – гра-

фитированный электрод; 3 – привод выключателя мощности 2 (QF1); 4 – формирователи – предварительные усилители регулятора мощности; 5 – силовой блок усилителя мощности регулятора мощности; 6 – блок датчика импульсов; 7 – счётчик-интегратор импульсов; 8 – блок сигнализации; 9 – генератор импульсов; 10 – блок задания программы плавки и подготовительных технологических процессов; 11 – управляющий вычислительный комплекс; 12 – “короткая” сеть печного трансформатора (коммутирующий “башмак”, гибкий кабель, “паук”, трубошины, электрододержатель); 13 – система управления РПН; 14 – регулятор мощности; система регулирования реактивной мощности и БСК на стороне “короткой” сети ПТ; 16 – то же на стороне 6кВ ЦТ.

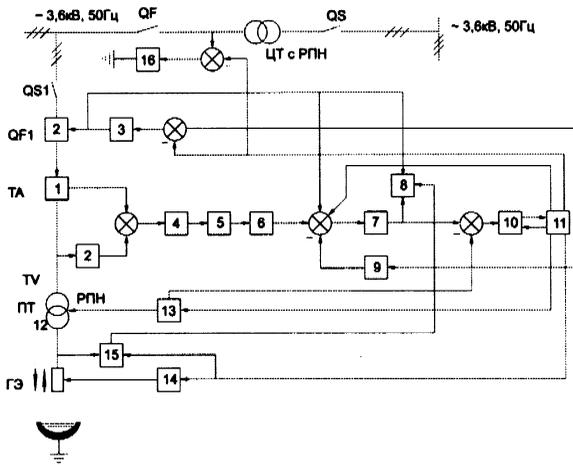


Рисунок – Функциональная схема системы компенсации реактивной энергии. Система автоматического регулирования режима ДСП. Схема электрическая функциональная

Математическое моделирование и опытно-экспериментальные исследования в лабораторных условиях научно-исследовательской организации и действующего электрометаллургического производства проводились применительно к следующим типам статических компенсаторов (блоки 15 и 16 на рис.): ППНР – параметрически плавнорегулируемый насыщающийся реактор; НБК – нерегулируемая батарея статических конденсаторов; ПРТР – плавнорегулируемые тиристорами реакторы; ПРБК – плавнорегулируемые тиристорами батареи статиче-

ских конденсаторов; ДРБК – дискретнорегулируемые тиристорами батареи статических конденсаторов; ДРТР – дискретнорегулируемые тиристорами реакторы; ПТПИ – плавнорегулируемые тиристорные преобразователи с искусственной коммутацией; ПТПЕ – то же с естественной коммутацией; ДРВК – дискретнорегулируемые батареи статических конденсаторов с помощью выключателей; ДРВР – дискретнорегулируемые реакторы с помощью выключателей.

## 2. Математическая модель исполнительного блока системы компенсации реактивной мощности

Авторами на основе [1,3–5] разработана математическая модель исполнительного блока системы компенсации реактивной мощности, на базе которой микрокомпьютерное устройство производит экспертную оценку и формирует алгоритм регулирования координат блоков 15, 16 (см. рис.).

Модель разработана для случая конструктивного исполнения системы компенсации реактивной энергии в виде ДРВК, где конденсаторные блоки соединены в “треугольник” и имеет вид:

$$\begin{aligned} X_A &= j\omega(M_{16} - M_{15} - M_{26}); X_B = j\omega(M_{23} - M_{13} + M_{14} - M_{24}); \\ X_C &= j\omega(M_{36} - M_{35} + M_{45} - M_{46}); Z_{AB} = Z_1 + Z_2 + j\omega(M_{15} - M_{16} - \\ &- M_{25} + M_{26} + M_{13} - M_{14} - M_{23} + M_{13} - M_{14} - M_{23} + M_{24} - 2M_{12}); \\ Z_{BC} &= Z_3 + Z_4 + j\omega(M_{13} - M_{14} - M_{23} + M_{24} + M_{35} - M_{36} - M_{45} + \\ &+ M_{46} - 2M_{34}); Z_{CA} = Z_5 + Z_6 + j\omega(M_{35} - M_{36} - M_{45} + M_{46} + M_{15} + \\ &+ M_{26} - M_{16} - M_{25} - 2M_{56}); Z'_{\text{Э1}} = Z_{\text{Э1}} - j\omega(M_{\text{Э12}} + M_{\text{Э13}} - M_{\text{Э23}}); \\ Z'_{\text{Э2}} &= Z_{\text{Э2}} - j\omega(M_{\text{Э23}} + M_{\text{Э12}} - M_{\text{Э13}}); \\ Z'_{\text{Э3}} &= Z_{\text{Э3}} - j\omega(M_{\text{Э13}} + M_{\text{Э23}} - M_{\text{Э12}}); \end{aligned}$$

где  $Z_1 - Z_6$  – импедансы каждой ветви “короткой сети” до точки соединения в “треугольнике”;  $M_{12} - M_{16}$  – взаимоиנדуктивности между первой ветвью  $Z_1$  “короткой сети” и соответственно всеми другими ветвями;  $Z_{\text{Э1}}, Z_{\text{Э2}}, Z_{\text{Э3}}$  – эквивалентные сопротивления участков электродержатель – ванна расплава металла;  $M_{\text{Э12}}, M_{\text{Э13}}, M_{\text{Э23}}$  – взаимоиנדуктивности между графитированными электродами;  $Z_A, Z_B, Z_C$  – сопротивления фазных обмоток НН трансформатора.

## 3. Эксперименты и результаты

Результаты экспериментальных исследований в условиях действующего производства системы компенсации реактивной энергии типа ДРВК, управляемой промышленным микрокомпьютером Т-300 (фирмы Advantage Computer), и математических исследований процессов

динамического функционирования на ПЭВМ систем других типов (см. рис.) приведены в таблице.

