

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет  
"Харківський політехнічний інститут"

# ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ "ХПІ"

*Серія: Інформатика та моделювання*

№ 33 (1142) 2015

Збірник наукових праць

**Видання засновано у 1961 році**

Харків  
НТУ "ХПІ", 2015

**Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".** Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – 216 с.

**Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

*Вісник НТУ "ХПІ" внесено до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук", затвердженого постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. № 1 – 05/4. (Бюлєтень ВАК України № 6, 2010 р., стор. 3, № 20) та наказом МОН України № 1328 від 21.12.2015 р.*

*Серія "Інформатика та моделювання" Вісника НТУ "ХПІ" включена в наукометричні бази Copernicus (Польща), Elibrary (РІНЦ), DOAJ (Швеція), Google Scholar i базу даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).*

**Координаційна рада:**

Л.Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К.О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р. техн. наук, проф.; А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М.Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А.І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В.Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.; Ю.І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.; С.І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В.І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г.В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О.К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; С.Є. Олександров, д-р техн. наук, проф.; П.Г. Перерва, д-р техн. наук, проф.; В.О. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М.І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** В.Д. Дмитрієнко, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** С.Ю. Леонов, д-р техн. наук, доц.

**Члени редколегії:** А.Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.; Є.Г. Жиляков, д-р техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.; О.С. Логунова, д-р техн. наук, проф.; В.І. Носков, д-р техн. наук, проф.; А.І. Поворознюк, д-р техн. наук, проф; Г.А. Самігуліна, д-р техн. наук, проф. (Казахстан); О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.; А.Г. Трифонов, д-р техн. наук, проф. (Білорусь); Ханлар Гамзаєв, д-р техн. наук, проф. (Азербайджан); Б.А. Худаяров, д-р техн. наук, проф. (Узбекистан); Ihor Zanevsky, PhD, prof. (Polska).

**Рекомендовано до друку Вченовою радою НТУ "ХПІ"**

**Протокол № 10 від 27 11 2015 р.**

**ISSN 2079-0031 (Print)**

© Національний технічний університет "ХПІ", 2015

**ISSN 2411-0558 (Online)**

**Інформація про членів редколегії**

**видання Вісник НТУ "ХПІ", серія "Інформатика та моделювання"**

**Відповідальний редактор:** Дмитрієнко Валерій Дмитрович, д.т.н., професор, професор кафедри "Обчислювальна техніка та програмування" НТУ "ХПІ".

**Відповідальний секретар:** Леонов Сергій Юрійович, д.т.н., доцент, професор кафедри "Обчислювальна техніка та програмування" НТУ "ХПІ".

**Члени редколегії:**

Гурін Анатолій Григорович, д.т.н., проф., зав. каф. "Електроізоляційна та кабельна техніка" НТУ "ХПІ".

Жиляков Євген Георгіевич, д.т.н., проф., зав. каф. "Інформаційно-телекомуникаційні системи і технології" Белгородського національного державного дослідницького університету, Белгород.

Качанов Петро Олексійович, д.т.н., проф., зав. каф. "Автоматика та управління в технічних системах" НТУ "ХПІ".

Корсунов Микола Іванович, д.т.н., проф., проф. кафедри "Математичне і програмне забезпечення інформаційних систем" Белгородського національного державного дослідницького університету, Белгород.

Логунова Оксана Сергіївна, д.т.н., проф., проф. кафедри "Обчислювальна техніка та програмування" ГОУ ВПО "Магнітогорський державний технічний університет ім. Г.І. Носова", дійсний член Академії інженерних наук ім. А.М. Прохорова, Магнітогорск.

Носков Валентин Іванович, д.т.н., доц., доц. кафедри "Обчислювальна техніка та програмування" НТУ "ХПІ", дійсний член Транспортної академії наук України.

Поворознюк Анатолій Іванович, д.т.н., проф., проф. кафедри "Обчислювальна техніка та програмування" НТУ "ХПІ".

Самігуліна Галина Ахметовна, д.т.н., зав. лаб. "Інтелектуальні системи управління і прогнозування" Інституту інформаційних і обчислювальних технологій КН МОН РК, Казахстан, Алмати.

Серков Александр Анатолієвич, д.т.н., проф., зав. каф. "Системи інформації" НТУ "ХПІ", заслужений винахідник України, академік міжнародної Академії наук Прикладної Радіоелектроніки, член IEEE.

Трифонов Олександр Георгійович, д.т.н., проф., зав. лаб. "Нелінійні взаємодії" ГНУ ОІЕЯ "Сосни" НАН Білорусі, Республіка Білорусь, Мінськ.

Ханлар Гамзаев, д.т.н., проф., проф. кафедри "Прикладна математика" Азербайджанської державної нафтової академії, Баку.

Худаяров Баhtтіяр Алімович, д.т.н., проф., зав. каф. "Вища математика", Узбекистан, Ташкент.

Ihor Zanevskyy, Ph. D., prof. – Department of Health and Sports Sciences, Kazimierz Pulaski Technological and Humanistic University in Radom, Radom, Poland.

**Розміщення Вісника НТУ "ХПІ"**  
**серії "Інформатика та моделювання"**

**в міжнародних наукометрических базах, репозитаріях та пошукових**  
**системах**

**1. Serial registries:** ISSN, Ulrich's Periodical Directory (США).

**2. Abstracting systems:** Copernicus (Польща), eLibrary (Россия), CiteFactor, SIS (Scientific Indexing Services), Open Academic Journals Index (Россия), UIF (Universal Impact Factor), Directory of Research Journals Indexing (Індія).

**3. Web-based search systems:** Google Scholar, Academic Index.

**4. Electronic Libraries:** Cyberleninka (Россия), Bielefeld Academic Search Engine (Германия), Open Journal Systems (Украина), Национальная библиотека им. Вернадского (Украина), Научно-техническая библиотека НТУ "ХПІ" (Украина), Text Archive (Россия).

**5. Journal databases:** Directory of open access journals (Швеція), OCLC WorldCat (США), Research Bible (Японія), Genamics Journal Seek (США), SHERPA/RoMEO, Academic Database Assessment Tool.

**6. University Libraries:** ***США:*** Walden University, Beardsley Library Journals, University at Albany, University of Texas, WRLC Catalogs, University Oregon, Monterey Bay Library, University of Kentucky, University of Georgia, Indiana University, Harvard Library, New York University, Northwestern University, San Jose State University, Library & Technology Services, Mercyhurst College Library System, Poudre River Public Library District, Virtual Science Library, Journal index, Jean and Alexander Heard Library. ***Великобританія:*** Birmingham Public Library, British Library, Social Services Knowledge Scotland, Linking Service, University of Strathclyde Glasgow, SUPrimo Library, University of Glasgow, Royal Holloway University of London, University of Cambridge, University of Essex, University of Nottingham, One Search, UCL Library Services. ***Канада:*** University of New Brunswick, Trinity Western University, University of Saskatchewan, University of Ottawa, University of Regina, University of Windsor, Laurentian University.

***Австралія:*** Latrobe University Library, The Grove Library, State Library, SL On Search, Griffith University, UniSA. ***Швеція:*** IBRIS - Nationally bibliotheca system, Hogskolan Dalarna, Sodertorns hogskola, Stockholms University Library, Chalmers Bibliotheca. ***Нідерланди:*** Quality Open Access Market, University of Leiden.

***Мексика:*** University Mexico, CCG-IBT Bibliotheca. ***Інші країни:*** Universia (Іспанія), Babord+ (Франція), SLU (Швеція), Cerge EL (Чехія), BON (Португалія), AUT Library (Нова Зеландія), Polska Bibliografia Naukowa (Польща), Государственная національная техническая библиотека (Україна), Научная библиотека имени Говорова (Россія, Санкт-Петербург), Universiteits bibliotheek Gent (Бельгія), E-Resources Subject Access (Китай).

*Електронна адреса сайту Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" [www.pim.net.ua](http://www.pim.net.ua)*

*A.B. АЛЕЩЕНКО*, асп., НТУУ "КПИ", Киев

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЯЗЫКА ДЛЯ ТРАНСЛЯЦИИ ГРАФИЧЕСКИХ СХЕМ АЛГОРИТМОВ В ИСПОЛНЯЕМЫЙ КОД**

Описаны функциональные требования к системе имитации для получения оценок эффективности трансляции графических схем алгоритмов в исполняемый код с использованием промежуточного языка трансляции. Приведен пример процесса тестирования. Описана возможность указания точек замера времени выполнения программ с целью учета или игнорирования определенных частей алгоритма. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** система имитации, оценка эффективности трансляции, исполняемый код, промежуточный язык трансляции, тестирование, время выполнения программы, алгоритм.

**Постановка проблемы.** В настоящее время широко распространены CASE-системы (*Computer-Aided System/Software Engineering*), которые позволяют автоматизировать процесс разработки программных продуктов. Однако такая автоматизация, как правило, не является полной, так как внутренние коды методов классов предлагается вписывать вручную [1]. Следовательно, актуальной является задача полной автоматизации процесса создания программных продуктов, в рамках которой реализуется собственная система автоматической генерации программных кодов по графической схеме алгоритма (ГСА), которая, например, в нотации UML соответствует диаграмме деятельности (*activity diagram*) [2].

При разработке данной системы, наряду с задачей представления ГСА и её верификации, ставится задача трансляции ГСА в исполняемый код. Такая трансляция возможна тремя способами. Первый из них – использование промежуточного языка высокого уровня, второй – трансляция в промежуточный унифицированный код (например, байт-код в языке Java), и третий – трансляция непосредственно в исполняемый код [3].

Для получения оценок способов трансляции ГСА и, в частности, эффективности промежуточного языка трансляции разрабатывается система имитации, так как аналитическая оценка сложности трансляции не представляется возможной.

**Анализ литературы.** В работе [4] описывается среда визуальной разработки "*PureBuilder*", которая, по словам автора, должна полностью избавить от исходного кода в текстовом виде и перейти к визуальному программированию на основе "универсального языка программирования". Автор использует "встроенный язык" для надписей на графических элементах среды визуальной разработки, который не наследует синтаксис какого-то из существующих языков программирования. Также в *PureBuilder* не применяются операторы досрочного выхода *exit*, *break*, *exit when*, *continue*, *return*, операторы генерации исключительной ситуации *throw* (допускается в отладочном режиме) и другие конструкции, которые расцениваются как небезопасные, в частности, таким документом, как *NASA Software Safety Guidebook*. В соответствии с функциональной парадигмой программирования, в *PureBuilder* не применяются глобальные и статические переменные. Отказ от использования существующих языков программирования в качестве промежуточных языков трансляции требует от разработчиков системы *PureBuilder* реализации, развития и поддержки собственных алгоритмов трансляции непосредственно в машинный код. С другой стороны, подобная концепция вынуждает пользователей отказаться от привычных конструкций, которые существуют во многих текстовых языках программирования.

В работе [5] описана парадигма языково-ориентированного программирования и её реализация автором в собственной системе "*Meta Programming System*". По словам автора, парадигма языково-ориентированного программирования даёт возможность работать непосредственно в терминах концепций и понятий проблемы, которая решается, вместо того чтобы переводить их в нотацию языка программирования общего назначения (классы, методы, циклы, ветвления и т.п.). Для этого нужен язык, специфичный для предметной области, который и предлагается создать на основе существующих языков программирования. Появление в процессе трансляции ещё одного промежуточного звена в виде специфичного языка для предметной области потенциально увеличит время генерации исполняемого кода. Также, с одной стороны, потребуется создание нового языка для каждой предметной области, а с другой – его изучение другими участниками процесса разработки. Кроме того, автор не рассматривает задачу выбора языка программирования, который будет использован в качестве основы для создания специфичного языка.

В работе [6] также используется парадигма языково-ориентированного программирования, рассмотрены инструментальные средства разработки и сопровождения программного обеспечения на

основе автоматической генерации кода, реализованные на языке *Python* с использованием комбинаторной библиотеки *PyParsing*. Наполнение компонентной библиотеки и формирование конкретной реализации программного приложения происходит в результате генерации программного кода, формирующего исходный код на языке *C++*. Однозначность выбора промежуточного языка трансляции потенциально ограничивает пользователя описываемой в работе системы.

В работах [7] и [8] сравниваются различные языки программирования на конкретных тестовых задачах. По причине неиспользования системы генерации кодов, для решения общей тестовой задачи на каждом языке программирования авторы вручную писали отдельные текстовые программы. Кроме необходимости владения всеми тестируемыми языками, ещё одним недостатком подобного подхода есть то, что написанные таким образом исходные коды могут терять свою актуальность ("устаревать") в процессе развития соответствующих языков программирования и их трансляторов по причине появления новых более эффективных конструкций.

Всё вышеперечисленное делает актуальным создание системы имитации на основе генерации кодов, которая позволит пользователю оценить и сравнить эффективность различных трансляторов и языков программирования в качестве промежуточных языков трансляции ГСА в исполняемый код.

**Цель статьи** – разработка системы имитации для получения оценок эффективности промежуточного языка трансляции ГСА в исполняемый код.

**Описание эксперимента и аспектов системы имитации.** Любой транслятор (компилятор или интерпретатор) является автоматом перевода текста на некотором языке в соответствующую последовательность команд процессора ЭВМ. От длины и структуры этой последовательности существенно зависит скорость выполнения программы пользователя. Например, программу, написанную на каком-либо языке программирования, можно перевести на язык команд процессора двумя различными компиляторами  $K_1$  и  $K_2$ . Более эффективным следует считать тот компилятор, после обработки которым исходной программы, последняя выполняется быстрее [9].

С целью измерения скорости выполнения алгоритма, реализованного на разных языках, в системе генерации [10] была построена тестовая ГСА (см. рис. 1). Эта графическая схема описывает реализацию алгоритма сортировки простыми обменами ("пузырьком").

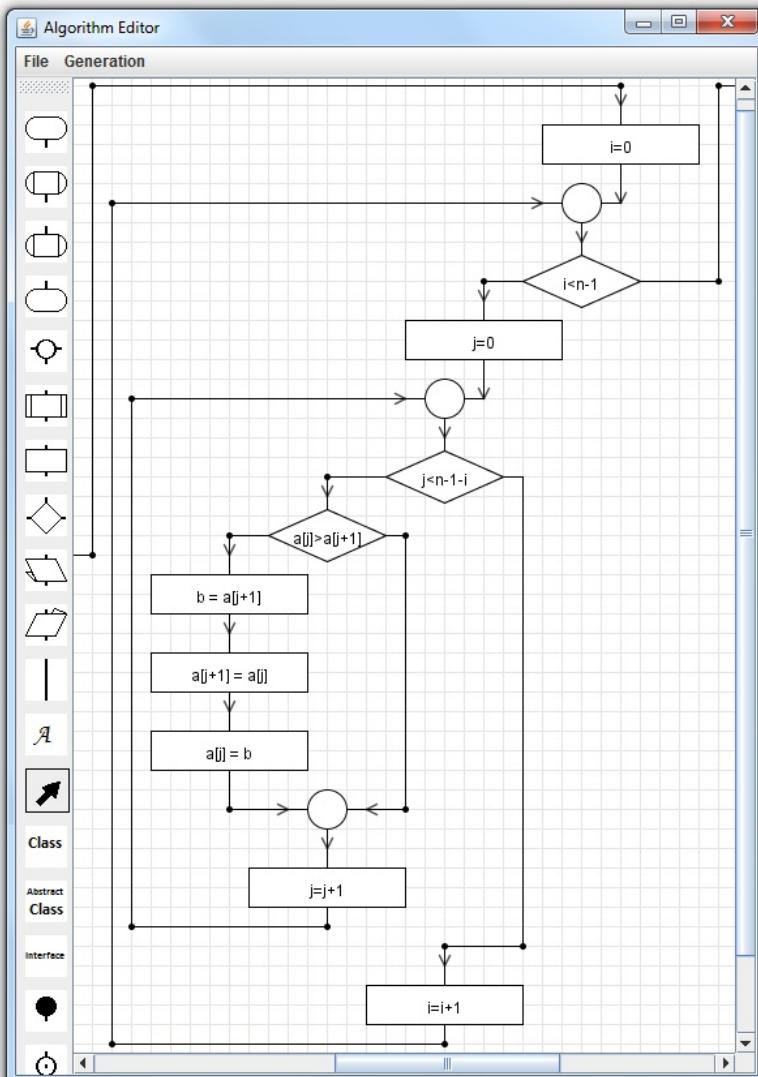


Рис. 1. Главное окно системы генерации с ГСА сортировки простыми обменами ("пузырьком")

Главное окно системы генерации позволяет задать графическую схему алгоритма с помощью панели инструментов, которая размещена

вертикально у левого края окна. Главное меню позволяет создать новую ГСА (удалить схему, которая находится в данный момент), сохранить и загрузить ГСА, а также сгенерировать программные коды по текущей ГСА.