Таблица – Результаты экспериментальных исследований

Характеристики компенсаторов	Способы и средства регулирования реактивной мощности				
	ППНР+НБК	ПРНР+НБК ПРБК+НБК	ДРБК	ПРТР+ДРБК+ +НБК	ПТПИ или ПТПЕ
Характер регулирования	Индуктивный, ёмкостный	Индуктивный, ёмкостный	Только ёмкостный	Индуктивный, ёмкостный	Индуктивный, ёмкостный
Способ регулирования	Плавный параметрический	Плавный активный	Ступенчатый активный	Плавный активный	Плавный активный
Настройка регулятора	Плохая	Хорошая	Ограничена	Хорошая	Хорошая
По напряжению	Ограничена	Да	Ограничена	Да	Да
Стабилизация	Нет	Да	Нет	Да	Да
Пофазная	Нет	Да	Ограничена	Да	Да
Быстродействие	Высокое зависит от параметров фильтров и системы	Высокое, зависит от параметров системы управления	Высокое, зависит от параметров системы управления	Высокое, зависит от параметров системы управления	Высокое, зависит от параметров системы управления
Уровень генерируемых гармоник	Очень низкий	Низкий, требует фильтры, согласованные с системой	Нет	Очень низкий, требует фильтры, согласованные с системой	Низкий
Пределы по перенапряжению и перегрузочная способность	Очень хорошие	Хорошие	Нет	Ограниченные	Плохие
Чувствительность к отклонению частоты и напряжения	Да	Нет	Нет	Нет	Нет
Потери	Умеренные	Средние, возрастают в режиме потребления реактивной мощности	Малые, возрастают с ростом реактивной мощности	Малые, в среднем зависят от состава оборудования	Умеренные
Возможность присоединения к системе ВН	Нет	Да (для системы ПРБК)	Нет	Нет	Нет
Условия пуска	Быстро, непосредственное включение	Быстро, через систему управления	Быстро, через систему управления	Быстро, через систему управления	Быстро, через систему управления

Анализ результатов исследований (см. табл.) системотехнических качественных характеристик статических компенсаторов показал, что наиболее существенными системными характеристиками статических компенсаторов являются: способность регулирования реактивной мощности (плавное или дискретное); напряжение уставки, статизм и пределы регулирования; воздействие на системные параметры (активное или параметрическое регулирование); пофазное регулирование, симметрирующая способность; быстродействие; чувствительность к изменению частоты и снижением напряжения и перенапряжениям; пределы по перегрузке и перенапряжениям; потери холостого хода в рабочем диапазоне регулирования; генерируемые гармоники; потребность в фильтрах; стоимость оборудования и требуемые площади; надежность.

### Заключение

С целью дальнейшего развития теории и практики разработки и динамического функционирования промышленных микрокомпьютерных систем автоматизации технологических процессов электросталеплавления в мощных дуговых печах (с печными трансформаторами мощностью 32 – 80 МВ·А в одном агрегате) в работе решена актуальная задача экономии электроэнергии не менее 35 тыс. кВт·ч на одну плавку в печах 50т в течение 2,3 – 2,5 часа работы печи под током.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые предложен метод регулирования координат системы компенсации реактивной энергии, который позволяет проводить регулирование параметров системы управления электросталеплавления на различных уровнях иерархии АСУТП с микро ЭВМ.

Работа выполнена в рамках госбюджетной НИР “Исследование и разработка электромеханических систем и средств автоматизации технологических процессов”(№ гос. регистрации 0105U005049).

### Перечень ссылок

1. Труфанов И.Д., Бондаренко А.А., Чумаков К.И., Арсеньева С.И. Теоретические аспекты разработки идентификационных моделей как законов регулирования координат электротехнического комплекса сталеплавления // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006. – Вип. 3. – Ч. 2. – С. 122–125.
2. Труфанов И.Д., Андрияс И.А., Чумаков К.И., Бондаренко А.А. Системотехнические факторы аналитического конструирования параметров динамического функционирования энергосберегающей системы автоматизации в электрометаллургии // Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції „Сучасні наукові дослідження”. – 2006. – Т. 16 „Технічні науки”. – С. 27–35.
3. Труфанов И.Д., Метельский В.П., Лютый А.П. Теоретические аспекты структурно-алгоритмического синтеза параметров экспертных систем регулирования координат электросталеплавления // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2006. – С. 120–124.
4. Труфанов И.Д. Чумаков К.И., Бондаренко А.А. Общетеоретические аспекты разработки стохастической системы автоматизированной экспертной оценки динамического качества производственных ситуаций электросталеплавления // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2005. – № 6/2(18). – С. 52–58.
5. Труфанов И.Д., Андрияс И.А., Бондаренко О.О., Чумаков К.И. Научно-системные факторы математического моделирования магнитогидродинамических процессов как объекта управления электросталеплавильной пичью с комбинированным способом перетворения электроэнергии в тепловую // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 2/3(20). – С. 45–52.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Пазюк М.Ю. (Запорожье, Запорожская государственная инженерная академия).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой Электропривода и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета (Протокол №9 от 10.01.2007 г.).

Поступила 07.02.2007 г.

*Trufanov I.D., Lytij A.P., Chumakov K.I., Andrijas I.A.* **Synthesis of models of control of local level of systems of indemnification jet energy powerful electrotechnological installations of arc steel-smelting furnaces**

The aim of the work is synthesis of models of identification and laws of coordinate regulation of systems of indemnification of jet energy on the side of a low voltage in electrotechnical complexes of powerful arc steel-smelting furnaces. Scientific novelty consists in a mathematical substantiation and modeling of structure of systems of cross-section indemnification of jet capacity. Practical significance consists in the economy of the electric power within 10–12 %.

*Труфанов И.Д., Лютый А.П., Чумаков К.И., Андрияс И.А.* **Синтез моделей управления локального уровня систем компенсации реактивной энергии мощных электротехнологических установок дуговых сталеплавильных печей**

Целью работы является синтез моделей идентификации и законов регулирования координат систем компенсации реактивной энергии на стороне низкого напряжения электротехнических комплексов мощных дуговых сталеплавильных печей. Научная ценность состоит в математическом обосновании и моделировании структуры систем поперечной компенсации реактивной мощности. Практической ценностью является экономия электроэнергии в пределах 10–12 %.

*Труфанов І.Д., Лютий А.П., Чумаков К.І., Андріяс І.А.* **Синтез моделей керування локального рівня систем компенсації реактивної енергії потужних електротехнологічних установок дугових сталеплавильних печей**

Метою роботи є синтез моделей ідентифікації і законів регулювання координат систем компенсації реактивної енергії на стороні низької напруги електротехнічних комплексів потужних дугових сталеплавильних печей. Наукова цінність полягає у математичному обґрунтуванні та моделюванні структури систем поперечної компенсації реактивної потужності. Практична цінність полягає в економії електроенергії в межах 10–12%.

УДК 681.51

## ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

*Нелетин Р.А., Соловьёв А.А.*

Санкт-Петербургский государственный университет

### **Введение**

В наше время автоматизация технологических процессов и производств является одним из основных способов повышения производительности труда, эффективности работы автотранспортных предприятий. В основном это обусловлено стремительным развитием компьютерной техники, заметным снижением ее стоимости, увеличением возможностей ЭВМ. За последнее десятилетие быстродействие персональных компьютеров (ПК) выросло в десятки раз; объем внутренней памяти уже измеряется не Мегабайтами, а Гигабайтами; создаются гигантские информационные сети, объединяющие производителей, потребителей, банки, государственные учреждения.