С помощью системы генерации были получены по ГСА программные коды на языке *Java* и *Pascal*. На данный момент система ещё не генерирует код на языке *C++*, но программная реализация алгоритма на этом языке была также создана методом ручной трансляции с кода программы на языке *Java*.

В трёх программных реализациях были добавлены операторы измерения времени выполнения и ввод данных был изменён с клавиатурного на файловый. Предварительно был создан файл с множеством случайных чисел, который служил источником данных для сортировки. Эти дополнительные действия носят рутинный характер и могут быть автоматизированы средствами разрабатываемой системы имитации.

Результаты многократного выполнения данных программных реализаций приведены на диаграмме (см. рис. 2), построение которой также предусматривается функционалом системы имитации. Данная диаграмма демонстрирует изменение времени выполнения алгоритма (ось ординат) для разных языковых реализаций в ходе отдельных экспериментальных запусков (ось абсцисс). Эта информация может быть отображена и в табличной форме.

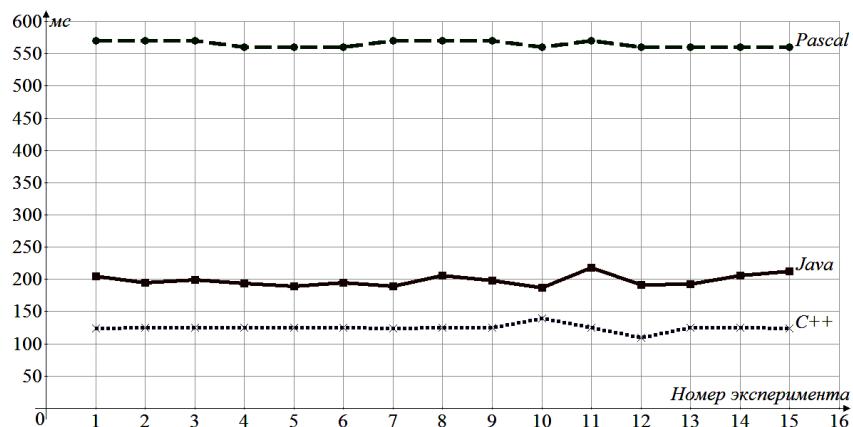


Рис. 2. Результирующая диаграмма тестирования времени выполнения программных реализаций

В процессе тестирования измерялся интервал времени выполнения непосредственно сортировки данных без "накладных расходов" на ввод и вывод данных. Полезной функцией разрабатываемой системы имитации будет возможность указания на ГСА точек замера времени выполнения самим пользователем с целью учитывания или игнорирования определённых частей алгоритма.

Кроме времени выполнения существуют и другие метрики эффективности трансляции, например, размер исполняемого файла, информация о котором также может быть представлена системой имитации.

Конкретные цифровые результаты тестирования, объёмы входных данных, задача выбора тестируемого алгоритма и набора тестируемых языков программирования не являются предметом данной статьи. Приведенное тестирование носит концептуальный характер и отображает функциональные требования к системе имитации для получения оценок эффективности промежуточного языка трансляции ГСА в исполняемый код.

Система генерации и система имитации предполагают расширение множества промежуточных языков трансляции. Создав ГСА для решаемой задачи, пользователь может автоматически сгенерировать и протестировать целый ряд текстовых программных реализаций. Система имитации, используя систему генерации, будет способна определить наиболее эффективный язык и транслятор для реализации заданного алгоритма. Кроме того, запуск данных систем на оборудовании и операционной системе, которые должны выполнять итоговый программный код, даёт возможность получить наиболее актуальные сведения. Разработка описываемых систем на кроссплатформенном языке *Java* позволит реализовать генерацию и тестирование на разных операционных системах.

Необходимым условием получения правильных и актуальных результатов тестирования есть своевременное обновление транслятора из ГСА в промежуточный язык программирования высокого уровня. Причиной этого есть тот факт, что появление новых, более эффективных конструкций языков и реализация их в новых версиях трансляторов существенно влияет на результаты тестирования.

**Выводы.** В результате проделанной работы были описаны функциональные требования к системе имитации для получения оценок эффективности промежуточного языка трансляции ГСА в исполняемый код. Данная система, основываясь на реализованной системе генерации,

позволяет автоматически транслировать исходную ГСА и определить наиболее эффективный язык и транслятор из поддерживаемых этими системами. Разработка систем на языке *Java* позволяет реализовывать генерацию кодов и сбор данных (тестирование) на различных операционных системах.

Приведен пример процесса тестирования, в ходе которого использовались промежуточные языки *Pascal*, *Java* и *C++*. Описана возможность указания пользователем точек замера времени выполнения программ с целью учитывания или игнорирования определённых частей алгоритма.

Дальнейшими перспективами развития есть увеличение множества поддерживаемых системами промежуточных языков высокого уровня, разработка эффективного способа добавления нового промежуточного языка трансляции и усовершенствование процесса создания ГСА в разработанном редакторе.

**Список литературы:** 1. Канжелев С. Автоматическая генерация кода программ с явным выделением состояний / С. Канжелев, А. Шалыто // *Paths to Competitive Advantage: Software Engineering Conference*. – М., 2006. – С. 60–63. 2. Бузовский О.В. Система верификации графических схем алгоритмов и генерации программных кодов / О.В. Бузовский, А.В. Алещенко // Проблеми інформатизації та управління. – 2015. – Т. 2. – № 50. – С. 32–35. 3. Бузовский О.В. Разработка системы генерации кодов по графическим схемам алгоритма с промежуточным языком трансляции / О.В. Бузовский, А.В. Алещенко // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 4/2 (24). – С. 15–19. 4. Прохоренко С. *PureBuilder*. Проект: Среда визуальной разработки без исходного кода [Электронный ресурс] / С. Прохоренко – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/purebuilder/> (08.10.2015) – Загл. с экрана. 5. Дмитриев Сергей. Языково-ориентированное программирование: следующая парадигма [Электронный ресурс] / Сергей Дмитриев // *RSDN Magazine* – Санкт-Петербург. – 2005. – № 5. <https://rsdn.ru/article/philosophy/LOP.xml> 6. Александров А.Е. Инструментальные средства разработки и сопровождения программного обеспечения на основе генерации кода / А.Е. Александров, В.П. Шильманов // Бизнес-информатика. – 2012. – № 4. – С. 10–17. 7. Цилиорюк О. Производительность языков программирования. Часть 1 [Электронный ресурс] / Олег Цилиорюк. – 2014. – Режим доступа: [https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/ManySpeed\\_08\\_1/](https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/ManySpeed_08_1/) (08.10.2015) – Загл. с экрана. 8. Юдин С.Ю. Выбор языка программирования для научных работников [Электронный ресурс] / С.Ю. Юдин. – 2007. – Режим доступа: [http://modsys.narod.ru/Stat/Stat\\_Prog/Vibor/Vibor2.html](http://modsys.narod.ru/Stat/Stat_Prog/Vibor/Vibor2.html) (08.10.2015) – Загл. с экрана. 9. Средства ресурсной поддержки. Программное обеспечение ЭВМ. Языки программирования [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://ecosyb.narod.ru/410-417/inrs2\\_17.htm](http://ecosyb.narod.ru/410-417/inrs2_17.htm) (08.10.2015) – Загл. с экрана. 10. Бузовский О.В. Система визуального проектирования и генерации программных кодов / О.В. Бузовский, А.В. Алещенко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 22 (1131) – С. 14–17.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kanzhelev S. Avtomaticheskaja generacija koda programm s javnym vydeleniem sostojanij / S. Kanzhelev, A. Shalyto // Paths to Competitive Advantage: Software Engineering Conference. – M., 2006. – P. 60–63. 2. Buzovskij O.V. Sistema verifikacii

graficheskikh shem algoritmov i generacii programmnyh kodov / O.V. Buzovskij, A.V. Aleshchenko // Problemi informatizaciї ta upravlinnja. – 2015. – T. 2, № 50. – P. 32-35. **3.** Buzovskij O.V. Razrabotka sistemy generacii kodov po graficheskim shemam algoritma s promezhutochnym jazykom transljacii / O.V. Buzovskij, A.V. Aleshchenko // Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva. – 2015. – № 4/2 (24). – P. 15-19. **4.** Prohorenko C. PureBuilder. Proekt: Sreda vizual'noj razrabotki bez ishodnogo koda [Jelektronnyj resurs] / C. Prohorenko – Rezhim dostupa: <https://sites.google.com/site/purebuilder/> (08.10.2015) – Zagl. s jekrana. **5.** Dmitriev Sergej Jazykovo-orientirovannoe programmirovaniye sledujushchaja paradigma [Jelektronnyj resurs] / Sergej Dmitriev // RSDN Magazine – Sankt-Peterburg. – 2005. – № 5. – Rezhim dostupa: <https://rsdn.ru/article/philosophy/LOP.xml> (08.10.2015) – Zagl. s jekrana. **6.** Aleksandrov A.E. Instrumental'nye sredstva razrabotki i soprovozhdelenija programmного obespechenija na osnove generacii koda / A.E. Aleksandrov, V.P. Shil'manov // Biznes-informatika. – 2012. – № 4. – P. 10-17. **7.** Ciljuruk O. Proizvoditel'nost' jazykov programmirovaniya. Chast' 1 [Jelektronnyj resurs] / Oleg Ciljuruk. – 2014. – Rezhim dostupa: [https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/ManySpeed\\_08\\_1/](https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/ManySpeed_08_1/) (08.10.2015) – Zagl. s jekrana. **8.** Judin S.Ju. Vybor jazyka programmirovaniya dlja nauchnyh rabotnikov [Jelektronnyj resurs] / S.Ju. Judin. – 2007. – Rezhim dostupa: [http://modsys.narod.ru/Stat\\_Prog/Vibor/Vibor2.html](http://modsys.narod.ru/Stat_Prog/Vibor/Vibor2.html) (08.10.2015) – Zagl. s jekrana. **9.** Sredstva resursnoj podderzhki. Programmnoe obespechenie JeVM. Jazyki programmirovaniya [Jelektronnyj resurs] – Rezhim dostupa: [http://ecocyb.narod.ru/410-417/inrs2\\_17.htm](http://ecocyb.narod.ru/410-417/inrs2_17.htm) (08.10.2015) – Zagl. s jekrana. **10.** Buzovskij O.V. Sistema vizual'nogo proektirovaniya i generacii programmnyh kodov / O.V. Buzovskij, A.V. Aleshchenko // Visnik Naciona'l'nogo tehnichnogo universitetu "HPI". Zbirnik naukovih prac'. Serija: Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi. – H.: NTU "HPI", 2015. – № 22 (1131) – P. 14-17.

*Поступила (received) 09.10.2015*

*Статью представил д.т.н., проф. НТУУ "КПИ" Бузовский О.В.*

Aleshchenko Oleksii, PhD student

National Technical University of Ukraine

"Kiev Polytechnic Institute"

Prospect Peremohy, 37, 03056, Kyiv-56, Ukraine

tel./phone: (096) 833-89-99, e-mail: [alexey.aleshchenko@gmail.com](mailto:alexey.aleshchenko@gmail.com)

ORCID ID: 0000-0002-6528-3748

УДК 681.58

**P.C. ВОЛЯНСКИЙ**, канд. техн. наук, доц., докторант,  
Днепродзержинский государственный технический университет,  
Днепродзержинск,

**A.V. САДОВОЙ**, д-р техн. наук, проф., проректор по научной  
работе, Днепродзержинский государственный технический  
университет, Днепродзержинск

## **НЕОБХОДИМОЕ УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДИСКРЕТНОГО НАБЛЮДАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА**

Составлено матричное уравнение движения непрерывного и дискретного наблюдаемых устройств, восстанавливающих первую производную от сигнала задания. Получены их характеристические уравнения, и определено максимально возможное значение периода дискретизации, при котором замкнутая цифровая система остается устойчивой. Ил.: 1. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** уравнение движения, наблюдающее устройство, характеристическое уравнение, период дискретизации, устойчивость.

**Постановка проблемы.** Последние достижения микропроцессорной и микроконтроллерной техники в разработке недорогих мощных микроконтроллеров создали предпосылки для модернизации существующих и создания новых систем управления электромеханическими объектами и технологическими процессами. Оптимизация таких систем по различным критериям позволяет улучшить характеристики систем управления и, как следствие, повысить качество выпускаемой продукции при одновременном снижении ее себестоимости. Одним из направлений оптимизации является использование в алгоритмах управления информации о старших производных отклонения регулируемой величины от ее желаемого значения [1]. Причем непосредственное дифференцирование этого отклонения в реальных технических системах осложнено наличием шумовой составляющей. Необходимость фильтрации шумов приводит к появлению в канале обратной связи системы управления инерционных элементов, которые вносят в алгоритм управления дополнительное запаздывание [2, 3] и ухудшают динамические характеристики соответствующей системы управления.

**Анализ литературы.** На практике для определения старших

---

© Р.С. Волянский, А.В. Садовой, 2015

производных отклонения используются наблюдающие устройства [4, 5]. Вопросам анализа и синтеза систем управления с наблюдающими устройствами посвящено большое количество работ в отечественной [6, 7] и зарубежной печати [8, 9]. Приведенные в этих работах результаты показывают, что использование в алгоритме управления производных высоких порядков улучшает динамические и статические характеристики систем управления электромеханическими объектами. Реализация этих систем на базе современной микроконтроллерной техники [10] создает предпосылки к построению автоматизированных систем управления отдельными технологическими процессами или всем производством в целом. Последнее обуславливает возникновение актуальной научной задачи анализа и синтеза цифровых наблюдающих устройств. Одним из подходов к решению указанной задачи является одновременное использование корневых и сеточных методов [2].

**Целью** настоящей работы является определение необходимых условий устойчивости цифрового наблюдающего устройства.

**Материалы исследования.** Реализация наблюдающих устройств на микроконтроллерах осуществляется путем численного решения соответствующих дифференциальных уравнений. Поскольку такие устройства должны работать в режиме реального времени, то удобным является использование численных методов решения дифференциальных уравнений с постоянным периодом дискретизации, величина которого является одним из факторов, определяющих устойчивость модели.

Для получения аналитических выражений, связывающих период дискретизации с параметрами и переменными состояния наблюдающего устройства, рассмотрим следующий динамический объект второго порядка

$$py_1 = a_{12}y_2; \quad py_2 = m_2U, \quad (1)$$

где  $a_{12}, m_2$  – параметры объекта управления;  $y_1, y_2$  – переменные состояния;  $U$  – управляющее воздействие.

Если подаваемое на объект (1) управляющее воздействие обеспечивает равенство наблюдаемой координаты  $y_1^*$  и координаты  $y_1$ , то тогда переменная состояния  $y_2$  наблюдателя будет пропорциональна искомой производной от наблюдаемой величины. Такой подход за счет наличия интегрирующих звеньев в наблюдающем устройстве не только позволяет определить производную от наблюдаемой величины, но и в результате использования интегрирующих звеньев осуществляет

автоматическую фильтрацию сигнала. При необходимости определения производных более высоких порядков должна быть увеличена размерность объекта управления.

Будем считать, что управление объектом (1) осуществляется в соответствии со следующим алгоритмом управления

$$U = g[k_1(y_1^* - y_1) - k_2y_2], \quad (2)$$

где  $g$  – общий коэффициент усиления регулятора, который в общем случае может быть переменным;  $k_1, k_2$  – некоторые коэффициенты, определяющие траектории движения объекта (1).

Подстановка управляющего воздействия (2) в уравнения движения объекта (1) позволяет записать следующее матричное уравнение

$$p\mathbf{Y} = \mathbf{AY} + \mathbf{BY}^*; \quad (3)$$

$$\mathbf{Y} = (y_1 \quad y_2)^T; \quad \mathbf{B} = (0 \quad m_2 g k_1)^T; \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} \\ -m_2 g k_1 & -m_2 g k_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

из которого легко может быть получено характеристическое уравнение наблюдающего устройства в непрерывном времени

$$D(\lambda) = \lambda\mathbf{E} - \mathbf{A} = 0, \quad (5)$$

где  $\mathbf{E}$  – единичная матрица размерности  $2 \times 2$ ,  
или в развернутом виде

$$D(\lambda) = \lambda^2 + m_2 g k_2 \lambda + m_2 g k_1 a_{12} = \lambda^2 + d_{11}\lambda + d_{12} = 0. \quad (6)$$

Анализ уравнения (5) показывает, что назначением коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  можно обеспечить любое желаемое распределение корней характеристического уравнения наблюдающего устройства, а значит сформировать требуемую траекторию его движения, причем коэффициенты характеристического уравнения непрерывного наблюдающего устройства зависят только от его параметров.