Все это позволяет решать сложнейшие задачи управления производством оперативно и оптимально, используя огромные возможности ПК.

Более того, известно, что управление предприятием имеет две составляющие: собственно управление и его информационное обеспечение. К первому виду относят все те действия, которые входят в "систему принятия решений"[3], а ко второму – те процессы, которые обеспечивают накопление, обработку, анализ информации, необходимой для руководства предприятием. В 80-е годы XX в. автоматизация производства в основном подразумевала компьютеризацию именно второй части управления. Создавались базы данных (БД), интенсивно развивались различные системы управления базами данных (СУБД), на основе которых значительно повышалась скорость, возрастало качество обработки массивов информации.

Однако в последнее время акценты сместились на автоматизацию самой "системы принятия решений". Успешно решаются задачи создания искусственного интеллекта (ИИ), экспертных систем (ЭС).

*Постановка задачи.* В данной работе рассматривается проблема автоматизации и компьютеризации автотранспортного предприятия (АТП) [1–3], учитывая существующие в настоящий момент тенденции развития как самих АТП, так и средств вычислительной техники (СВТ).

Если раньше схема документооборота первичных перевозочных документов (ППД) АТП могла быть представлена в виде рис. 1 (здесь: I – подготовительный этап; II – рабочий этап; III – контрольно-вычислительный этап, ВЦ – вычислительный центр, обслуживающий одновременно несколько АТП., который в зависимости от принятой схемы работы производил большую часть контрольно-вычислительных работ, ПЛ – путевой лист, ТТН – товарно-транспортная накладная, ПЛ и ТТН являются основными первичными перевозочными документами (ППД), поскольку в них фиксируются практически все операции, выполняемые водителем, АТП, клиентурой) [1,2], то теперь процесс децентрализации промышленности привел к тому, что каждое предприятие стремится иметь замкнутую внутри самого себя систему обработки информации, которая является коммерческой тайной.



Рисунок 1 – Схема документооборота первичных перевозочных документов АТП

### 1. Концепции решения задачи

Проблема компьютеризации может быть решена различными способами, как то:

- заключение комплексного договора со сторонней организацией, специализирующейся на автоматизации предприятий,
- решение проблемы силами собственного ВЦ,
- сочетание первого и второго варианта.

В первом случае изначально предполагается написание всеобъемлющего технического задания, в котором определяются задачи и структуры предприятия, планируемое программное обеспечение. Здесь необходимо заранее предусмотреть все частности и тонкости создаваемой системы. Затем происходит выбор и закупка программной и аппаратной платформы, на которой она будет реализована; создание демонстрационной версии, представляющей собой оболочку будущей системы; сдача готового программного продукта; обучение обслуживающего персонала.

У этого варианта есть одна очень сильная сторона – каждый занимается своим делом. Однако здесь имеются не менее весомые негативные моменты:

- высокая стоимость создания таких систем;
- невозможность оперативного изменения, ремонта системы в нештатных ситуациях, вследствие жесткой зависимости от присутствия специалистов подрядчика;
- в случае разрыва связей с подрядчиком (разорение, прекращение им деятельности в этой области и др.) система становится мертвой, не имеющей своего дальнейшего развития, что неизбежно приведет к новым затратам на модернизацию или даже создание нового программного продукта;
- сложность внесения изменений в систему;
- невозможность предусмотрения всех деталей на первоначальном этапе.

Второй вариант характеризуется гораздо меньшим количеством затрат и разнесенностью их по времени; поступательным решением задач; возможностью оперативного изменения системы; фактической независимостью от разработчиков, поскольку исходные тексты программ являются собственностью предприятия. Однако здесь есть свои негативные стороны: длительность создания системы, определенные неизбежные шероховатости, необходимость самостоятельно отслеживать изменения в законодательстве и вносить их в программы.

Третий вариант заключается в умелом сочетании первого и второго способов автоматизации, использовании их лучших сторон. Например, программу юридического справочника лучше приобрести, а систему обработки путевых листов (ПЛ) и товаро-транспортных накладных (ТТН) создать силами специалистов ВЦ.

Поскольку в самой постановке задачи присутствует необходимость интенсивного совместного использования баз данных (БД), то предполагаем установку локальной сети с архитектурой "клиент – сервер".

Сервер – мощный производительный компьютер, который служит для хранения общих для различных пользователей БД (сервер БД), программ, организации и управления общим печатающим устройством (сервер принтера), связи (сервер факс-модема) и др. Сервер обрабатывает запросы пользователей, оставаясь невидимым, поскольку сам не может обращаться к ним.

Клиент – это "рабочее место пользователя". Соответственно он служит для: предоставления пользовательского интерфейса, создания запросов и отправления их на сервер, обработки результатов запросов, полученных от сервера и представления их пользователю.

## 2. Основные принципы построения автоматизированной системы управления АТП

Создание систем управления автотранспортным предприятием должно выполняться на основе следующих основных принципов:

1. Система должна удовлетворять одновременно нескольким критериям качества, среди которых важнейшими являются: максимальная надёжность системы управления; минимальная стоимость этой системы; достижение в результате внедрения системы максимальной прибыли АТП; удобство эксплуатации системы; возможность развития системы; ремонтпригодность системы и ряд других. Для учета всех требований к системе составляется граф целей и векторный критерий оптимизации. Для оптимизации системы по векторному критерию качества используется теория Парето-оптимальных систем, применяются элементы искусственного интеллекта.

2. Основными подсистемами системы управления АТП должны быть, по нашему мнению, следующие: АРМ (автоматизированное рабочее место) КРГ (контрольно-расчетной группы); АРМ “Бухгалтерия”; АРМ “Диспетчерская” и АРМ “Директор”, смысл которых раскрывается ниже.

## 3. Элементы внедрения

На одном из АТП было решено проводить автоматизацию по третьему названному выше варианту, т.е. часть программного обеспечения была закуплена, часть создана ВЦ. В качестве программной платформы взят язык FoxPro.

На рис. 2. изображена примерная структурная схема автотранспортного предприятия. В том числе там имеется контрольно-расчетная группа (КРГ).



Рисунок 2 – Схема структуры АТП

На рис. 2 использованы обозначения: ОТДЕЛ МТС – отдел материально-технического снабжения, ТЕХ. ОТД. – технический отдел, ГЛАВ. ЭНЕР. – главный энергетик, ДИСП. – диспетчерская, БУХГАЛ. – бухгалтерия, ПЛАН. ОТД. – плановый отдел, ГСМ – горюче-смазочные материалы, Отдел БД и ТБ – отдел техники безопасности и безопасности движения, НАЧ-К ПРОИЗ. – начальник производства, ГЛАВ. МЕХ. – главный механик, СЛУЖБА ЭКСП-ЦИИ – служба эксплуатации, КРГ – контрольно-расчетная группа, ВНЕШ. ОТД. – внешнеэкономический отдел, РЕМОН-Я ЗОНА – ремонтная зона, АТС – автоматизированная телефонная станция.