Используя z-преобразование, выполним дискретизацию системы (3) по времени. При этом будем считать, что оператор дифференцирования  $p$  аппроксимируется следующим выражением [2]

$$p \approx \frac{1}{T} \frac{1-z}{z}, \quad (7)$$

где  $T$  – период дискретизации непрерывной системы (3) по времени;  $z$  – оператор сдвига на один шаг назад.

С учетом выражения (7) уравнение (3) примет вид

$$\mathbf{Y} = Tz\mathbf{A}\mathbf{Y} + z\mathbf{Y} + Tz\mathbf{B}\mathbf{Y}^* \quad (8)$$

или

$$\mathbf{Y} = \mathbf{C}z\mathbf{Y} + \mathbf{D}z\mathbf{Y}^*; \quad (9)$$

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} 0 & Tm_2gk_1 \end{pmatrix}^T; \quad \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & Ta_{12} \\ -Tm_2gk_1 & 1-Tm_2gk_2 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

По аналогии с характеристическим уравнением (5) запишем характеристическое уравнение для системы (9)

$$D(\lambda) = \lambda\mathbf{E} - \mathbf{C} = 0 \quad (11)$$

или

$$\begin{aligned} D(\lambda) = \lambda^2 + (-2 + Tm_2gk_2)\lambda + 1 + T^2m_2gk_1a_{12} - Tm_2gk_2 = \\ = \lambda^2 + d_{21}\lambda + d_{22} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Анализ уравнения (12) показывает, что его коэффициенты зависят от периода дискретизации  $T$ , что позволяет определять его максимальную величину в зависимости от параметров наблюдающего устройства и желаемой траектории движения. Сравнение полиномов (6) и (12) позволяет утверждать, что коэффициенты характеристического полинома дискретной системы связаны с коэффициентами полинома непрерывной системы зависимостями

$$d_{21} = -2 + Td_{11}; \quad d_{22} = 1 + T^2d_{12} - Td_{11}, \quad (13)$$

которые позволяют записать характеристический полином дискретной системы по известному характеристическому полиному непрерывной системы без дискретизации уравнений ее движения.

Максимальное значение периода дискретизации определяется в результате решения уравнений

$$1 + T^2m_2gk_1a_{12} - Tm_2gk_2 = 0; \quad (14)$$

$$-2 + Tm_2gk_2 = 0 \quad (15)$$

следующей зависимостью

$$T = \min(T_1, T_2, T_3), \quad (16)$$

где

$$T_1 = \frac{2}{m_2 g k_2}; \quad (17)$$

$$T_2 = \frac{m_2 g k_2 + \sqrt{m_2 g^2 k_2^2 - 4 m_2 g k_1 a_{12}}}{2 m_2 g k_1 a_{12}}; \quad (18)$$

$$T_3 = \frac{m_2 g k_2 - \sqrt{m_2 g^2 k_2^2 - 4 m_2 g k_1 a_{12}}}{2 m_2 g k_1 a_{12}}. \quad (19)$$

На рис. приведены результаты математического моделирования отработки единичного ступенчатого воздействия синтезированным наблюдающим устройством, которое реализовано на базе платы Arduino Due, оснащенной микроконтроллером Atmel SAM3X8E Cortex-M3. Параметры наблюдающего устройства приняты следующие:  $m_2 = g = k_1 = 1$ ,  $a_{12} = 2$ ,  $k_2 = 3$ . Значения периодов дискретизации  $T_1 = 2/3$ ,  $T_2 = 1$ ,  $T_3 = 1/2$  вычислены в соответствии с выражениями (16) – (18). Кривые 1 – 3 получены при значениях периодов дискретизации  $T_1$  –  $T_3$  соответственно. На этом же рисунке показаны результаты моделирования непрерывной системы (3) (кривая 4).

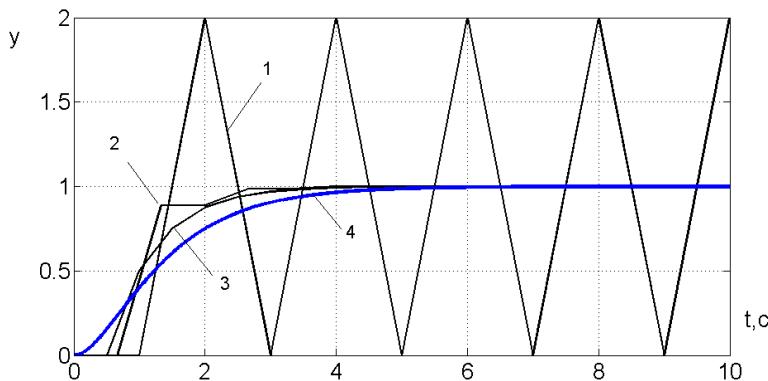


Рис. Переходные функции моделируемой системы

Анализ результатов работы наблюдающего устройства подтверждает, что синтезированная система будет устойчива при значениях периода дискретизации  $T_3 \leq 0.5 \text{ с}$ . В этом случае кривая 3 приближается к эталонной кривой 4; в остальных случаях результаты работы дискретного наблюдающего устройства существенно отличаются от эталонного.

**Выводы.** Приведенные выкладки и результаты экспериментальных исследований синтезированного наблюдающего устройства позволяют сделать вывод, что для наблюдающего устройства, осуществляющего восстановление первой производной от задающего сигнала, выражение (16) является необходимым условием устойчивости. В отличие от коэффициентов характеристического уравнения непрерывной системы, коэффициенты характеристического уравнения дискретной системы зависят от периода дискретизации и метода аппроксимации оператора дифференцирования. Аналогичные условия устойчивости могут быть получены для наблюдающих устройств большой размерности путем численного решения характеристического уравнения соответствующей дискретной системы. Несмотря на то, что в работе исследовалось наблюдающее устройство с линейным регулятором, управляющее воздействие которого не ограничено по модулю, применяемый подход позволяет определять период дискретизации наблюдающего устройства с нелинейной активационной функцией и нелинейными обратными связями. Указанные факторы представляют интерес с точки зрения повышения точности, быстродействия и порядка наблюдающего устройства и определяют направления дальнейших исследований.

**Список литературы:** 1. Садовой А.В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А.В. Садовой, Б.В. Сухинин, Ю.В. Сохина. – К.: ИСИМО, 1996. – 298 с.  
2. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры / Г. Лэм. – М.: Мир, 1982. – 589 с.  
3. Волянский Р.С. Линеаризация обратными связями уравнений динамики обобщенного электромеханического объекта с дифференциальным уравнением наблюдаемости / Р.С. Волянский, А.В. Садовой // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Механико-технологические системы и комплексы. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2014. – № 60 (1102). – С. 52-57.  
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Линейные системы / Д.П. Ким. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.  
5. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н.Т. Кузовков. – М.: Машиностроение. – 1976. – 184 с.  
6. Горячев О.В. Синтез наблюдателя состояния силовой системы привода наведения и стабилизации / О.В. Горячев, Е.С. Иванова, Д.И. Степаничев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Тула: ТулГУ. – 2011. – № 5-1. – С. 332-341.  
7. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы / А.Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.  
8. Trentelman H.L. Observer-Based Control / H.L. Trentelman, P. Antsaklis // Encyclopedia of Systems and Control. – London: Springer. – P. 1-6.  
9. Sakthivel R. Observer-based control for switched networked control systems with missing data / R. Sakthivel, Santra Srimanta // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2015. – Vol. 6. – Is 4. – P. 677-

686. 10. *Kuo B.* Теория и проектирование цифровых систем управления / *B. Kuo*. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.

- Bibliography (transliterated):** 1. *Sadovoj A.V.* Sistemy optimal'nogo upravlenija precizionnymi jelektroprivodami / *A.V. Sadovoj, B.V. Suhinin, Ju.V. Sohina*. – К.: ISIMO, 1996. – 298 p. 2. *Ljem G.* Analogovye i cifrovye fil'try / *G. Ljem*. – М.: Mir, 1982. – 589 p. 3. *Voljanskij R.S.* Linearizacija obratnymi svyazjami uravnenij dinamiki obobshhennogo jelektromechanicheskogo ob"ekta s differencial'nym uravneniem nabljudаемости / *R.S. Voljanskij, A.V. Sadovoj* // Vestnik NTU "HPI". Serija: Mehaniko-tehnologicheskie sistemy i kompleksy. – Har'kov: NTU "HPI". – 2014. – № 60 (1102). – P. 52-57. 4. *Kim D.P.* Teoriya avtomaticheskogo upravlenija. Linejnye sistemy / *D.P. Kim*. – М.: Fizmatlit, 2003. – 288 p. 5. *Kuzovkov N.T.* Modal'noe upravlenie i nabljudajushchie ustrojstva / *N.T. Kuzovkov*. – М.: Mashinostroenie. – 1976. – 184 p. 6. *Gorjachev O.V.* Sintez nabljudatelja sostojaniya silovoj sistemy privoda navedenija i stabilizacii / *O.V. Gorjachev, E.S. Ivanova, D.I. Stepanichev* // Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. – Tula: TulGU. – 2011. – № 5-1. – P. 332-341. 7. *Aleksandrov A.G.* Optimal'nye i adaptivnye sistemy / *A.G. Aleksandrov*. – М.: Vysshaja shkola, 1989. – 263 p. 8. *Trentelman H.L.* Observer-Based Control / *H.L. Trentelman, P. Antsaklis* // Encyclopedia of Systems and Control. – London: Springer. – P. 1-6. 9. *Sakthivel R.* Observer-based control for switched networked control systems with missing data / *R. Sakthivel, Santra Srimanta* // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2015. – Vol. 6. – Is. 4. – P. 677-686. 10. *Kuo B.* Teoriya i proektirovanie cifrovych sistem upravlenija / *B. Kuo*. – М.: Mashinostroenie, 1986. – 448 p.

Поступила (received) 30.06.2015

*Статью представил д.т.н., проф. Института электромеханики, энергосбережения и систем управления Черный А.П.*

Voliansky Roman, PhD Tech, doctorant,  
Dniprodzerzhynsk State Technical University  
Str. Dniprobuskaya, 2, Dniproderzhinsk, Ukraine, 51918  
tel/phone: (0569)-55-20-05, E-mail: voliansky@ua.fm  
ORCID ID: 0000-0001-5674-7646

Sadovoy Alexander, Dr. Tech, vice-rector in science,  
Dniprodzerzhynsk State Technical University  
Str. Dniprobuskaya, 2, Dniproderzhinsk, Ukraine, 51918  
tel/phone (0569)-55-12-87, E-mail: sadovoy@dstu.dp.ua  
ORCID ID: 0000-0003-0347-6322

УДК 006.91

**Н.В. ГЛУХОВА**, канд. техн. наук, доц., ДВНЗ "Національний гірничий університет", Дніпропетровськ

## **МЕТРОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ НАПІВТОНОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

Розглянуто існуючі проблеми розробки метрологічного забезпечення при використанні методів вимірювань, що засновані на реєстрації та спектральному аналізі зображень. Розроблено методику оцінки точності відтворення просторової частоти у процедурі спектрального аналізу цифрових напівтонових зображень, отриманих шляхом сканування. Іл.: 1. Бібліогр.: 23 назв.

**Ключові слова:** метрологічне забезпечення, спектральний аналіз, просторова частота, цифрові напівтонові зображення.

**Постановка проблеми.** Завдяки можливостям сучасних комп'ютерних технологій розширяється спектр завдань, які вирішуються у рамках метрології. Спостерігається загальна тенденція підвищення візуалізації при вирішенні метрологічних задач. Паралельно з цим виникає необхідність відповідної перебудови та удосконалення існуючих алгоритмів обробки даних. Однією з головних цілей виступає необхідність параметризації сигналів та зображень: обґрунтovanий вибір та оцінка кількісних значень саме тих параметрів, які для досліджуваного об'єкту або процесу виступають у якості "паспортних", тобто таких, що забезпечують встановлення специфічних ознак об'єкту вимірювань.

**Аналіз літератури.** Галузі науки, у яких набуло широкого розповсюдження використання у якості вимірюальної інформації зображень, включають фізику, хімію, біологію, медицину. Отримання та подальший аналіз зображень дозволяє використовувати потужний потенціал з метою вилучення великої кількості параметрів або характеристик досліджуваного об'єкту [1].

В багатьох галузях комп'ютерний аналіз зображень виявляється ефективною альтернативою застарілим способам технічної та медичної діагностики, у яких рішення приймалися людиною. При візуальному аналізі людині-експерту необхідно було розв'язувати низку складних завдань, пов'язаних з інтуїтивними та неоднозначними поняттями, наприклад, границя, довжина, орієнтація об'єкту [2].

У роботі [3] підкреслюються переваги застосування візуалізації в метрологічній практиці – це можливість поєднання доступу до кількісної та якісної інформації одночасно, що забезпечує максимально повне

представлення про об'єкт вимірювань. Однак, як зазначає автор цієї статті, на сьогоднішній день відсутні роботи, присвячені професіональним вивченням проблем метрологічного забезпечення у сфері візуалізації та цифрової обробки зображень.

Окремим питанням стоїть обчислення компонентів невизначеності оцінки геометричних розмірів та розрахунок методичних складових невизначеності для широко розповсюджених методів обробки зображень, наприклад, фільтрації. Згідно з даними, наведеними у роботі [4], відносна методична похибка методу низькочастотної фільтрації не перевищує 10%, відносна похибка визначення положення реального максимуму інтенсивності світлової плями – 7%, при використанні методу низькочастотної фільтрації можливо забезпечення виділення фрагментів зображення з відносною методичною похибкою на рівні 6%.

У патенті [5] запропонований спосіб діагностики, заснований на фіксації та співставленні структур газорозрядного випромінювання навколо еталонного та досліджуваного об'єктів в електромагнітному полі. Як підкresлює заявник, новизною розробки є використання небіологічного еталонного об'єкту з метою оцінки метрологічних характеристик приладу. При цьому процедура вимірювання полягає у багаторазовій фіксації структури газорозрядного випромінювання навколо еталонного об'єкту з небіологічного матеріалу. Надалі оцінюється відносне відхилення значень в ряду вимірюваних кількісних геометричних параметрів. Якщо відносне відхилення не перевищує порогу 10%, то результати вважаються задовільними.

Таким чином, наявні окремі результати оцінки метрологічних характеристик при аналізі зображень, але відсутнє формування загального підходу до синтезу метрологічного забезпечення обробки вимірювальної інформації візуального характеру.

**Метою статті** є розробка метрологічного забезпечення спектрального аналізу зображень газорозрядного випромінювання, зокрема дослідження точності відтворення параметру просторова частота при аналогово-цифровому перетворенні зображень.

**Основна частина.** При використанні зображень у якості вимірювальної інформації необхідно оцінити метрологічні характеристики на декількох етапах, зокрема, при отриманні, збереженні, обробці та перетворенні зображень. Безпосередньо сам процес реєстрації зображень вимагає оцінки невизначеності вимірювань, яка на даному етапі обумовлюється роздільною здатністю використаної апаратури. З метрологічної точки зору до необхідної кількості пікселів висувається

вимога, аналогічна умові до кроку дискретизації сигналу: якщо кількості пікселів достатньо, щоб задовільнити критеріям Найквісту, то отримане у результаті аналого-цифрового перетворення зображення вважається задовільним представленням реального об'єкту спостереження [6].

Розглянемо конкретний приклад, який наявно демонструє проблеми синтезу метрологічного забезпечення методу вимірювань, заснованому на реєстрації та аналізі зображень. Метод реєстрації газорозрядного випромінювання об'єктів, що виникає у результаті зовнішнього впливу у вигляді імпульсного електромагнітного поля, знайшов застосування у різних галузях – від медичної діагностики до неруйнівного контролю [7 – 10]. Незважаючи на велику кількість та різноманіття досліджуваних об'єктів при застосуванні методу, його розповсюдження суттєво гальмується відсутністю стандартизованих методик формування та обробки результатів вимірювань у вигляді візуальних даних.

У рамках даної роботи розглядається модифікація методу, що полягає у реєстрації зображень газорозрядного випромінювання на фотоматеріалі в моноімпульсному режимі, з подальшою оцифровкою зображення з використанням сканеру з високою роздільною здатністю. Стандартному аналізу роздільної здатності сканерів та оцінці виникаючих похибок присвячено ряд робіт [12 – 15]. Розглянуті методи розрахунку похибок аналого-цифрового перетворення зображень виявляються корисними у тому разі, коли параметризація вимірювальних даних у вигляді зображень передбачає оцінку геометричних характеристик об'єктів.

У рамках даної роботи спробуємо підійти до синтезу метрологічного забезпечення методів аналізу оцифрованих зображень дещо з іншого боку. Розроблений підхід було обумовлено колом завдань, які вирішувалися методом реєстрації газорозрядного випромінювання крапель рідини з метою дослідження властивостей води та водних розчинів [16 – 20]. Усі методи, запропоновані у вказаних роботах, ґрунтуються на спектральному аналізі зображень.

З точки зору цифрової обробки даних спектральний аналіз може бути застосований як до сигналів, що змінюються у часі, так і до функцій просторових параметрів. У тому випадку, коли ми маємо справу з необхідністю розробки метрологічного забезпечення при аналізі вимірювальної інформації у вигляді зображень, виявляються додаткові проблеми з відсутністю стандартизованих методик вирішення такого класу задач.

Зокрема, фактично усі параметри зображення необхідно розглядати як функції такого параметру як координата. Спроба використання підходів частотного аналізу зображень призводить до необхідності

введення параметру просторова частота. Просторова частота є аналогом частоти при зміні сигналу у часі, але є функцією координати. В оптиці просторова частота використовується для оцінки якості оптичних приладів або систем передачі інформації про об'єкт. Розмірністю просторової частоти є  $\text{м}^{-1}$ . Фізичний сенс параметру "просторова частота" можна пояснити з використанням гармонійної періодичної решітки (рис. 1, a), що аналітично описується наступним чином

$$I(x_\Theta) = A \cos\left(2\pi \frac{x_\Theta - z}{T}\right),$$

де  $x_\Theta$  – просторова координата;  $\Theta$  – кут орієнтації зображення;  $A$  – амплітуда;  $z$  – здиг;  $T$  – період.

Для випадку дифракційної решітки, яка є класичним випадком одновимірного пропускаючого оптичного об'єкту, аналітично функція пропускання описується наступним чином [21]

$$\tau(\xi) = \tau_0 + \tau \cdot \cos \frac{2\pi}{T} \xi,$$

де  $\tau$  – амплітуда зміни пропускання;  $\xi$  – координата у площині об'єкту;  $\tau_0$  – середнє амплітудне пропускання.

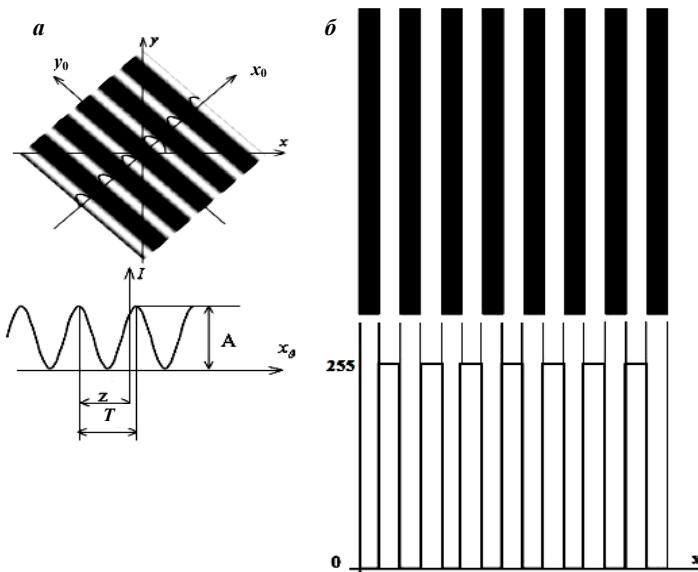
Якщо узагальнити викладені відомості для двовимірного випадку, то об'єкт слід розглядати як результат накладання синусоїдних решіток з довільною орієнтацією.

Розподіл полю  $u(x, y)$  для двовимірного випадку за перерізом світлового пучку можна записати аналітично з використанням Фур'є-образу  $F(f_x, f_y)$  цього розподілу [22]:

$$u(x, y) = \iint F(f_x, f_y) \exp[2\pi i(f_x x + f_y y)] df_x df_y,$$

$$F(f_x, f_y) = \iint u(x, y) \exp[-2\pi i(f_x x + f_y y)] dx dy,$$

де  $f_x$  – просторова частота за віссю абсцис,  $f_y$  – просторова частота за віссю ординат. Оскільки "класичний" спектральний аналіз на базі перетворення Фур'є характеризується низкою обмежень, зокрема "розмазування" спектру за частотною віссю у разі сплесків сигналу, то для аналізу зображень газорозрядного випромінювання було застосовано математичний апарат вейвлет-перетворення [18, 20].

Рис. Періодичні решітки: *a* – гармонійна, *б* – дискретна

**Результати та їх обговорення.** З метою оцінки характеристик точності вимірювань при розробці метрологічного забезпечення аналізу візуальної інформації зазвичай використовують дискретні форми періодичних решіток (рис. *б*). Процедуру оцінки точності процедури аналого-цифрового перетворення з використанням сканеру планшетного типу розглянемо на конкретному прикладі. У якості тестового об'єкту було використано зображення вертикальної та горизонтальної решітки з шагом 1 мм та товщиною чорних смуг 0,1 мм. Для комп'ютерного аналізу розроблено прикладне програмне забезпечення для виводу на екран зображення тест-об'єкту, профілю яскравості пікселів та детектор гармонік.

Визначення гармонійного складу тест-об'єктів здійснювалося на основі аналізу одновимірного сигналу за профілем яскравості пікселів. У даному випадку профіль будувався як центральний перетин зображення в обраному користувачем напрямку.

Сканування здійснювалося при роздільній здатності сканеру 600 dpi, що відповідає величині 600 ліній / 1 дюйм. Відомо, що 1 дюйм = 25,4 мм.

Таким чином, переходячи до мм:  $600/25,4 = 23,6$  ліній/мм, що відповідає просторовій частоті  $f_x = \frac{1}{23,6} = 0,0423728 \text{ мм}^{-1} = 42,3728 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ .

Оскільки для тест-об'єктів шаг сітки дорівнював 1 мм, то обчислене число і є дійсним значенням просторової частоти.

Обчислюємо відхилення значень просторових частот, знайдених експериментальним шляхом, у відносній формі від дійсного значення:

а) для горизонтальних смуг

$$\delta_{\%}^h = \frac{f_x^h - f_0}{f_0} \cdot 100\% = \frac{42,2941 \cdot 10^{-3} - 42,3728 \cdot 10^{-3}}{42,3728 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = -0,18573\%;$$

б) для вертикальних смуг

$$\delta_{\%}^v = \frac{f_x^v - f_0}{f_0} \cdot 100\% = \frac{42,2463 \cdot 10^{-3} - 42,3728 \cdot 10^{-3}}{42,3728 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = -0,29854\%.$$

Можна зробити висновок, про високу точність відтворення параметру "просторова частота". При роздільній здатності сканеру не менш, ніж 600 дрі, невизначеність вимірюваного аналого-цифрового перетворення не перевищує 0,3%.

**Висновки.** На сучасному етапі розвитку інформаційно-вимірювальних технологій візуалізація перетворилася на невід'ємну складову частину метрологічної практики, що забезпечує найбільш повне джерело якісної та кількісної інформації про об'єкт дослідження. Комп'ютеризовані та інтелектуальні засоби вимірювань ґрунтуються на основі візуальної інформації. Актуальною задачею виявляється розробка метрологічного забезпечення методів вимірювань, заснованих на реєстрації та отриманні інформації візуального характеру.

У роботі наведено конкретні приклади застосування параметру "просторова частота" при вилученні вимірювальної інформації з зображень, кількісно оцінено метрологічні характеристики аналого-цифрового перетворення тест-об'єктів з використанням сканеру. Встановлено, що точність відтворення та визначення просторової частоти цифрових зображень з використанням детектору гармонік достатньо висока.

**Список літератури:** 1. Mora-González M. Image Processing for Optical Metrology / M. Mora-González, J. Muñoz-Maciel, F.J. Casillas, F.G. Peña-Lecona, R. Chiu-Zarate. – Rijeka, Croatia, 2011. – 564 p. 2. Никитаев В.Г. Автоматизированные системы обработки изображений для металлографического контроля компонентов тзвэлов ядерных реакторов: автореф. дисс. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 01.04.01 / В.Г. Никитаев. – М., 1999. –

- 48 с. **3.** Кондратов В.Т. Визуализация в метрологии: уровни, направления, цели, задачи, методы и программное обеспечение / В.Т. Кондратов // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 1. – С. 7-21. **4.** Білинський Й.Й. Методи обробки зображень в комп'ютеризованих оптико-електронних системах / Й.Й. Білинський. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – 272 с. **5.** Патент на изобретение 2377951 России МПК A 61 В 5/05. Способ определения состояния биологического объекта и устройство для его реализации / К.Г. Коротков, Р.Р. Юсубов. – Заявл. 04.01.2008. Опубл. 10.01.2010. – Бюл. № 1. **6.** Oppenheim A.V. Signals and Systems, 2nd ed. / A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, S.H. Nawab. – New Jersey, USA: Prentice Hall Inc. –1997. – 582 р. **7.** Коротков К.Г. Основы ГРВ биоэлектрофографии / К.Г. Коротков. – СПб.: СПбГИТМО (ТУ), 2001. – 360 с. **8.** Романий С.Ф. Неразрушающий контроль материалов по методу Кирлиана / С.Ф. Романий, З.Д. Черный. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. – 144 с. **9.** Ignatov I. Origin of Life and Living Matter in Hot Mineral Water / I. Ignatov, O.V. Mosin // Advances in Physics Theories and Applications. – 2015. – Vol. 39. – P. 1-22. **10.** Skarja M. Indirect instrumental detection of ultraweak, presumably electromagnetic radiation from organism / M. Skarja, M. Berden, I. Jerman // Electro and Magnitobiology. – 1997. – Vol. 16. – № 3. – P. 249-258. **11.** Бондарев В. Кирlian-фотография цифровая и традиционная. Некоторые специфические моменты [Электронный ресурс] / В. Бондарев. Режим доступа: <http://www.vadimbo.narod.ru/GDV.htm>. **12.** Атавин Е.Г. Анализ метрологических характеристик сканера / Е.Г. Атавин // Вестник Омского ун-та, 2002. – № 2. – С. 35-40. **13.** Дамдинова Т.Ц. Способы формирования цифровых изображений и анализ их погрешностей / Т.Ц. Дамдинова // Вопросы кибербезопасности. – 2014. – № 5 (8). – С. 43-46. **14.** Polo M. Estimating the Uncertainty of Terrestrial Laser Scanner Measurements / M. Polo, A.M. Felicisim, A.G. Villanueva, J. Martinez-del-Pozo // Geoscience and Remote Sensing, 2014. – № 50. – Issue 11. – P. 4804-4808. **15.** J. de Vicente. Uncertainty in ellipse fitting using a flatbed scanner: development and experimental verification / J. de Vicente, A.M. Sánchez-Perez, M. Berzal, P. Maresca, E. Gómez // Measurement Science and Technology. – 2013. – Vol. 25. – № 1. – P. 79-85. **16.** Глухова Н.В. Автоматизация обработки изображений излучения жидкофазных объектов с использованием методологии фликкер-шумовой спектроскопии / Н.В. Глухова, В.И. Корсун, Л.А. Песоцкая // Метрология та прилади. – 2013. – № 2 (40). – С. 59-63. **17.** Глухова Н.В. Розробка методу експрес-оцінки біологічних властивостей води / Н.В. Глухова // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2014. – № 6/5 (72). – С. 18-25. **18.** Глухова Н.В. Методи реєстрації та вейвлет-аналізу зображень газорозрядного випромінювання / Н.В. Глухова, Л.А. Пісоцька // Системи обробки інформації. – 2015. – № 1 (26). – С. 16-19. **19.** Глухова Н.В. Метод визначення ступеня когерентності води з використанням методології фліккер-шумової спектроскопії / Н.В. Глухова, Л.А. Песоцкая // Системи обробки інформації. – 2015. – № 5 (130). – С. 167-171. **20.** Глухова Н.В. Применение вейвлет-пакетов для обработки изображений газоразрядного излучения / Н.В. Глухова // International Scientific and Practical Conference World Science: Modern Scinetific Achievements and Their Practical Application. – Issue N. 2. – UAE. – Dubai. – 20-22 october 2014. – P. 21-24. **21.** Энциклопедия физики и техники. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/3141.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/3141.html). **22.** Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – М.: Мир, 1976. – 509 с.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Mora-González M. Image Processing for Optical Metrology / M. Mora-González, J. Muñoz-Macié, F. J. Casillas, F.G. Peña-Lecona, R. Chiu-Zarate. – Rijeka, Croatia, 2011. – 564 p. **2.** Nikitaev V.G. Avtomatizirovannye sistemy obrabotki izobrazhenij dlja metallograficheskogo kontrolja komponentov tvjelov jadernyh reaktorov: avtoref. diss. na soiskanie nauchn. stepeni dokt. tehn. nauk: spec. 01.04.01 / V.G. Nikitaev. – M.: 1999. – 48 p. **3.** Kondratov V.T. Vizualizacija v metrologii: urovnji, napravlenija, celi, zadachi, metody i programmnoe obespechenie / V.T. Kondratov // Vimirjuval'na ta obchisljuval'na tehnika v tehnologichnih procesah. – 2011. – № 1.– P. 7-21. **4.** Bilins'kij J.J. Metody obrobki zobrazhen' v

komp'juterizovanih optiko-elektronnih sistemah / *J.J. Bilins'kij*. – Vinnicja: VNTU, 2010. – 272 p.

**5.** Patent na izobretenie 2377951 Rosii MPK A 61 V 5/05. Sposob opredelenija sostojanija biologicheskogo ob"ekta i ustroystvo dlja ego realizacii / *K.G. Korotkov, R.R. Jusubov*. – Zajavl. 04.01.2008. Opubl. 10.01.2010. – Bjul. No 1.

**6.** *Oppenheim A.V.* Signals and Systems, 2nd ed. / *A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, S.H. Nawab* – New Jersey, USA: Prentice Hall Inc., 1997, 582 p.

**7.** *Korotkov K.G.* Osnovy GRV bioelektrografii / *K.G. Korotkov*. – SPb.: SPbGITMO (TU), 2001. – 360 p.

**8.** *Romanij S.F.* Nerazrushajushhij kontrol' materialov po metodu Kirliana / *S.F. Romanij, Z.D. Chernyj*. – Dnepropetrovsk: izd-vo DGU, 1991. – 144 p.

**9.** *Ignatov I.* Origin of Life and Living Matter in Hot Mineral Water / *I. Ignatov, O.V. Mosin* // Advances in Physics Theories and Applications, 2015. – Vol. 39. – P. 1-22.

**10.** *Skarja M.* Indirect instrumental detection of ultraweak, presumably electromagnetic radiation from organism / *M. Skarja, M. Berden, I. Jerman* // Electro and Magnitobiology, 1997. – Vol. 16. – №. 3. – P. 249-258.

**11.** *Bondarev V.* Kirlian-fotografija cifrovaja i tradicionnaja. Nekotorye specificheskie momenty / *V. Bondarev*. Available at: <http://www.vadimbo.narod.ru/GDV.htm>.

**12.** *Atavin E.G.* Analiz metrologicheskikh harakteristik skanera / *E.G. Atavin* // Vestnik Omskogo un-ta, 2002. – № 2. – P. 35-40.

**13.** *Damdinova T.C.* Sposoby formirovaniya cifrovyh izobrazhenij i analiz ih pogreshnostej / *T.C. Damdinova* // Voprosy kiberbezopasnosti, 2014. – № 5 (8). – P. 43-46.

**14.** *Polo M.* Estimating the Uncertainty of Terrestrial Laser Scanner Measurements / *M. Polo, A.M. Felicisim, A.G. Villanueva, J. Martinez-del-Pozo* // Geoscience and Remote Sensing, 2014. – № 50. – Issue 11. – P. 4804-4808.

**15.** *J. de Vicente.* Uncertainty in ellipse fitting using a flatbed scanner: development and experimental verification / *J. de Vicente, A. M. Sánchez-Perez, M. Berzal, P. Maresca, E. Gómez* // Measurement Science and Technology, 2013. – Vol. 25. – № .1. – P. 79-85.

**16.** *Glukhova N.V.* Avtomatizacija obrabotki izobrazhenij izlucheniya zhidkofaznyh ob"ektov s ispol'zovaniem metodologii flikker-shumovoj spektroskopii / *N.V. Glukhova, V.I. Korsun, L.A. Pesockaja* // Metrologija ta prylady. – № 2 (40). – 2013. – P. 59-63.