До автоматизации автотранспортных предприятий этот отдел отвечал за формирование данных той части зарплаты водителей, которая начисляется непосредственно по информации, содержащейся в товаро-транспортных накладных (ТТН) и путевых листах водителей (ПЛ).

На этом автотранспортном предприятии была поставлена задача: создать автоматизированное рабочее место (АРМ) "КРГ"; расширить круг решаемых программным путем задач на базе АРМа "КРГ" для исключения параллельной обработки одних и тех же источников информации разными отделами, входящими в состав АТП.

В итоге требовалось показать влияние, оказанное результатами внедрения АРМа "КРГ", на функционирование всей системы управления АТП; обозначить дальнейшие возможности расширения этого программного пакета.

#### **4. Методика решения**

Решение этой задачи носит чисто программный характер. Исходя из этого, главная проблема заключается в правильном и четком структурировании данных. Программу было решено написать на языке FoxPro [5,7].

Первоначальная задача в процессе создания АРМа "КРГ" в конечном итоге стала лишь одним из пунктов программного подменю. Это было обусловлено тем, что во многих подразделениях АТП параллельно брались данные ПЛ и ТТН. Было логично обрабатывать эти источники информации машинным способом, а поскольку автоматизировался изначально один отдел, то и в одном подразделении.

Данные были структурированы следующим образом: ПЛ, ТТН, КАДРЫ, ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ, ТОПЛИВО, КЛИЕНТЫ, БАНКИ, ТАБЕЛЬ, другие вспомогательные БД.

АРМ "КРГ" было решено формировать из трех программных блоков: АДМИНИСТРАТОР, ВВОД ДАННЫХ, РАБОТА СО СПРАВОЧНИКАМИ.

ВВОД ДАННЫХ – отвечает за ввод данных в буферную БД, предварительную проверку операторских ошибок.

**АДМИНИСТРАТОР** – отвечает за перенос данных в накопление из буферной БД и ограничение доступа посторонних лиц к данным (проверка паролей).

**РАБОТА СО СПРАВОЧНИКАМИ** – отвечает за обработку, анализ информации и выдачу отчетов, другой документации.

Рис.3 показывает структуру выходных данных АРМа "КРГ".

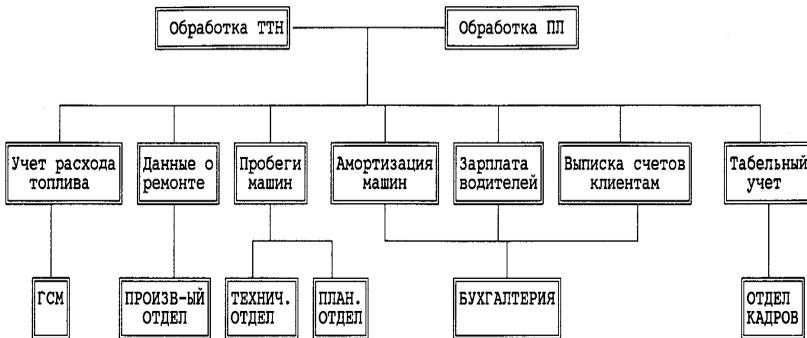


Рисунок 3 – Структура выходных данных АРМ "КРГ"

## 5. Результаты работы

В результате создания АРМа "КРГ" значительно сократилось время обработки ПЛ и ТТН не только в самом отделе КРГ, но и во всех подразделениях АТП, использующих данные этих документов; повысилась точность расчетов; исключена параллельная обработка одной и той же информации; существенно снижена доля рутинной бумажной работы; повысилась оперативность принятия решений.

Перспективы дальнейшей автоматизации управления АТП связаны с решением следующих задач:

Разработка АРМа "БУХГАЛТЕРИЯ" [4,6], который будет решать большую часть финансовых задач. В его рамках, в частности, предусматривается наличие модемной связи с банком, клиентом которого является АТП, что позволит отправлять, получать платежные документы, сводки по счетам, информацию с валютного рынка, не выходя из стен автопарка. Таким образом, мы вплотную подошли к проблеме совместного использования баз данных.

Но если здесь еще существует возможность уйти от этого путем создания буферной БД, то уже при создании АРМа "ДИСПЕТЧЕРСКАЯ", который будет отвечать за формирование и распечатку ПЛ и ТТН на ста-

дии их заполнения начальными данными, задача одновременного доступа к БД безальтернативно потребует своего решения.

Необходимо определение оптимального пути движения автомобиля, используя данные о трассе, стоянках, станциях тех. обслуживания и заправки топливом; времени года; срочности доставки; других факторов. Решение этой задачи требует построения строгой математической модели, использования теории графов, метода сечения пространства параметров, теории оптимального управления.

Работа заканчивается созданием АРМа "ДИРЕКТОР", что предполагает написание на одном из языков объектно-ориентированного программирования (например, на С++ или SMALLTALK) экспертной системы, использующей данные всех подразделений АТП. Эта программа позволит руководителю быть в курсе всех текущих дел любого отдела; обеспечит нахождение оптимальных решений производственных задач; повысит оперативность управления предприятием. Здесь, в частности, необходимо будет решить проблему взаимодействия СУБД FOXPRO, с одной стороны, и выбранного языка ООП – с другой.

Результаты выполненной работы могут быть распространены на автотранспортные предприятия России городского и сельского типа, насчитывающие до пятисот единиц автотранспорта.

### Перечень ссылок

1. *Брунштейн Д.П., Подольский В.И., Савицкий Б.П.* Автоматизация учетно-вычислительных работ на автомобильном транспорте. – М.: Транспорт, 1986. – 247 с.
2. *Брунштейн Д.П.* Вычислительные центры в системе контроля автотранспортной информации. – М.: Транспорт, 1988. – 175 с.
3. *Кафтаник Ю.А.* Вычислительная техника на автомобильном транспорте. – М.: Транспорт, 1985. – 183 с.
4. *Краева Т.А.* Методология и организация учета в условиях автоматизации. – М.: Финансы и статистика, 1992. – 160 с.
5. *Pinter L.* FoxPro 2.0 Applications programming / Пер. с англ. – М.: Эдэль, 1994. – 384 с.
6. *Полковский Л.М., Зайдман С.А., Беркович М.Е.* Автоматизация учета на базе персональных ЭВМ. – М.: Финансы и статистика, 1991. – 192 с.
7. *Рогачев И.Б.* Программирование в СУБД FoxPro. Руководство пользователя. Нижний Новгород, 1992. – 116 с.

**Рецензент** – д.ф.-м.н. Смирнов Б.И. (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН).

**Статья рекомендована к публикации** кафедрой теории систем управления электрофизической аппаратурой Санкт-Петербургского государственного университета (Протокол № 3 от 21.10.2006 г.).

*Поступила 09.01.2007 г. После доработки 26.01.2007 г.*

*Nelepin R.A., Solov'ev A.A.* **An experience of creation and use of computer control system for autocar business**

The paper is devoted to the problems of computer control of autocar business. Changes in computer technique and economical situation are taken into consideration. Main principles of the software development are presented. An example of successful employment such a software in autocar business is described.

*Нелепин Р.А., Соловьёв А.А.* **Опыт создания и внедрения автоматизированной компьютерной системы управления автотранспортным предприятием**

Статья посвящена проблемам автоматизации технологических процессов и производств на автотранспортных предприятиях (АТП). Проблема рассмотрена во взаимосвязи с развитием компьютерной техники и изменением экономических условий функционирования АТП. Раскрыты основные принципы построения автоматизированной системы управления АТП, предложена концепция решения задачи, приведён пример внедрения.

*Нелепин Р.А., Соловійов О.О.* **Досвід створення та впровадження автоматизованої комп'ютерної системи керування автотранспортним підприємством**

Статтю присвячено проблемам автоматизації технологічних процесів і виробництв на автотранспортних підприємствах (АТП). Проблему розглянуто у взаємозв'язку з розвитком комп'ютерної техніки і зміною економічних умов функціонування АТП. Розкрито основні принципи побудови автоматизованої системи керування АТП, запропоновано концепцію вирішення задачі, наведено приклад упровадження.

УДК 658.5.012.011.56

**ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ПРЕДПРИЯТИЕМ НА ОСНОВЕ MYSAР ERP**

*Поздняков О.А.<sup>1</sup>, Пархоменко А.В.<sup>2</sup>, Цокуренко И.И.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Консалтинговая компания ООО «БРИГ-РИТЕЙЛ»

<sup>2</sup> Запорожский национальный технический университет

**Введение**

Увеличение территориальной распределенности административных, производственных, торговых и складских подразделений, рост материальных, финансовых и информационных потоков значительно усложняют управление современным предприятием.

Компании растут, вместе с ними наращивается информационно-техническая (ИТ) архитектура компании. Но рост не всегда означает развитие. Разнородная и устаревшая ИТ-среда снижает гибкость компаний и не позволяет своевременно внедрять новые прогрессивные технологии.

Актуальной на данный момент является проблема обеспечения прозрачности бизнеса. Под прозрачностью понимается то, насколько эффективно можно проследить движение финансовых потоков, а также перемещение любой материальной единицы в цикле производства. Без единой информационной системы предприятия, без гибкого инструментария контроллинга и отчетности, определить, на что конкретно были израсходованы инвестиции, а также определить и устранить возможные утечки капитала зачастую довольно затруднительно. На современном предприятии прозрачность просто необходима. Она обеспечивает возможность полного контроля над функционированием предприятия, повышает стоимость бизнеса на мировом рынке и позволяет привлекать больше инвесторов.

Отсутствие оперативной и достоверной информации о функционировании организации также является наболевшей проблемой, требующей решения. Руководство не имеет информации, а без информации нельзя принять важное управленческое решение, и это подводит компанию к необходимости построения новой интегрированной системы управления.

В мировой практике известен ряд концепций и стандартов построения систем управления предприятием. К наиболее распространенным относятся: MRP (Material Requirements Planning – планирование потребности в материалах), CRP (Capacity Requirements Planning – планирование потребности в мощностях), MRPII (Manufactory Resource Planning – планирование производственных ресурсов), ERP (Enterprise Resource Planning – планирование корпоративных ресурсов), CRM (Customer Relationship Management – управление взаимоотношениями с клиентом), SCM (Supply Chain Management – управление цепочками снабжения), APS (Advanced Planning and Scheduling – расширенное управление производственными графиками), CSRП (Customer Synchronized Resource Planning – планирование ресурсов, синхронизированное с потребителем) [1].

Наиболее развитые концепции предполагают создание системы, позволяющей организовать эффективное управление всеми производственными и финансовыми ресурсами предприятия, а также осуществлять бизнес-планирование, планирование производства, продаж, потребности в материальных ресурсах, производственных мощностях и т. д.

Концепция ERP-систем, предусматривает развитие средств для финансового анализа, прогнозирования состояния рынка, управления спросом, глубокую интеграцию с системами технологической подготовки производства, системами автоматизированного проектирования и т.д. [2].

Интегрированная информационная система, построенная на предприятии, создает единое информационное пространство для принятия оперативных и стратегических решений руководством предприятия. Управление эффективностью деятельности – одна из главных функций предприятия, реализованная в ERP-системах.

### **1. Современный рынок ERP-систем**

Выбор ERP-решения – крайне сложная и комплексная задача, требующая серьезного обследования организации и четкого формулирования требований к информационной системе.

Наиболее эффективно и полно проблемы предприятий решают системы компаний SAP AG, Microsoft и Oracle. Они с успехом внедрены и эксплуатируются как за рубежом, так и в Украине. ERP-система компании SAP AG под названием mySAP ERP, в недалеком прошлом хорошо известная как SAP R/3, занимает лидирующее место на современном рынке ERP-систем. На данный момент количество инсталляций более 33 000, а число пользователей превысило млрд. по всему миру. Данная система успешно внедрена в таких организациях как: NASA, Pentagon, Microsoft, Fiat, Philips, Sony, Volkswagen AG, Lufthansa, Аэрофлот (Россия), SwissAirlines, American Airlines, Bosch, Air France, Alitalia, Finnair, Japan Airlines и многих других [3].

По оценкам экспертов mySAP ERP занимает также львиную долю отечественного рынка (свыше 50%). Данная система внедрена на таких отечественных предприятиях как: Азовсталь, Reemtsma, гипермаркет Метро, Полтаваоблэнерго, UMC, Донецкий металлургический завод, Национальный банк Украины и др. В Запорожье система mySAP ERP внедрена на Мотор Сич (1998), Днепроспецсталь (2000), Запорожьеоблэнерго (2001), Днепроэнерго (2004), АБВтехника (2005, с центральным офисом в г.Днепропетровск). Готовится внедрение на ЗАЛК, АвтоЗАЗ. Следом за mySAP ERP идут продукты Microsoft Business Solution с долей около 13%, а замыкает тройку лидеров компания Oracle, занимающая чуть больше 11% украинского рынка ERP-систем.