**17.** *Glukhova N.V.* Rozrobka metodu ekspres-očinky biologichnyh vlastivostej vody / *N.V. Glukhova* // Shidno-evropejs'kij zhurnal peredovyh tehnologij. – № 6/5 (72). – 2014. – P. 18-25.

**18.** *Glukhova N.V.* Metody reyestraciyi ta vejvlet-analizu zobrazenij" hazorozryadnogo vypryminyuvannya / *N.V. Glukhova, L.A. Pesockaja* // Systemy obrobky informaciyi. – № 1 (126). – 2015. – P. 16-19.

**19.** *Glukhova N.V.* Metod vyznachennya stupenya koherentnosti vody z vykorystanniam metodolohiyi flikker-shumovoyi spektroskopiyi / *N.V. Glukhova, L.A. Pesockaya* // Systemy obrobky informaciyi. – № 5 (130). – 2015. – P. 167-171.

**20.** *Glukhova N.V.* Primenenie vejvlet-paketov dlja obrabotki izobrazhenij gazorazrjadnogo izlucheniya / *N.V. Glukhova* // International Scientific and Practical Conference World Science: Modern Scinetific Achievements and Their Practical Application. – 2014. – Issue 2. – UAE. – P. 21-24.

**21.** *Jenciklopedija fiziki i tehniki.* Available at: [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/3141.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/3141.html).

**22.** *Duda R.* Raspoznavanie obrazov i analiz scen / *R. Duda, P. Hart*. – M.: MIR, 1976. – 509 p.

Надійшла (received) 30.06.2015

*Статтю представив д-р техн. наук, проф. ДВНЗ "НГУ" Корсун В.І.*

Glukhova Natalia, PhD Tech.

State Higher Educational Institution "National Mining University"

Str. K. Marx 19, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49027

tel./phone: (068) 409-32-08, e-mail: [GInaVi@ukr.net](mailto:GInaVi@ukr.net)

ORCID 0000-0003-0817-5465

**УДК 656.7.022**

**В.О. ГРИГОРЕЦЬКИЙ**, канд. техн. наук, проф., ХУПС, Харків,

**В.М. НЕДІЛЬКО**, канд. техн. наук, доц., зав.каф., КЛА НАУ,

Кіровоград,

**А.С. ПАЛЬОНІЙ**, преп. кафедри ОПР, КЛА НАУ, Кіровоград

## **МОДЕЛІ ОЦІНКИ ДІЯЛЬНОСТІ АВІАДІСПЕТЧЕРІВ В РЕАГУВАННІ НА ПРОБЛЕМНІ СИТУАЦІЇ НА ДІСПЕТЧЕРСЬКИХ ТРЕНАЖЕРАХ**

Розглянуто принципи побудови моделей оцінки дій авіадіспетчерів, що базуються на причинно-наслідковій моделі ризику для повітряного транспорту. Подано класифікацію типових помилок та приклади застосування дерев помилок авіадіспетчерів за критеріями безпомилковості і своєчасності реагування на проблемні (конфліктні) ситуації. Іл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

**Ключові слова:** авіадіспетчер, моделі оцінки дій авіадіспетчерів, причинно-наслідкова модель ризику, повітряний транспорт, тренажер.

**Постановка проблеми.** Однією з найважливіших задач при проведенні підготовки на тренажерах управління повітряним рухом (УПР) є отримання об'єктивних результатів навчання авіадіспетчерів. Існуюча система оцінювання дій авіадіспетчерів базується на суб'єктивних висновках інструкторів, що залежать від рівня їх професіоналізму, досвіду, моральних якостей та психофізіологічних особливостей. Такий підхід не дозволяє отримувати достатньо об'єктивні показники діяльності авіадіспетчерів у кількісно-якісному їх поданні та враховувати їх індивідуальні особливості з метою забезпечення відповідності навчального впливу рівню підготовки та індивідуально-психологічним особливостям окремо взятого авіадіспетчера. Застосування автоматизованих засобів реєстрації, аналізу та оцінки дій авіадіспетчерів на тренажерах УПР та їх комплексна реалізація в якості системи підтримки прийняття рішення (СППР) для інструктора тренажеру, дозволила б позбавити сучасну методику оцінювання знань, вмінь та навичок (ЗВН) авіадіспетчерів від вищезазначених недоліків. Завданням діагностики рівня ЗВН авіадіспетчера є не стільки встановлення того, що він знає і вміє, а саме того, що він не знає/не вміє. Діагностика проводиться з метою керування тренувальним процесом (його корекції), тому є необхідним визначати помилки, похибки і негативні індивідуальні тенденції в роботі авіадіспетчерів на тренажері

управління повітряним рухом.

**Аналіз літератури.** Оцінці впливу людського фактору на надійність (HRA – Human Reliability Assessment) приділялося багато уваги в 70-80-х рр., особливо в атомній промисловості, і саме тоді з'явилася велика кількість різних методів HRA [1 – 8]. Більшість з цих методів не призначаються саме для моделювання діяльності та помилок операторів з УПР та не дозволяють адекватно ідентифікувати помилки, що виникають під час УПР або є занадто загальними для їх практичного застосування (Stager & Hameluck, Rouse & Rouse, Rasmussen, Reason, Embrey, Norman, Jones & Endsley, Williams & Munley та ін.). У вітчизняній науці питання професійного відбору, моделювання задач і автоматизації оцінки дій авіадиспетчерів розглядалися В.М. Затонським, Г.А. Крижановським, С.М. Неділько, М.М Сухих, В.П. Харченко та іншими.

Запропонований Євроконтролем новий HRA-підхід включає в себе застосування набору взаємопов'язаних моделей, за допомогою яких можливо ідентифікувати і класифікувати помилки, що припускають авіадиспетчери: 1) когнітивні моделі, які описують те, як увага оператора розподіляється (протікає) між різними діями; 2) моделі запису (відстеження, реєстрації) подій для "схоплювання" помилок на рівні дій; 3) темпоральна логіка для вираження поводжень, що становлять помилки на рівні задачі. Ключовою моделлю для ідентифікації та класифікації помилок у даному підході виступає модель вибору оператора (OCM – Operator Choice Model). OCM послідовно описує, які певні події можуть мати місце протягом реалізації вправи на тренажері. Ця модель охоплює обидва рішення: правильні і неправильні для реєстрації того, як помилки виникають, поширюються і корегуються протягом запуску вправи на тренажері УПР. Також існує підхід, призначений саме для автоматизованої оцінки дій авіадиспетчерів, що базується на "*еталонній*" моделі діяльності авіадиспетчера – профільній моделі, у якій закладені "*еталонні*" значення параметрів виконання технологічних операцій та процедур. Висновок відносно правильності дій авіадиспетчера робиться на підставі зіставлення індивідуальної моделі діяльності авіадиспетчера з "*еталонною*" моделлю. Виявлення відмінностей у фактичних та "*еталонних*" значеннях показників критеріїв діагностики у виконанні окремих технологічних операцій і процедур дозволяє діагностувати помилки у діях авіадиспетчера за частковими критеріями безпомилковості, послідовності, точності, швидкодії та своєчасності [3].

Розглянуті вище підходи, або не передбачають їх застосування в області автоматизованого аналізу і оцінки дій авіадиспетчерів, або є

занадто загальними і не достатньо розроблені на рівні моделей та алгоритмів для реалізації відповідних оцінюючих програм.

**Мета статті** – розробка моделей ідентифікації помилок авіадиспетчерів за критеріями безпомилковості і своєчасності реагування на конфліктні ситуації у повітряному русі.

**Моделі аналізу дій авіадиспетчерів.** Побудова моделей аналізу і оцінки дій авіадиспетчерів базується на загальній причинно-наслідковій моделі ризику. Її застосування дозволяє визначати причинно-наслідкові зв'язки між помилкою або ланцюжком помилок, припущеннях авіадиспетчером під час УПР і авіаційною подією. З цією метою в наших моделях застосовуються два підходи до моделювання: побудова діаграм послідовності подій (ДПП) і дерев помилок [3]. ДПП представляють собою різні сценарії авіаційних подій на найзагальнішому рівні моделей, у той час як дерева помилок, посилаючись на базові помилки диспетчера, конкретизують умови та обставини їх припущення (рис. 1).

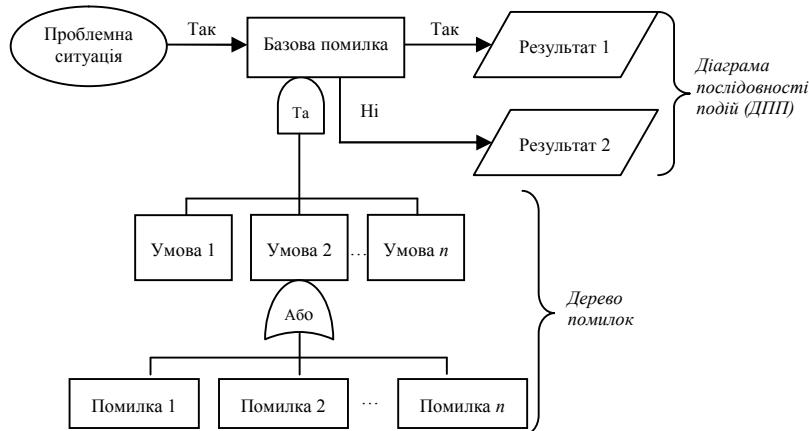


Рис. 1. Загальний підхід до побудови моделей помилок

Моделювання аналізу дій авіадиспетчерів з виявлення небезпечних ситуацій з повітряними суднами (ПС) здійснюється на прикладі аналізу помилок авіадиспетчерів районного диспетчерського центру з виявлення потенційно-конфліктних ситуацій (ПКС) та конфліктних ситуацій (КС) з ПС. Цей приклад є показовим тим, що дозволяє розглянути розвиток проблемної ситуації покроково (послідовно в рамках різних "буферів безпеки", які створюються сучасними наземними і бортовими засобами автоматизації – функцією середньострокового виявлення конфлікту

(MTCD – Medium-Term Conflict Detection), функцією короткострокового попередження про конфліктну ситуацію (STCA – Short-term conflict alert) та бортовою системою попередження зіткнень ПС у повітрі (TCAS – Traffic alert and Collision Avoidance System).

Від того, наскільки правильно і своєчасно авіадиспетчер ідентифікував проблемну ситуацію за участю двох і більше ПС, залежатиме оптимальність прийнятого ним рішення і ефективність його реалізації в обмежених часових рамках. У зв'язку з цим, одними з найважливіших критеріїв оцінки діяльності авіадиспетчера є критерій *правильності* реагування на проблемну ситуацію та критерій *своєчасності* дій у відповідь на неї.

За кожним з цих критеріїв оцінки були побудовані діаграми послідовності подій з визначенням базових помилок відповідного класу та їх можливих наслідків.

В основі дерев помилок лежить ряд базових подій, спільне виконання яких дозволяє ідентифікувати типові помилки авіадиспетчера за відповідним критерієм оцінки [4]. Такими базовими подіями можуть бути:

- 1) помилки авіадиспетчера на рівні виконання ним окремих дій в рамках критерію оцінки, що моделюється за допомогою дерев помилок: "диспетчер не надав вказівки для забезпечення (відновлення) ешелонування", "диспетчер надав вказівку для забезпечення ешелонування несвоєчасно" і т.п.;
- 2) зовнішні події або ситуації: "два ПС знаходяться на конфліктних курсах", "диспетчуру надано сповіщення STCA", "спрацювала TCAS RA на борту (рекомендація з вирішення загрози зіткнення ПС)" і т.п.

Загалом дерева помилок охоплюють собою дві групи помилок: помилки виконання/невиконання необхідних дій у певній проблемній ситуації та помилки виконання непотрібних (зайвих) дій. Окрім того, на практиці, для визначення причин помилок, необхідно враховувати різноманітні програмні (технічні) збої (відмови) у роботі систем спостереження УПР, зв'язку, збій MTCD, STCA тощо.

Аналіз діяльності авіадиспетчера за критерієм *безпомилковості* виявлення проблемної ситуації базується на перевірці відповідності реакції авіадиспетчера наявних умов повітряної і метеорологічної обстановки з урахуванням тенденції їх розвитку. Таким чином, за даним критерієм оцінюється адекватність виконання авіадиспетчером певних дій по відношенню до дійсно існуючої проблемної ситуації або їх невиконання за відсутності проблеми.

До типових помилок авіадиспетчера за критерієм безпомилковості розпізнання проблем у повітряному русі (конфліктів) можна віднести наступні:

- 1) не виявив наявність простого (дуельного) конфлікту за участю пари ПС – не вжив заходів щодо забезпечення ешелонування ПС взагалі (до моменту отримання пілотом сповіщення TCAS RA) (рис. 2);
- 2) не розпізнав комплексну конфліктну ситуацію за участю більш ніж двох ПС;
- 3) розпізнав поточний конфлікт як простий, надавши вказівку для забезпечення інтервалів між парою ПС, у той час як мала місце комплексна конфліктна ситуація;
- 4) не відреагував на "вторинний" (незапланований) конфлікт, який був створений самим диспетчером внаслідок рішення поточного конфлікту;
- 5) визначив неконфліктну пару ПС як конфліктну у відсутності спрацювання STCA;
- 6) не виявив відсутність ПКС/КС у випадку хибного спрацювання функції STCA.

Умовою спрацювання TCAS RA є поєднання двох критеріїв, а саме:

- 1) знаходження конфліктуючих ПС в області з меншими інтервалами висот, ніж 700 ф. (213 м) при польотах ПС вище 300 ф. (91 м) на малих висотах ( $\Delta H_{RA}$ );
- 2) перетин конфліктуючих ПС визначеного часового порогу  $t_{RA} = 35$  сек. (область усунення конфліктної ситуації) для польоту вище ешелону 200.

У запобігні можливих зіткнень важливий час польоту до точки максимального зближення (Closest Point of Approach) –  $t_{CPA}$ , а не відстань до цієї точки.

На рис. 2 наведений приклад (фрагмент) дерев помилок авіадиспетчера з не виявлення конфлікту, на якому позначені параметри ідентифікації помилок відповідного типу, де  $\Delta H_c$  – інтервал висот між ПС під час існування конфлікту;  $t_{com}$  – час надання авіадиспетчером вказівки пілоту ПС щодо забезпечення (відновлення) інтервалів ешелонування між ПС. Помилка 1.1\* відповідає ситуації, коли авіадиспетчер надав вказівку для ешелонування після TCAS RA, що рівнозначно, з позиції наслідків, її відсутності взагалі. А головне, така реакція диспетчера свідчить про те, що він не був здатен самостійно визначити конфлікту ситуацію у конкретній обстановці. Analogічним

чином були побудовані дерева помилок за кожними класом помилки згідно вище наведеного переліку. Okрім того, за цим критерієм, розроблені дерева помилок, за якими визначаються контекст та обставини припущення помилок відповідного класу.

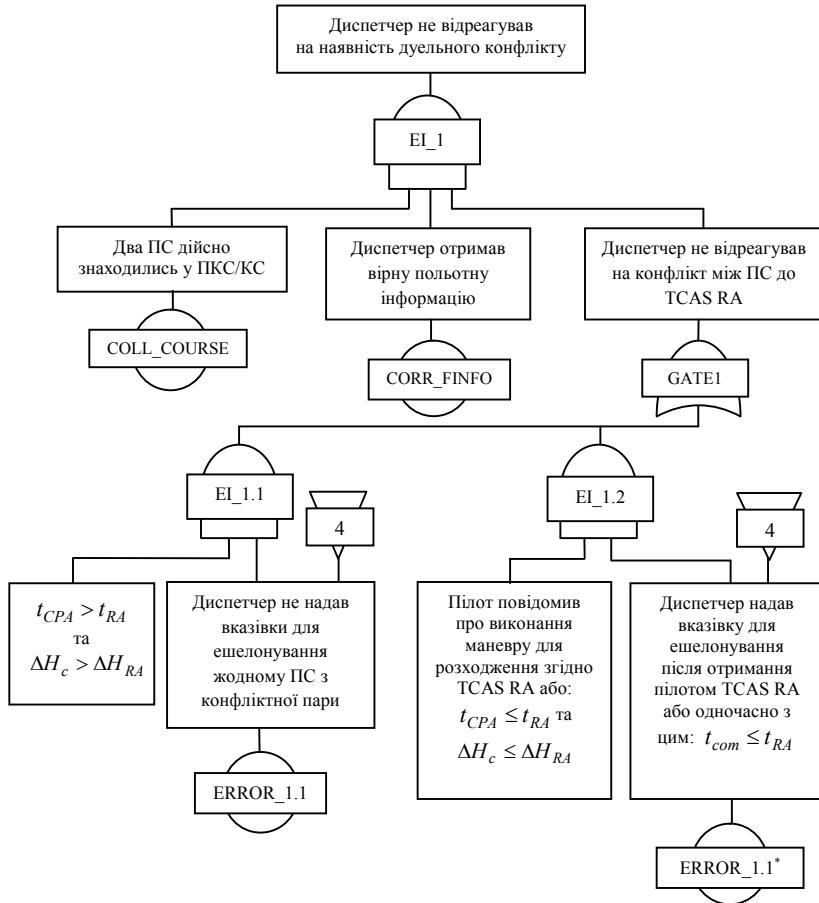


Рис. 2. Дерево помилок авіадиспетчера при виявленні дуельного конфлікту

В результаті аналізу дій авіадиспетчера за критерієм безпомилковості виявлення проблемної ситуації, формуються функцій

часткових критеріїв оцінки  $F(CI_{kN}^p)$ , що характеризують кількісні показники адекватності виконання дій авіадиспетчером за  $k$ -ю процедурою з вирішення  $p$ -ї проблемної ситуації (конфлікту). При невиконанні дій щодо дійсно існуючої проблемної ситуації або при виконанні дій щодо неіснуючої проблемної ситуації  $F(CI_{kN}^p) = CI_{kN}^{p(F)} = 1$  (важливість цих помилок диференційована і враховується у інтегральних коефіцієнтах важливості відповідних помилок); при виконанні дій щодо дійсно існуючої проблемної ситуації  $F(CI_{kN}^p) = CI_{kN}^{p(T)} = 0$ .

Кількісний показник за частковим критерієм безпомилковості виявлення  $p$ -ї проблемної ситуації (конфлікту)  $CI_{kN}^p$  визначається за формулою

$$CI_{kN}^p = 1 - CI_{kN}^{p(F)} \cdot r_j^{CI} \cdot f(h_s), \quad (1)$$

де  $CI_{kN}^p$  – значення кількісного показника за критерієм безпомилковості виявлення проблемної ситуації, що відповідає помилковій реакції з боку диспетчера, тобто  $F(CI_{kN}^p) = 1$ ;  $r_j^{CI}$  – інтегральний коефіцієнт важливості  $j$ -ї помилки за критерієм безпомилковості виявлення проблемної ситуації ( $0 \leq r_j^{CI} \leq 1$ );  $h_s$  – змінна, що визначає статус ПС, які приймали участь у конфлікті ( $h_s = 1,2$  для ПС в аварійному стані;  $h_s = 1,1$  для ПС, що виконували політ як літерний рейс;  $h_s = 1,0$  для ПС без особливого статусу).

Визначення інтегрального вагового коефіцієнту важливості помилки  $r_j^{CI}$  за критерієм безпомилковості виявлення проблемної ситуації здійснюється за формулою:

$$r_j^{CI} = \sum_{i=1}^n w_i^{CI} k_{ij}^{ct}, \quad (2)$$

де  $w_i^{CI}$  – коефіцієнт відносної важливості помилок  $i$ -го класу за критерієм безпомилковості виявлення проблемної ситуації;  $k_{ij}^{ct}$  – вага  $j$ -ї типової помилки в реагуванні на проблемну ситуацію (ПКС) диспетчером за контекстом її припущення.

Аналіз *своєчасності* реакції авіадиспетчера на проблемну ситуацію у повітряному русі здійснюється шляхом перевірки витримування ним вимог щодо виконання дій у відповідь на появу проблемної ситуації в межах проміжку часу, що є в нього на прийняття рішення. При оцінці

своєчасності дій диспетчерів УПР в контексті конфліктних ситуацій і запобіганню зіткненням між ПС, розглядаються часові інтервали, на протязі яких спостерігаються певні типові події: спрацювання функції MTCD, STCA, TCAS.

В рамках критерію своєчасності розглядаються *тактичні* помилки авіадиспетчера в реагуванні на наявність ПКС/КС та небезпечних зближень (НЗ) ПС. Фіксація помилок у несвоєчасному реагуванні на проблему у повітряному русі за ступенем *небезпечності* передбачає визначення етапу їх припущення у часовому вимірі з розвитком проблемної ситуації; ідентифікація помилок *за типом* визначає обставини та контекст, за якими авіадиспетчером були припущені помилки у виявленні ПКС/КС.

Визначення ступеню серйозності (небезпечності) ПКС/КС здійснюється за нормативами Євроконтролю, що базуються на максимальному коефіцієнті пропорційності горизонтальних та вертикальних дистанцій між ПС [9].

Помилки за ступенем небезпечності враховують шість фаз розвитку ПКС, які розподіляються на три групи, а саме: відсутність реакції з боку диспетчера районного диспетчерського центру (РДЦ) на наявність ПКС до спрацювання функції STCA, відсутність реакції з боку диспетчера РДЦ на наявність ПКС/КС після спрацювання функції STCA та відсутність реакції (запізнена реакція) з боку диспетчера РДЦ на наявність конфлікту при небезпечному зближенні ПС (до TCAS RA).

Крім того, складений докладний перелік типових помилок авіадиспетчера у несвоєчасному виявленні ПКС, які враховують обставини та причини виникнення проблемної ситуації, а також взаємне розташування ПС у повітряному просторі під час існування конфлікту.

За кожним класом і типом помилок були визначені кількісні значення коефіцієнтів, що характеризують ступінь небезпечності помилок та коефіцієнти відносної важливості типових помилок відповідно. На їх підставі розраховані інтегральні вагові коефіцієнти важливості помилки за критерієм своєчасності реагування. Такий комплексний підхід дозволяє врахувати при оцінці рівень та характер загроз, викликаних несвоєчасними діями авіадиспетчера, що визначаються, *по-перше*, етапом розвитку проблемної ситуації, *по-друге*, контекстом, у якому відбулася подія. Коефіцієнти важливості помилок були отримані шляхом експертного опитування інструкторського складу ТЦ ОПР Кіровоградської льотної академії Національного авіаційного університету з застосуванням методу попарних порівнянь.

**Висновки.** Застосування наведених моделей оцінки дій авіадиспетчерів базується на виявленні відповідності між фактичною дією та помилковою реакцією авіадиспетчера, що є у складі моделі помилок. При виявленні такої відповідності за кожним критерієм оцінки фіксується припущення авіадиспетчером певного типу помилок на кожному з етапів автоматизованого аналізу. Кожен з цих етапів застосовує сукупність таких критеріїв оцінки, результат оцінки за якими обумовлює можливість або доцільність проведення оцінки за іншими критеріями нижчого рівня оцінки. Ієрархічна та послідовна взаємозалежність критеріїв один від одного та їх тісна взаємодія у процесі оцінки, робить доцільним реалізацію комплексної автоматизованої оцінки на базі *мультиагентного підходу* [10, 11].

**Список літератури:** 1. Isaac A. Technical Review of Human Performance Models and Taxonomies of Human Error in ATM (HERA) / A. Isaac, S.T. Shorrock, R. Kennedy, B. Kirwan, H. Anderson, T. Bove. – EUROCONTROL EATMP Report HRS/HSP-002-REP-03 Edition 1. Brussels: EUROCONTROL. 26 April 2002. – 134 p. 2. Kirwan B. Technical Basis for a Human Reliability Assessment Capability for Air Traffic Safety Management / B. Kirwan. – Brussels: Eurocontrol, 2007. – 51 p. 3. Чинченко Ю.В. Подходы к автоматизации процесса управления уровнем готовности авиадиспетчеров к действиям в кризисных ситуациях / Ю.В. Чинченко. – Наукові праці академії, вип. 7, частина 1. – Кіровоград: Вид-во ДЛАУ. – 2003. – С. 132-138. 4. Roelen A. A generic air traffic controller performance model for application in a causal model of air transport / A. Roelen, GB van Baren, PH Lin, O. Morales-Napoles, D. Kurowicka, R. Cooke. – NLR-CR-2007-593. Amsterdam: Nationaal Luchten Ruimtevaartlaboratorium (NLR), 2008. – 62 p. 5. Episode 3 – SESAR Top-Down Systemic Risk Assessment – D2.4.3-02-240, EUROCONTROL Experimental Centre, 2009. – 240 p. 6. Safety and Performance Requirements, PASS/WA5/WP2/168/W, Version 1.1, 26-10-2010. – 53 p. 7. Driscoll K. Data Network Evaluation Criteria Report / K. Driscoll, B. Hall, P. Koopman, J. Ray, M. DeWalt. – DOT/FAA/AR-09/27, FAA, July 2009 – 103 p. 8. Harkleroad E. Risk-based Modeling to Support NextGen Concept Assessment and Validation / E. Harkleroad, A. Vela, J. Kuchar, B. Barnett, R. Merchant-Bennett. – Project Report ATC-405, MIT Lincoln Laboratory, Lexington, MA, 2013. – 59 p. 9. Model-based performance evaluation of STCA operations – Interim report (Phase 2) – PASS/WA2/WP9/137/D, version 1.1, February 2010. – 79 p. 10. Неделько С.Н. Розробка системи критеріїв оцінки для автоматизованого аналіза дійствий авіадиспетчерів на тренажерах обслуговування воздушного двіження / С.Н. Неделько, В.А. Григорецький, А.С. Палєнний. – Наукові праці академії. – Вип. 5. – Част. 1. – Кіровоград: Вид-во ДЛАУ. – 2005. – С. 260-266. 11. Палєнний А.С. Применение мультиагентного подхода для реализации автоматизированного анализа дійствий авіадиспетчеров на комплексных тренажерах обслуговування воздушного двіження / А.С. Палєнний. – Наукові праці академії. – Вип. 7. – Част. 1. – Кіровоград: Вид-во ДЛАУ. – 2007. – С. 145-156.

**Bibliography (transliterated):** 1. Isaac A. Technical Review of Human Performance Models and Taxonomies of Human Error in ATM (HERA) / A. Isaac, S.T. Shorrock, R. Kennedy, B. Kirwan, H. Anderson, T. Bove. – EUROCONTROL EATMP Report HRS/HSP-002-REP-03 Edition 1. Brussels: EUROCONTROL. 26 April 2002. – 134 p. 2. Kirwan B. Technical Basis for a Human Reliability Assessment Capability for Air Traffic Safety Management / B. Kirwan. – Brussels: Eurocontrol, 2007. – 51 p. 3. Chinchenko Yu.V. Podkhody k avtomatizatsii protsessa upravleniya urovнем gotovnosti aviadispetcherov k deystviyam v krizisnykh situatsiyakh / Yu.V. Chinchenko. – Naukovi praci akademiji. – Vyp. 7. – Chast. 1. – Kirovoghrad: Vyd-vo DLAU. – 2003. – P. 132-

138. **4.** *Roelen A.* A generic air traffic controller performance model for application in a causal model of air transport / *A. Roelen, GB van Baren, PH Lin, O. Morales-Napoles, D. Kurowicka, R. Cooke.* – NLR-CR-2007-593. Amsterdam: Nationaal Luchten Ruimtevaartlaboratorium (NLR), 2008. – 62 p. **5.** Episode 3 – SESAR Top-Down Systemic Risk Assessment – D2.4.3-02-240, EUROCONTROL Experimental Centre, 2009. – 240 p. **6.** Safety and Performance Requirements, PASS/WA5/WP2/168/W, Version 1.1, 26-10-2010. – 53 p. **7.** *Driscoll K.* Data Network Evaluation Criteria Report / *K. Driscoll, B. Hall, P. Koopman, J. Ray, M. DeWalt.* – DOT/FAA/AR-09/27, FAA, 2009 – 103 p. **8.** *Harkleroad, E.* Risk-based Modeling to Support NextGen Concept Assessment and Validation / *E. Harkleroad, A. Vela, J. Kuchar, B. Barnett, R. Merchant-Bennett.* – Project Report ATC-405, MIT Lincoln Laboratory, Lexington, MA, 2013. – 59 p. **9.** Model-based performance evaluation of STCA operations – Interim report (Phase 2) – PASS/WA2/WP9/137/D, version 1.1, 2010. – 79 p. **10.** *Nedelko S.N.* Razrabotka sistemy kriteriev otsenki dlya avtomatizirovannogo analiza deystviy aviadispetcherov na trenazherakh obsluzhivaniya vozduzhnogo dvizheniya / *S.N. Nedelko, V.A. Grigoretskiy, A.S. Palenny.* – Naukovi praci akademijji. – Vyp. 5. – Chast. 1. – Kirovograd: Vyd-vo DLAU. – 2005. – P. 260-266. **11.** *Palenny A.S.* Primenenie multiagentnogo podkhoda dlya realizatsii avtomatizirovannogo analiza deystviy aviadispetcherov na kompleksnykh trenazherakh obsluzhivaniya vozduzhnogo dvizheniya / *A.S. Palenny.* – Naukovi praci akademijji. – Vyp. 7. – Chast. 1. – Kirovograd: Vyd-vo DLAU. – 2007. – P. 145-156.

*Надійшла (received) 06.11.2015*

*Статтю представив д-р техн. наук, проф. ХУПС Кучук Г.А.*

Grigorezky Vladimir, Dr.Sci.Tech, Professor  
Kharkiv University of Air Force  
Str. Sumskay, 77/79, Kharkov, Ukraine, 61023  
tel./phone: +38 050 3233021, e-mail: hups1954@ukr.net  
ORCID ID: 0000-0003-4451-83X8

Nedelko Vitaliy, PhD in Engineering sciences, Assistant Professor  
Kirovohrad Flight Academy of National Aviation University  
Str. Dobrovolsky, 1, Kirovohrad, Ukraine, 25005  
tel./phone: (0522) 39-47-25, e-mail: nvn60@ukr.net  
ORCID ID: 0000-0006-4561-8368-83X8

Palenny Andrey, lecturer  
Kirovohrad Flight Academy of National Aviation University  
Str. Dobrovolsky, 1, Kirovohrad, Ukraine, 25005  
tel./phone: +38 050 5256368, e-mail: andreypalen@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0003-4451-83X8

УДК 004.032.26

**Ю.Л. ДИКОВА**, асп., ГВУЗ "ДонНТУ", Красноармейск,  
**Е.Е. ФЕДОРОВ**, д-р техн. наук, доцент, ГВУЗ "ДонНТУ",  
Красноармейск,  
**Д.Е. ИВАНОВ**, д-р техн. наук, доц., с.н.с. отдела прикладных  
проблем современного анализа Института математики НАНУ, Киев

## **МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ СЕТИ СО СМЕШАННЫМИ ФУНКЦИЯМИ АКТИВАЦИИ**

В статье рассматривается метод комплексной диагностики горно-шахтного оборудования (ГШО) на основе нейронной сети со смешанными функциями активации. Критерием эффективности предложенной модели является ее адекватность состоянию объекта. Для численного исследования предложенного метода были использованы данные, полученные с датчиков измерения температуры и вибрации ГШО. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** комплексная диагностика, горно-шахтное оборудование, нейронная сеть, функции активации.

**Постановка проблемы.** Несмотря на высокий уровень автоматизации производственной безопасности в шахтах и внедрение автоматизированных систем, в шахтах по-прежнему происходят аварии, вызванные износом оборудования. Проблема аварийности горно-шахтного оборудования (ГШО) усугубляется сокращением финансирования и устареванием оборудования, износы которого достигают 50% – 80%. В большинстве случаев возникновение аварии можно было предотвратить, идентифицировав её на начальной стадии и выполнив превентивные действия, направленные на ее недопущение. Одним из подходов, решающих данную задачу, является разработка соответствующих систем автоматизированного диагностирования ГШО, которые используют новейшие технологии и методы обработки информации.

На многих шахтах в эксплуатации находятся системы обеспечения комплексной безопасности [1], которые позволяют индицировать текущие значения физических параметров с помощью различных датчиков: тока, температуры, давления, вибрации радиального или продольного смещения и т.д. [2]. Основными контролируемыми объектами являются главные и местные вентиляторы проветривания, забойные и магистральные конвейеры, проходческие и добычные

---

© Ю.Л. Дикова, Е.Е. Федоров, Д.Е. Иванов, 2015

комбайны, насосные установки. На основе показаний датчиков, обычно, предоставляется информация о трёх состояниях объекта (нормальная работа, предаварийное состояние, аварийное состояние). Однако поступающая информация обрабатывается и анализируется по каждому датчику в отдельности, что позволяет выявить наличие дефекта только по одному признаку. Такая обработка информации не дает возможности получить комплексную оценку состояния ГШО.