### **2. ECC (ERP Central Components) и SAP NETWEAVER**

Последние, на данный момент, решения фирмы SAP AG под названием ECC (ERP Central Components) и SAP NetWeaver представляют собой интеграционную систему mySAP ERP, призванную помочь компаниям быстро и эффективно создать единую и целостную среду для интеграции всех ресурсов [4].

Возможность простой и легкой интеграции любых приложений на базе открытых, общедоступных стандартов и большого количества

специально разработанных адаптеров для интеграции тех приложений, которые не могут поддерживать открытые стандарты, делает mySAP ERP уникальным решением для эволюционного развития практически любых технологических ландшафтов.

Данная система охватывает все аспекты ведения хозяйственной и финансовой деятельности предприятия. Система имеет модульную структуру. Это обеспечивает масштабируемость системы и возможность последовательно наращивать ее функциональные возможности в соответствии с потребностями бизнеса.

Для обеспечения минимальной стоимости и максимальной эффективности, проект внедрения mySAP ERP разделяют на этапы. На каждом этапе происходит постепенное наращивание функциональности системы за счет внедрения модулей, которые гармонично интегрируются друг с другом. В результате внедрения системы, предприятие будет работать с индивидуальной версией, настроенной именно под его параметры. Показателем технического уровня системы может служить способ ее настройки. Чем шире возможности конфигурирования и настройки системы без необходимости ее переписывания, тем выше технический уровень данной системы. По этому параметру система также занимает лидирующее положение в мире.

В mySAP ERP все этапы бизнес-процессов контролируются таким образом, что система сама подсказывает человеку, что и в какие сроки тот должен сделать.

Система mySAP ERP функционирует на серверах UNIX, AS/400, Windows 2003 Server, Linux и с различными СУБД (Oracle, Microsoft SQL Server, MaxDB). Клиентские приложения могут работать в операционной системе Windows, Linux или Macintosh.

Важной особенностью системы является ориентация на Web-сервисы. Web-сервисы – это стандартный способ объединения приложений, работающих на базе Web-технологий, за счет использования открытых стандартов XML, SOAP, WSDL и UDDI. По сути, Web-сервисы представляют собой новый вид Web-приложений и служат для связи разнородных приложений на основе использования единых стандартов и протоколов. Используя Web-сервисы можно осуществлять бесшовную интеграцию практически с любым программным обеспечением, созданным на любой платформе.

Таким образом, архитектура сервисов предприятия, базирующаяся на использовании Web-сервисов, может функционировать практически в любой программно-аппаратной среде. Она свободна от ограничений, поскольку создается только на основе общепринятых протоколов и стандартов.

Если руководители организации заботятся о скорейшем повышении эффективности деятельности своего предприятия, они стараются

ся свести к минимуму сроки внедрения системы управления. С этой целью в SAP AG была разработана методология ускоренного внедрения SAP системы, получившая название AcceleratedSAP (ASAP).

### **3. Проблемы, возникающие в процессе внедрения системы mySAP ERP и их решения**

Поскольку mySAP ERP разрабатывалась немецкой компанией SAP AG для западной модели ведения бизнеса, то при внедрении данной системы на отечественных предприятиях возникают некоторые проблемы, связанные с определенными различиями между западной и отечественной моделями ведения бизнеса. Кроме того, хоть система и обладает эффективными средствами кастомизации (настройки), позволяющими сконфигурировать ее для выполнения большинства операций на предприятии, однако, все же, далеко не всегда удастся обойтись стандартными настройками системы для решения некоторых узкоспециализированных задач. В данном случае единственным выходом является разработка расширений системы на языке ABAP/4. Программы на данном языке, интегрированные в систему, наряду со стандартными модулями, позволяют существенно повысить функциональность системы и, тем самым, удовлетворить потребности заказчика. Разработка таких программ требует не только квалифицированных навыков программирования, но и глубокого понимания бизнес-процессов предприятия и роли каждого, отдельно взятого бизнес-процесса в функционировании компании [5].

Можно привести такой пример: на ряде предприятий существует потребность в предоставлении наглядной связи между поставкой и выставлением счетов. Возможна такая ситуация: клиентам отгружена 1001 поставка, а создали 1000 счетов (т.е. одна поставка оказалась без счета). Это значит, что какой-то клиент получил поставку, но не расплатился за нее. Вполне возможно, что этот клиент, в дальнейшем, и не очень то будет спешить с оплатой.

Найти ошибку – задача довольно трудоемкая и длительная, но этого недостаточно, т.к. возникает вопрос: как эту ошибку исправить, если поставка уже у клиента.

Сложно представить себе, как бы эта проблема решалась в других системах, но в mySAP ERP, за счет наличия мощного инструментария по наращиванию функциональности системы – ABAP/4, решение этой проблемы не представляет больших трудностей. Задача программиста заключается в решении данной проблемы средствами языка ABAP/4 на основе знания структуры и принципов функционирования системы.

Предлагаемый подход базируется на использовании имеющихся в системе потоков информации. Разрабатываемая программа может быть представлена в виде «Монитора отгрузки». На входе она получа-

ет имеющиеся в системе данные об отгрузках (поставках) и выставленных счетах из стандартных таблиц системы. На выходе программа обрабатывает и предоставляет пользователю данные в удобной для него форме, исключая возможность возникновения ошибки.

Пользователю на одном экране выводится информация о поставках и тут же соответствующие им счета. В случае отсутствия у какой-нибудь поставки своего счета, программа сигнализирует об этом пользователю. Программа также осуществляет всевозможные проверки. Например, на поставку существует счет, но сумма, указанная в нем составляет лишь половину требуемой. Предоставлена возможность создания недостающего счета непосредственно из данной программы, экономя время работника, которое он бы затратил на создание счета стандартными средствами mySAP ERP.

Таким образом, ошибка находится в режиме «реального времени» (а не в конце учетного периода, когда поставки уже отгружены) и, следовательно, легко исправима!

Помимо этого, отпадает необходимость трудоемкой проверки, а, следовательно, высвобождаются силы и время для творческой работы персонала (менеджеров), исключается возможность ошибки и связанные с ней экономические потери.

Данная функциональность может быть встроена в систему, не нарушая целостности (алгоритмов) стандартной системы. При обновлении системы фирмой-изготовителем (SAP AG), данный модуль не будет мешать этому процессу, а в случае кардинального изменения существующей системы, модуль может быть изменен соответствующим образом.

Есть проектные решения, которые подходят для всех украинских компаний. Классическим примером можно назвать собственную разработку компании ООО «Бриг-Ритейл» по преобразованию входящих и исходящих выписок банка в формат клиент-банка. Система SAP выгружает и может загружать банковские выписки в определенном формате. У каждого банка есть свой формат передачи выписок через программу клиент-банк. Разработанная программа «Мультибанк», после настройки под конкретный банк, выступает преобразователем формата SAP в клиент-банк и обратно.