**Анализ исследований.** Исследования показали, что задача диагностики ГШО сводится к задаче распознавания его состояния, для решения которой чаще всего применяются такие методы, как решающие деревья, статистические методы, искусственные нейронные сети [3 – 5].

Наряду с достоинствами указанных методов, каждый из них обладает рядом недостатков. Так, к недостаткам решающих деревьев относится необходимость знания их структуры и их порогов, с которыми сравниваются значения диагностических признаков.

Статистические методы требуют большого объема обучающей выборки и необходимости установления взаимосвязи между диагностическим признаками. Для них отсутствует автоматизация процесса определения структуры и параметров модели, затруднен анализ систем с высокой степенью нелинейности, с неоднородными диагностическими признаками. Исходные данные не должны сильно коррелировать, быть неполными или зашумленными.

Наиболее распространёнными ИНС являются: многослойный персепtron, сеть с радиально-базисными функциями, вероятностная сеть, сеть Кохонена и другие. Для многослойного персептрона, сети с радиально-базисными функциями и вероятностной сети не автоматизирован процесс определения их структуры. Кроме того, персепtron требует достаточно много вычислительных ресурсов, применение сети с радиально-базисными функциями предполагает экспоненциальный рост количества функций при увеличении размерности входного пространства, а сеть Кохонена часто не обеспечивает необходимый уровень распознавания.

Вероятностные сети в силу большой размерности скрытого слоя обладают большой вычислительной сложностью процедуры прогноза.

В связи с этим возникает необходимость создания ИНС, способной устраниТЬ перечисленные недостатки.

В статье предлагается метод диагностики, основанный на ИНС, который сочетает в себе анализ нескольких показателей разной физической природы, что позволит существенно повысить вероятность распознавания неисправности ГШО или отдельных узлов.

**Цели и задачи исследования.** Цель – разработка метода комплексной диагностики шахтного оборудования с применением нейросетевого подхода. Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- усовершенствование структуры модели диагностики;
- разработка процедуры диагностики на основании модели;
- выбор критерия качества для обучения модели;
- адаптация параметров модели с целью повышения её адекватности.

**Результаты разработки и исследований.** Диагностика – комплекс средств и методов, направленных на определение технического состояния ГШО. Для определения технического состояния оборудования выполняется чтение информации с датчиков, установленных на находящемся в эксплуатации оборудовании, и проводится анализ данных, на основе которых делается вывод о техническом состоянии оборудования. В настоящей статье рассматриваются только наиболее важные показатели оценки состояния контролируемого объекта – показатели виброскорости и температуры нагрева [2].

В таблице приведены возможные комбинации диапазонов значений показателей виброскорости и температуры с итоговой комплексной оценкой состояния оборудования. Диапазоны значений были установлены согласно условным границам интервалов работы для ГШО класса 2 [6].

Для решения задачи диагностики в статье использована модель нейронной сети, состоящей из двух слоёв:

- входной (нулевой) слой содержит нейроны, которые соответствуют диагностическим признакам;
- первый слой является скрытым. Он содержит нейроны, количество которых соответствует количеству возможных комбинаций диапазонов, приведенных в табл.;
- выходной (второй) слой содержит нейроны, количество которых соответствует возможным состояниям оборудования (табл.).

Предложенная модель не требует эмпирического определения количества скрытых слоев и нейронов в скрытых слоях, поскольку структура ИНС определяется количеством возможных комбинаций диапазонов диагностических признаков. Структура модели ИНС, учитывающая табл., представлена на рис. 1.

Модель ИНС представлена в виде:

$$y_j = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 w_{3(j-1)+i, j} f_{3(j-1)+i}(x_1, x_2), \quad j \in \overline{1, 3}.$$

Таблица

Соответствие комбинации диапазонов значений диагностических признаков комплексной оценке состояния оборудования

№ п/п	Диапазон значений виброскорости, мм/сек	Диапазон значений температуры, °C	Комплексная оценка состояния оборудования
1	< 4,5	< 70	"эксплуатация без ограничения сроков"
2	< 4,5	70 – 80	"эксплуатация без ограничения сроков"
3	4,5 – 11,2	< 70	"эксплуатация без ограничения сроков"
4	< 4,5	> 80	"эксплуатация с ограниченным сроком"
5	4,5 – 11,2	70 – 80	"эксплуатация с ограниченным сроком"
6	> 11,2	< 70	"эксплуатация с ограниченным сроком"
7	4,5 – 11,2	> 80	"не пригодно для эксплуатации"
8	> 11,2	70 – 80	"не пригодно для эксплуатации"
9	> 11,2	> 80	"не пригодно для эксплуатации"

Функция активации каждого нейрона скрытого слоя [7] представляет собой агрегацию функций активации рассматриваемых диагностических признаков, и представлена в виде

$$f_i(x_1, x_2) = f_i(x_1)f_i(x_2).$$

Каждому диапазону диагностического признака соответствует определенная функция активации. Так, диапазону значений виброскорости "< 4,5" и диапазону значений температуры "< 70" соответствует функция активации

$$f(x) = \left( \frac{1}{1 + \exp(-ax + b)} \right).$$

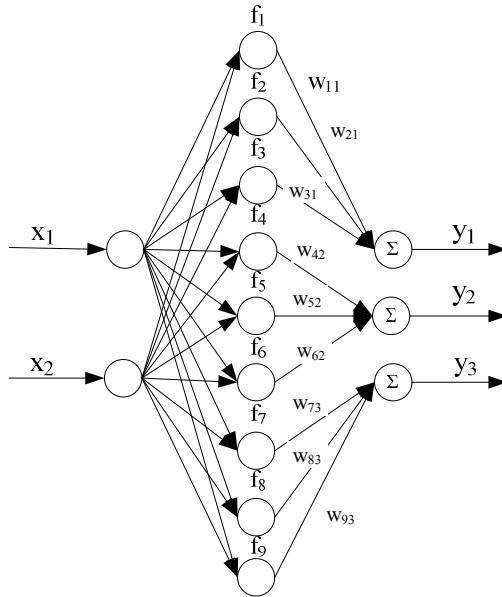


Рис. 1. Структура модели ИНС

Диапазону значений виброскорости "4,5 – 11,2" и диапазону значений температуры "70 – 80" соответствует функция активации

$$f(x) = \exp\left(-\frac{(x - m)^2}{2\sigma^2}\right).$$

Диапазону значений виброскорости "> 11,2" и диапазону значений температуры "> 80" соответствует функция активации

$$f(x) = \left( \frac{1}{1 + \exp(-cx + d)} \right).$$

Тогда, агрегированные функции активации для скрытых нейронов

будут представлены в виде:

$$\begin{aligned}
 f_1(x_1, x_2) &= \left( \frac{1}{1 + \exp(-a_{11}x_1 + b_{11})} \right) * \left( \frac{1}{1 + \exp(-a_{21}x_2 + b_{21})} \right), \\
 f_2(x_1, x_2) &= \left( \frac{1}{1 + \exp(-a_{12}x_1 + b_{12})} \right) * \exp\left(-\frac{(x_2 - m_{22})^2}{2\sigma_{22}^2}\right), \\
 f_3(x_1, x_2) &= \exp\left(-\frac{(x_1 - m_{13})^2}{2\sigma_{13}^2}\right) * \left( \frac{1}{1 + \exp(-a_{23}x_2 + b_{23})} \right), \\
 f_4(x_1, x_2) &= \left( \frac{1}{1 + \exp(-a_{14}x_1 + b_{14})} \right) * \left( \frac{1}{1 + \exp(-c_{24}x_2 + d_{24})} \right), \\
 f_5(x_1, x_2) &= \exp\left(-\frac{(x_1 - m_{15})^2}{2\sigma_{15}^2}\right) * \exp\left(-\frac{(x_2 - m_{25})^2}{2\sigma_{25}^2}\right), \\
 f_6(x_1, x_2) &= \left( \frac{1}{1 + \exp(-c_{16}x_1 + d_{16})} \right) * \left( \frac{1}{1 + \exp(-a_{26}x_2 + b_{26})} \right), \\
 f_7(x_1, x_2) &= \exp\left(-\frac{(x_1 - m_{17})^2}{2\sigma_{17}^2}\right) * \left( \frac{1}{1 + \exp(-c_{27}x_2 + d_{27})} \right), \\
 f_8(x_1, x_2) &= \left( \frac{1}{1 + \exp(-c_{18}x_1 + d_{18})} \right) * \exp\left(-\frac{(x_2 - m_{28})^2}{2\sigma_{28}^2}\right), \\
 f_9(x_1, x_2) &= \left( \frac{1}{1 + \exp(-c_{19}x_1 + d_{19})} \right) * \left( \frac{1}{1 + \exp(-c_{29}x_2 + d_{29})} \right),
 \end{aligned}$$

где параметры функций активации  $f_j(x_1, x_2)$  ( $j = \overline{1, 9}$ ), полученные эмпирическим путем [8], обозначены следующим образом

$$\begin{aligned}
 &a_{11}, \dots, a_{26}, b_{11}, \dots, b_{26}, m_{13}, \dots, m_{28}, \\
 &\sigma_{13}, \dots, \sigma_{28}, c_{16}, \dots, c_{29}, d_{16}, \dots, d_{29}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь  $x_1, x_2$  – диагностические признаки.

**Выбор критерия качества для обучения модели.** В работе для обучения модели выбран критерий адекватности модели на основе СКО, который семантически показывает выбор таких значений параметров (1) и  $w_{ij}$  ( $i, j = \overline{1, 3}$ ), при которых разность выхода по модели и желаемого выхода достигает минимума:

$$F = \frac{1}{3P} \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^3 (y_{pj} - d_{pj})^2 \rightarrow \min_{a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}, m_{ij}, \sigma_{ij}, w_{ij}},$$

где  $P$  – мощность тестового множества  $\{(x_p, d_p) | x_p = (x_{p1}, x_{p2}), d_p = (d_{p1}, d_{p2}, d_{p3})\}$ ,

$y_{pj}$  – полученный на основе моделирования  $j$ -й выход ИНС для  $p$ -й тестовой реализации,

$d_{pj}$  – тестовый (измеренный)  $j$ -й выход ИНС для  $p$ -й тестовой реализации,

$x_{pi}$  – тестовый  $i$ -й вход ИНС для  $p$ -й тестовой реализации

**Адаптация параметров модели.** Целью адаптации модели является настройка ее параметров (1) и  $w_{ij}$ . Для этого в модели ИНС используется процедура Back Propagation [9].

**Численное исследование способа оценки состояния.** Для численного исследования в MatLab [10] была создана модель нейронной сети с описанной структурой, проведены эксперименты на тестовых данных. При этом для виброскорости брался диапазон от 0 до 15 [мм/сек], а для температуры – от 65 до 85 °C, что соответствует наиболее типичным режимам работы ГШО. Исследовалась зависимость состояния ГШО от параметров температуры и виброскорости. Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Результаты работы модели с данными, полученными на шахте "Новогродовская" ГП "Селидовуголь", приведены на рис. 3. Проведенные эксперименты показали, что вероятность ошибки предлагаемой сети составила 0,07, что на 13% лучше по сравнению с другими нейросетевыми подходами.

Предлагаемые метод и модель могут быть обобщены на задачи диагностирования ГШО разных типов, использующих другие датчики.

Структура модели не накладывает ограничений на количество диагностических признаков и количество их возможных диапазонов значений.

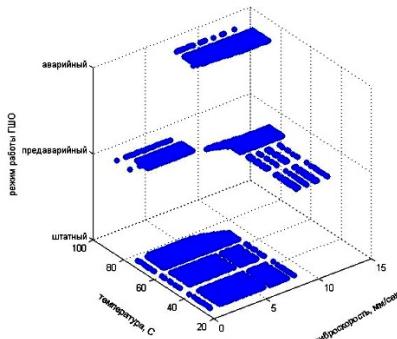


Рис. 2. Результаты работы предложенной модели ИНС с тестовыми данными

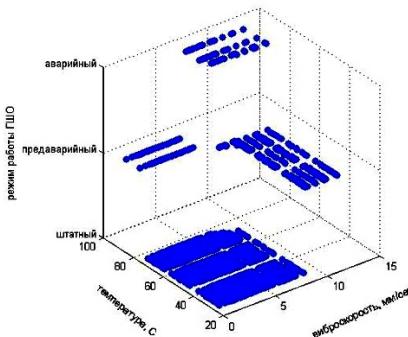


Рис. 3. Результаты моделирования с практическими данными

**Выводы.** 1. Для повышения эффективности диагностики ГШО усовершенствована модель искусственной нейронной сети, которая в отличие от существующих позволяет анализировать совокупность диагностических признаков разной физической природы, что позволяет проводить комплексную оценку состояния ГШО.

2. Предложенная модель не требует эмпирического определения количества скрытых слоев и нейронов в скрытых слоях. Данные параметры ИНС определяются количеством возможных комбинаций диапазонов диагностических признаков. В рассмотренном в статье случае предложена сеть с одним скрытым слоем с девятью нейронами.

3. Каждому нейрону скрытого слоя соответствует своя функция активации, полученная эмпирическим путем.

4. Проведено численное исследование, которое позволило определить, что предложенный способ диагностики является эффективным, а предложенная модель является адекватной. Вероятность ошибки предложенной ИНС составила 0,07.

5. Рассмотренный в статье метод и модель позволяют проводить диагностику различного шахтного оборудования.

6. Предложенная модель может быть адаптирована для любого количества диагностических признаков ГШО.

**Список литературы:** 1. Шахтар Галичини [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.lvug.com.ua/2013/12/09/sistema-utas-na-shahte-stepovaya/> 2. Петровский завод угольного машиностроения [Электронный ресурс]. Режим доступа:<http://itras.com.ua/> 3. Высоцина О.С. Сравнительный анализ моделей нейронных структур для решения задачи классификации состояний телекоммуникационной сети / О.С. Высоцина, С.И. Шматков // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник "Автоматизированные системы управления и приборы автоматики". – Харьков: ХНУРЭ, 2009. – Вып. 146. – С. 70-75. 4. Воронцов К.В. Логические алгоритмы классификации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/9/97/Voron-ML-Logic-slides.pdf>. 5. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа: Монография / С.Г. Радченко. – К.: "Корничук", 2011. – С. 376. 6. Федоров Е.Е. Методики интеллектуальной диагностики: монография / Е. Е. Федоров. – Донецк. акад. автомоб. трансп. – Донецк: Ноулидж, 2010. – 303 с. 7. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: Пер. спольск. И.Д. Рудинского / Д. Рутковская. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с. 8. Дикова Ю.Л. Разработка нейросетевого способа диагностики шахтного оборудования / Ю.Л. Дикова, Е.Е. Федоров. – Харьков: ХНУРЭ, БИОНИКА ИНТЕЛЛЕКТА. – 2015. – № 1 (84). – С. 80-84. 9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. 10. Sivanandam S.N. Introduction to Neural Networks using Matlab 6.0 / S.N. Sivanandam, S. Sumathi, S.N. Deepa – New Delhi: The McGraw-Hill Comp., Inc., 2006. – 660 p.

**Bibliography (transliterated):** 1. Shahtar Galichini [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.lvug.com.ua/2013/12/09/sistema-utas-na-shahte-stepovaya/> 2. Petrovskij zavod ugol'nogo mashinostroenija [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa:<http://itras.com.ua/> 3. Vysochyna O.S. Sravnitel'nyj analiz modelej nejronnyh struktur dlja reshenija zadachi klassifikacii sostojaniij telekommunikacionnoj seti / O.S. Vysochyna, S.I. Shmatkov // Vseukrainskij mezhvedomstvennyj nauchno-tehnicheskij sbornik "Avtomatizirovannye sistemy upravlenija i pribory avtomatiki". – Har'kov: HNURJe, 2009. – Vyp. 146. – P. 70-75. 4. Voroncov K.V. Logicheskie algoritmy klassifikacii. [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/9/97/Voron-ML-Logic-slides.pdf>. 5. Radchenko S.G. Metodologija regressionnogo analiza: Monografija / S.G. Radchenko. – K.: "Kornijchuk", 2011. – P. 376. 6. Fedorov E. E. Metodiki intellektual'noj diagnostiki: monografija / E.E. Fedorov; Donec akad. avtomob. transp. – Doneck: Noulidzh, 2010. — 303 p. 7. Rutkovskaja D. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy: Per. s pol'sk. I.D. Rudinskogo / D. Rutkovskaja. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2006. – 452 p. 8. Dikova Ju.L. Razrabotka nejrosetevogo sposoba diagnostiki shahtnogo oborudovanija / Ju.L. Dikova, E.E. Fedorov. – Har'kov: HNURJe, BIONIKA INTELLEKTA, 2015. – № 1 (84). – P. 80-84. 9. Hajkin S. Nejronnye seti: polnyj kurs / S. Hajkin. – M.: Izdatel'skij dom "Vil'jams", 2006. – 1104 p. 10. Sivanandam S.N. Introduction to Neural

Networks using Matlab 6.0 / S.N. Sivanandam, S. Sumathi, S.N. Deepa. – New Delhi: The McGraw-Hill Comp., Inc., 2006. – 660 p.