Другой пример проектного решения показывает уникальность процессов в украинской сети розничной торговли: формирование оплаты поставщику за доставленный товар по факту реализации. Для решения этого вопроса было разработано проектное решение «Платежный Автомат», в котором по заложенной логике формируется платеж поставщику по факту реализации товара. Надо заметить, что этот процесс

является нетипичным для торговой отрасли во всем мире, поэтому стандартного решения в системе mySAP ERP по его реализации нет.

Подобных проблем, возникающих при внедрении системы на предприятиях, может возникать одновременно несколько. Возможно, также, что их решение потребует выполнения не по отдельности, а в комплексе, учитывая специфику предприятия.

### **Заключение**

Сегодня система немецкой фирмы SAP AG стала стандартом "де-факто", который позволяет внешним партнерам осуществлять объективную экспертизу деятельности предприятия, основываясь на используемых в системе показателях. Использование системы mySAP ERP компанией автоматически ставит ее на ступень выше в списках наиболее успешных и стабильных предприятий мира уже только потому, что это система mySAP ERP.

Одним из важных результатов внедрения системы mySAP ERP является налаживание учета. Прозрачность и доступность информации способствует оперативному получению отчетных данных с любой степенью детализации, отражению различных аспектов финансово-хозяйственной деятельности предприятия.

Связывание отдельных элементов бизнес процессов единой системой управления на основе технологической платформы SAP NetWeaver позволяет предприятиям значительно повысить производительность. Точная организация и последовательность связанных финансовых и бизнес процессов позволяет своевременно принимать необходимые инвестиционные решения, избегать убытков, быстро и эффективно реагировать на изменение ситуации на рынке и в самой компании. Технологическая платформа SAP NetWeaver обеспечивает широкую функциональность, масштабируемость и полную интеграцию систем, используемых в рамках инфраструктуры предприятия. Клиент может выбрать необходимые решения и адаптировать их функциональные возможности к потребностям предприятия. В дальнейшем, по мере необходимости, можно расширять функциональность системы путем добавления требуемых компонентов.

Внедрение mySAP ERP также подразумевает обеспечение полной прозрачности информации для владельцев предприятия, акционеров, а также повышение рейтинга и стоимости предприятия не только на внутреннем, но и на внешнем рынке.

Создание комплексных систем управления позволяет повысить устойчивость компании в условиях рынка и существенно сократить

потери из-за неэффективного использования средств или неадекватных управленческих решений.

### Перечень ссылок

1. *Петров Ю.А., Шлимович Е.Л., Ирюпин Ю.В.* Комплексная автоматизация управления предприятием. – М.: Финансы и статистика, 2001. – 356 с.
2. *Поздняков О.А., Пархоменко А.В.* Интеграция системы автоматизированного проектирования с системой управления предприятием // Радиозлектроника. Информатика. Управление. – 1999. – №2. – С. 84–87.
3. <http://www.interface.ru/fset.asp?Url=/erp/news/m021004673.htm>
4. <http://help.sap.com>
5. *Кречмер Р., Вейс В.* Разработка приложений SAP R/3 на языке АВАР/4. – М.: Лори, 1998. – 348 с.

**Рецензент** – д.т.н., проф. Таланин И.Е. (Гуманитарный университет "ЗИГМУ")  
**Статья рекомендована к публикации** кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета (Протокол № 5 от 10.01.2007 г.).

*Поступила 31.01.2007 г.*

### *Pozdnyakov O.A., Parhomenko A.V., Tsokurenko I.I. Features of creation an enterprise management system based on mySAP ERP*

The article contains an overview of contemporary conceptions of creating enterprise management systems, also there is an analysis of ERP-systems market. There were investigated problems, that occurred during the instill of mySAP ERP system into domestic enterprises. There were also offered solutions of some problems with help of АВАР/4 language.

### *Поздняков О.А., Пархоменко А.В., Цокуренко И.И. Особенности создания системы управления предприятием на основе mySAP ERP*

В статье выполнен обзор современных концепций построения систем управления предприятием, а также анализ рынка ERP-систем. Исследованы задачи, возникающие при внедрении системы mySAP ERP на отечественных предприятиях. Предложены решения некоторых проблем средствами языка АВАР/4.

### *Поздняков О.А., Пархоменко А.В., Цокуренко И.И. Особливості створення системи керування підприємством на основі mySAP ERP*

В статті виконано огляд сучасних концепцій побудови систем керування підприємством, а також аналіз ринку ERP-систем. Досліджено задачі, що виникають під час впровадження системи mySAP ERP на вітчизняних підприємствах. Запропоновано рішення деяких проблем засобами мови АВАР/4.

---

---

## Авторы / Authors / Авторы

---

---

*Serdyuk Sergey Nikitovich* – Cand. Tech. Sc., Assoc. professor of software department of Zaporozhye National Technical University.

*Андріяс Ірина Аркадьєвна* – к.т.н., доцент кафедри ЕПА Запорозького національного технічного університету.

*Антошук Светлана Григорьевна* – д.т.н., профессор, заведующая кафедрой информационных систем Одесского национального политехнического университета.

*Астионенко Игорь Александрович* – старший преподаватель кафедры высшей математики Херсонского национального технического университета.

*Бабидунга Оксана Юрьевна* – старший преподаватель Одесского национального политехнического университета.

*Баранов Алексей Васильевич* – студент Харьковского национального университета радиоэлектроники.

*Белоус Наталья Валентиновна* – к.т.н., доцент, профессор кафедры ПОЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники.

*Бойченко Кирилл Юрьевич* – бакалавр компьютерных наук, студент магистратуры Запорозького національного технічного університету, програміст ООО "МПА Групп".

*Васильева Евгения Владимировна* – старший преподаватель кафедры ЕПА Запорозького національного технічного університету.

*Гавриленко Олег Иванович* – к.т.н., доцент Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

*Гребенник Игорь Валериевич* – к.ф.-м.н., доцент кафедры системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

*Долгов Виктор Иванович* – д.т.н., профессор кафедры БИТ Харьковского национального университета радиоэлектроники.

*Жарикова Марина Витальевна* – к.т.н., доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета.

*Зайцев Сергей Алексеевич* – студент Запорозького національного технічного університету.

*Иванов Геннадий Александрович* – студент Запорозького національного технічного університету, програміст ООО "МПА Групп".

*Казурова Алина Евгеньевна* – аспирант кафедры ЕПА Запорозького національного технічного університету.

*Клих Юрий Александрович* – к.т.н., профессор Одесского национального политехнического университета.

*Кобзарь Глеб Адольфович* – аспирант кафедры ПОЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники.

*Козуб Наталия Александровна* – старший преподаватель кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета.

*Коломоец Геннадий Павлович* – к.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры программирования и информационных технологий Гуманитарного университета "Запорозький інститут державного та муніципального управління".

*Кораблев Николай Михайлович* – к.т.н., доцент кафедры ЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники.

**Косолап Анатолий Иванович** – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Днепропетровского национального университета.

**Кривуля Геннадий Федорович** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой АПВТ Харьковского национального университета радиоэлектроники.

**Лантев Михаил Александрович** – аспирант кафедры АПВТ Харьковского национального университета радиоэлектроники.

**Ларионов Андрей Александрович** – студент Запорожского национального технического университета, программист ООО "МПА Групп".

**Лукьянова Валентина Петровна** – сотрудник ННЦ "Харьковский физико-технический институт".

**Лученко Олег Алексеевич** – сотрудник НПП "Хартрон-Плант", г. Харьков.

**Лютый Александр Павлович** – к.т.н., заместитель генерального директора по энергетике ОАО Электрометаллургический завод «Днепроспецсталь», г. Запорожье.

**Ляшенко Сергей Алексеевич** – к.т.н., доцент кафедры БЖД Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. П. Василенко.

**Молодых Людмила Сергеевна** – аспирант кафедры ПОАС Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт».

**Неласая Анна Викторовна** – соискатель кафедры БИТ Харьковского национального университета радиоэлектроники, ассистент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета.

**Нелепин Рональд Аполлонович** – д.т.н., профессор Санкт-Петербургского государственного университета, Россия.

**Нестеренко Борис Борисович** – д.т.н., старший научный сотрудник, заместитель директора Института математики НАН Украины, г. Киев.

**Николенко Анатолий Александрович** – к.т.н., доцент Одесского национального политехнического университета.

**Новотарский Михаил Анатольевич** – к.т.н., старший научный сотрудник Института математики НАН Украины, г. Киев.

**Овчаренко Ирина Витальевна** – аспирантка кафедры ЭВМ Харьковского национального университета радиоэлектроники.

**Олейник Алексей Александрович** – студент Запорожского национального технического университета.

**Олейник Андрей Александрович** – бакалавр компьютерных наук, студент магистратуры Запорожского национального технического университета.

**Орловский Игорь Анатольевич** – к.т.н., доцент, докторант кафедры ЭПА Запорожского национального технического университета.

**Панин Дмитрий Владимирович** – студент Запорожского национального технического университета, программист ООО "МПА Групп".

**Пархоменко Анжелика Владимировна** – к.т.н., доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета.

**Петров Эдуард Георгиевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

**Пинчук Вячеслав Павлович** – к.ф.-м.н., доцент кафедры вычислительной математики Запорожского национального технического университета.

**Пискалова Ольга Александровна** – аспирант кафедры системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

**Піза Дмитро Макарович** – д.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи та питань перспективного розвитку, директор Інституту інформатики та радіоелектроніки Запорізького національного технічного університету.

**Поздняков Олег Анатольевич** – генеральный директор консалтинговой компании ООО "Бриг-Ритейл", г. Киев.

**Потапенко Евгений Михайлович** – д.т.н., профессор кафедры ЭПА Запорожского национального технического университета.

**Притула Анатолий Викторович** – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета.

**Прохорец Иван Михайлович** – к.ф.-м.н., сотрудник ННЦ "Харьковский физико-технический институт".

**Прохорец Светлана Ивановна** – сотрудник ННЦ "Харьковский физико-технический институт".

**Рубцов Антон Геннадьевич** – аспирант Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск, Россия.

**Рудычев Егор Владимирович** – сотрудник ННЦ "Харьковский физико-технический институт".

**Садовский Михаил Георгиевич** – д.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск, Россия.

**Сакало Татьяна Сергеевна** – аспирантка Харьковского национального университета радиозлектроники.

**Самгулина Галина Ахметовна** – к.т.н., доцент Института проблем информатики и управления Министерства образования и науки Республики Казахстан, г. Алматы.

**Сенашиова Мария Юрьевна** – к.ф.-м.н., сотрудник Института вычислительного моделирования Сибирского отделения Российской академии наук, г. Красноярск, Россия.

**Синявский Андрей Александрович** – аспирант кафедры ЭПА Запорожского национального технического университета.

**Соловьёв Александр Александрович** – инженер-программист ЗАО «Геолинк Консалтинг», г. Санкт-Петербург, Россия.

**Субботин Сергей Александрович** – к.т.н., лауреат премии Президента Украины, доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, зам. директора ООО "МПА Групп" по научно-педагогической работе.

**Табунщик Галина Владимировна** – к.т.н., доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета.

**Труфанов Иван Дмитриевич** – д.т.н., профессор кафедры ЭПА Запорожского национального технического университета.

**Федорченко Дмитрий Владимирович** – к.ф.-м.н., сотрудник ННЦ "Харьковский физико-технический институт".

**Федорченко Евгений Николаевич** – ассистент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета.

**Хажмурадов Манан Ахмадович** – д.т.н., профессор ННЦ "Харьковский физико-технический институт".

**Ходаков Виктор Егорович** – д.т.н., профессор кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета.

**Хомченко Анатолий Никифорович** – д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

**Цокуренко Игорь Игоревич** – бакалавр компьютерных наук, студент магистратуры Запорожского национального технического университета.

**Чумаков Кирилл Игоревич** – аспирант кафедры ЭПА Запорожского национального технического университета.

Наукове видання

# **КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ**

Збірник наукових праць

За редакцією Д.М. Пізи, С.О. Субботіна

Оригінал-макет підготовлено на кафедрі програмних засобів  
та у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

**Комп'ютерне моделювання та інтелектуальні системи:**  
К63 Збірник наукових праць / За ред. Д.М. Пізи, С.О. Субботіна. –  
Запоріжжя: ЗНТУ, 2007. – 251 с.

ISBN 978-966-7809-75-1

Збірник містить наукові праці, присвячені вирішенню актуальних проблем у галузі математичного та комп'ютерного моделювання, систем штучного інтелекту, обробки та розпізнавання зображень, оптимізації та керування складними технічними об'єктами і процесами.

**ББК 32.97**

Підписано до друку 06.03.2007. Формат 60x84/16. Бум. офс.  
Різогр. друк. Ум. друк. арк. 12,6. Обл.-вид. арк. 14,6.  
Наклад 100 прим. Зам. № 298.

Запорізький національний технічний університет  
Україна, 69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64  
Тел.: 8 (061) 7-698-2-96, 220-12-14

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до державного реєстру видавців, виготівників  
і розповсюджувачів видавничої продукції  
від 27.12.2005 р., серія ДК № 2394