*Поступила (received) 15.07.2015  
Повторно 05.10.2015*

*Статью представил д.т.н., проф. каф. ПМИ, проректор по научной работе ГВУЗ "ДонНТУ" (г. Красноармейск) Бацков Е.А.*

Dikova Yuliya, postgraduate  
State Higher Educational Institution " Donetsk National Technical University"  
Sqr. Shibankova, 2, Krasnoarmiysk, Ukraine, 85300  
tel./phone: (099) 902-54-13, e-mail: juli.dikova@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0002-8196-0817

Fedorov Eugene, Dr.Sci.Tech, Professor  
State Higher Educational Institution " Donetsk National Technical University"  
Sqr. Shibankova, 2, Krasnoarmiysk, Ukraine, 85300  
tel./phone: (050) 053-15-20, e-mail: fedorovee75@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0002-2962-7478

Dmytro Ivanov, Dr. of Technical Science, Associate Professor, Senior scientific researcher  
Institute of Mathematics of National Academy of Sciences of Ukraine  
Str. Tereschenkivska 3, Kiev-4, Ukraine, 01601  
tel./phone: (067)-281-2648; email: dmitry.ivanov.iamm@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0001-9956-6589

УДК 004.89:519.71

*В.Д. ДМИТРИЕНКО*, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПИ",  
*Р.П. МИГУЩЕНКО*, д-р техн. наук, доц., проректор по научно-педагогической работе, НТУ "ХПИ",  
*А.Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ*, канд. техн. наук, доц., докторант, НТУ "ХПИ",  
*В.А. БРЕЧКО*, асп., НТУ "ХПИ"

## МНОГОСЛОЙНАЯ НЕЙРОСЕТЕВАЯ ПАМЯТЬ, ХРАНЯЩАЯ ЦЕПОЧКИ АССОЦИАЦИЙ

Впервые на основе двунаправленной ассоциативной памяти предложена архитектура и алгоритмы функционирования двунаправленной многослойной дискретной нейронной сети, которая способна восстанавливать по входной информации, подаваемой на любой из двух ее входных слоев нейронов, цепочки ассоциаций. Ил.: 2. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** двунаправленная ассоциативная память, многослойная дискретная нейронная сеть, цепочки ассоциаций.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Для решения задач нахождения ассоциативных образов в настоящее время существует множество разнообразных методов и алгоритмов [1 – 6]. В связи с этим в теории искусственного интеллекта предпринимаются попытки создания универсальных подходов, позволяющих решать широкие классы задач поиска и запоминания ассоциативной информации. Один из таких подходов связан с использованием искусственных нейронных сетей. Их эффективное применение для решения различных задач во многом основывается на том, что традиционные трудности решения разнообразных задач облегчены применением универсальных алгоритмов обучения нейронных сетей на обучающих выборках [7 – 9].

Обычная нейронная сеть, например перцептрон [5, 7] реализует отображение  $y^k = f(x^k)$ , где  $y^k = (y_1^k, y_2^k, \dots, y_m^k)$  – выходной вектор нейронной сети для  $k$ -го входного вектора сети  $x^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$ ,  $k = \overline{1, p}$ ;  $p$  – число пар векторов  $(x^k, y^k)$ ,  $x^k \in R^n$ ,  $y^k \in R^m$ , и может рассматриваться как ассоциативная память, которая входному вектору  $x^k$  ставит в соответствие выходной вектор  $y^k$ . Однако нейронные сети типа перцептрана, Хебба и другие [8, 9] не могут вектору  $y^k$  поставить в

соответствие ассоциативный вектор  $x^k$ . Этот недостаток преодолён в нейронной сети двунаправленная ассоциативная память (ДАП) [10 – 13].

Двунаправленная ассоциативная память (рис. 1) состоит из двух слоев нейронов, связанных парами двунаправленных взвешенных связей. Изображения (или  $n$ -мерные либо  $m$ -мерные входные вектора) могут подаваться соответственно на входы  $X$ - или  $Y$ -элементов. При этом не предполагается подача изображений на оба слоя элементов одновременно. Если весовая матрица для сигналов, посылаемых из  $X$ -слоя элементов в  $Y$ -слой, есть

$$W = \begin{vmatrix} w_{11} \dots w_{1k} \dots w_{1m} \\ \dots \dots \dots \\ w_{j1} \dots w_{jk} \dots w_{jm} \\ \dots \dots \dots \\ w_{n1} \dots w_{nk} \dots w_{nm} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

то весовая матрица для сигналов от  $Y$ -элементов в  $X$ -слой имеет вид  $W_1 = W^T$ .

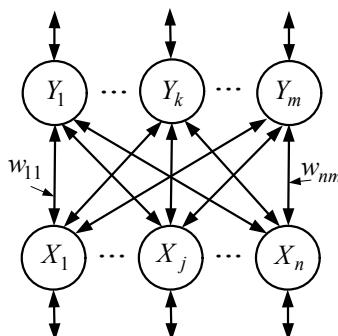


Рис. 1. Двунаправленная ассоциативная память

Сеть способна запоминать пары ассоциированных друг с другом образов  $S^P = (s_1^P, \dots, s_n^P)$ ,  $T^P = (t_1^P, \dots, t_m^P)$  из некоторых заданных множеств образов  $S = \{S^1, \dots, S^P, \dots, S^L\}$ ,  $T = \{T^1, \dots, T^P, \dots, T^L\}$ ,  $L$  – число ассоциированных пар.

Процесс обучения ДАП с биполярными нейронами состоит в предварительной настройке весов связей между  $X$ - и  $Y$ -нейронами – элементов матрицы (1) – в соответствии с формулой

$$w_{ij} = \sum_{p=1}^L S_i^p t_i^p, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Динамика ДАП в режиме определения ассоциативных изображений является итерационной. Процесс изменения выходных сигналов нейронов каждого слоя ДАП осуществляется синхронно, при этом сигналы посылаются из слоя в слой последовательно, а не одновременно в обоих направлениях. При биполярных входных векторах функции активации  $f_p(U_{\text{вх},p})$  для элементов  $X$ - и  $Y$ -слоя задаются выражением

$$U_{\text{вых},p}(t+1) = \begin{cases} 1, & \text{если } U_{\text{вх},p}(t) > \theta_p, \\ U_{\text{вых},p}(t), & \text{если } U_{\text{вх},p}(t) = \theta_p, \\ -1, & \text{если } U_{\text{вх},p}(t) < \theta_p, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\theta_p$  – порог  $p$ -го элемента ДАП,  $p = 1, \dots, n, n+1, \dots, n+m$ .

Из выражения (3) следует, что если входной сигнал элемента точно равен пороговому значению, то функция активации оставляет на выходе нейрона предшествующее значение выходного сигнала. В связи с этим начальная активация нейронов обычно производится нулевыми входными сигналами. Функционирование сети может начинаться с задания изображения (входных сигналов) для любого из слоев ДАП. Алгоритм работы двоичной сети при первом предъявлении изображения  $S^k$  слою  $X$ -элементов предполагает выполнение следующих шагов:

### Алгоритм 1

*Шаг 1.* Инициируются веса связей, определяемые с помощью соотношения (2), для множества из  $L$  пар ассоциированных друг с другом двоичных изображений ( $S^p, T^p$ ),  $p = \overline{1, L}$ . Задается начальное время:  $t = 0$ . Инициируются нулевыми входными сигналами все нейроны ДАП:

$$U_{\text{вх},Xi}(0) = 0, \quad U_{\text{вых},Xi}(0) = f_i(U_{\text{вх},Xi}) = 0, \quad i = \overline{1, n},$$

$$U_{\text{вх},Yj}(0) = 0, \quad U_{\text{вых},Yj}(0) = f_j(U_{\text{вх},Yj}) = 0, \quad j = \overline{1, m}.$$

*Шаг 2.* Для заданного изображения  $S^k = (s_1^k, \dots, s_n^k)$  выполняются шаги 3 – 7.

*Шаг 3.* Задаются входные сигналы нейронов  $X$ -слоя:

$$U_{\text{вх.}Xi}(0) = s_i^k, \quad i = \overline{1, n}.$$

Задается время  $t = t + 1$  и вычисляются выходные сигналы  $X$ -элементов

$$U_{\text{вых.}Xi}(t+1) = f_i(U_{\text{вх.}Xi}(t)), \quad i = \overline{1, n}.$$

*Шаг 4.* До тех пор, пока не устанавливаются выходные сигналы всех  $X$ - и  $Y$ -нейронов, выполняются шаги 5 – 7 алгоритма.

*Шаг 5.* Адаптируется активность элементов  $Y$ -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы  $Y$ -элементов:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх.}Yj}(t+1) &= \sum_{i=1}^n w_{ij} U_{\text{вых.}Xi}(t+1), \quad j = \overline{1, m}, \\ U_{\text{вых.}Yj}(t+2) &= f_j(U_{\text{вх.}Yj}(t+1)), \quad j = \overline{1, m}. \end{aligned}$$

Выходные сигналы  $Y$ -нейронов посылаются на входы элементов  $X$ -слоя.

*Шаг 6.* Адаптируется активность элементов  $X$ -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы  $X$ -элементов:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх.}Xi}(t+2) &= \sum_{j=1}^m w_{ji} U_{\text{вых.}Yj}(t+2), \quad i = \overline{1, n}, \\ U_{\text{вых.}Xi}(t+3) &= f_i(U_{\text{вх.}Xi}(t+2)), \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Выходные сигналы  $X$ -нейронов посылаются на входы элементов  $Y$ -слоя. Вычисляются входные  $U_{\text{вх.}Yj}(t+3)$ ,  $j = \overline{1, m}$ , и выходные сигналы  $U_{\text{вых.}Yj}(t+4)$  элементов  $Y$ -слоя.

*Шаг 7.* Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы  $X$ -нейронов  $U_{\text{вых.}Xi}(t+3)$  и  $U_{\text{вых.}Xi}(t+1)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , а также  $Y$ -нейронов  $U_{\text{вых.}Yj}(t+2)$  и  $U_{\text{вых.}Yj}(t+4)$ ,  $j = \overline{1, m}$ , полученные на предшествующих шагах. Если выполняются все  $(n+m)$  равенства

$$\begin{aligned} U_{\text{вых.}Xi}(t+3) &= U_{\text{вых.}Xi}(t+1), \quad i = \overline{1, n}, \\ U_{\text{вых.}Yj}(t+2) &= U_{\text{вых.}Yj}(t+4), \quad j = \overline{1, m}, \end{aligned}$$

то осуществляется переход к шагу 8 алгоритма, иначе – осуществляется переприсваивание значений выходных сигналов нейронов:

$$U_{\text{вых.} X_j}(t+1) = U_{\text{вых.} X_j}(t+3), \quad i = \overline{1, n},$$

$$U_{\text{вых.} Y_j}(t) = U_{\text{вых.} Y_j}(t+2), \quad j = \overline{1, m},$$

и выполняется переход к шагу 5 алгоритма.

#### Шаг 8. Останов.

ДАП может запоминать пары ассоциативных изображений, а при подаче представителя пары на соответствующий вход – выдавать ассоциативное изображение. Однако ДАП не может запоминать цепочки ассоциаций.

**Целью статьи** является разработка нейросетевой многослойной ассоциативной памяти, которая обладает возможностью запоминания и восстановления цепочек ассоциаций.

Задача решается благодаря тому, что архитектура ДАП перестраивается путем замены одного из сенсорных слоев нейронов например, слоя  $Y$ -элементов, на  $N$  слоев (рис. 2), которые последовательно связаны друг с другом парами двунаправленных взвешенных связей. При этом каждая пара соседних слоев нейронов фактически является двунаправленной ассоциативной памятью. В результате этого возникает возможность любому вектору  $Z_{\text{вх.}}^i = (Z_1^i, Z_2^i, \dots, Z_{q_i}^i)$  некоторого слоя сети  $Z^i$  ( $i = \overline{1, N-1}$ ) поставить в соответствие ассоциативный вектор  $Z_{\text{вых.}}^{i+1}$  на выходе слоя  $Z^{i+1}$ , а вектор  $Z_{\text{вх.}}^i$  рассматривать как ассоциацию входному вектору предшествующего слоя нейронной сети. Поэтому вектор на входе  $X$ -слоя сети порождает цепочку их  $N$  двунаправленных ассоциаций, где каждый вектор  $Z^i$  ( $i = \overline{1, N-1}$ ) входит в две ассоциации [14].

Память состоит из сенсорного слоя нейронов  $X_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) и  $N$  слоев  $Z$ -элементов  $Z^1(Z_1^1, \dots, Z_{q_1}^1), \dots, Z^N(Z_1^N, \dots, Z_{q_N}^N)$ . Каждый нейрон входного слоя  $X_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) связан с каждым нейроном  $Z^1$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей  $W_{iq_1}^{11}$ ,  $W_{qi}^{12}$  ( $i = \overline{1, n}; q_1 = \overline{1, g_1}$ ), каждый нейрон  $Z^1$ -слоя связан с каждым нейроном  $Z^2$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей

$W_{q_1 q_2}^{21}, W_{q_2 q_1}^{22}$  ( $q_1 = \overline{1, g_1}; q_2 = \overline{1, g_2}$ ). По аналогии каждый  $Z^k$ -слой ( $k = \overline{3, N}$ ) сети связан с предыдущим слоем  $Z^{(k-1)}$  парами двунаправленных взвешенных связей  $W_{q_{(k-1)} q_k}^{k1}, W_{q_k q_{k-1}}^{k2}$  ( $q_{k-1} = \overline{1, g_{k-1}}; q_k = \overline{1, g_k}$ ), а также со следующим  $Z^{(k+1)}$ -слоем (за исключением  $Z^N$ -слоя сети) парами двунаправленных взвешенных связей  $W_{q_k q_{k+1}}^{(k+1)1}, W_{q_{(k+1)} q_k}^{(k+1)2}$  ( $q_k = \overline{1, g_k}; q_{k+1} = \overline{1, g_{k+1}}$ ). Каждый нейрон выходного слоя  $Z_{qN}^N$  ( $q_N = \overline{1, g_N}$ ) связан с каждым нейроном  $Z_{q_{N-1}}^{N-1}$ -слоя парами двунаправленных взвешенных связей  $W_{q_N q_{N-1}}^{N1}, W_{q_{(N-1)} q_N}^{N2}$  ( $q_N = \overline{1, g_N}; q_{N-1} = \overline{1, g_{N-1}}$ ).

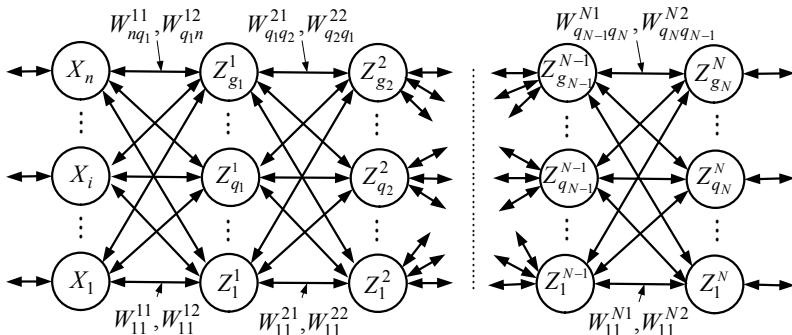


Рис. 2. Нейросетевая многослойная ассоциативная память

Разработанная сеть функционирует в соответствии с двумя алгоритмами: обучения и распознавания. Алгоритм обучения сводится к определению обучающего набора изображений и определения матриц весов связей между слоями нейронов:  $X_i, Z^1, Z^2, \dots, Z^N$  с помощью соотношений вида (1) и (2).

### Алгоритм 2

В алгоритме функционирования многослойной двунаправленной ассоциативной памяти в режиме определения цепочек ассоциаций приняты следующие обозначения:

$n$  – число нейронов в сенсорном слое нейронов;

$g_1, g_2, \dots, g_N$  – число элементов соответственно в слоях  $Z^1, Z^2, \dots, Z^N$  нейронной сети,  $g_1 = g_2 = \dots = g_N$ ;

$S^v, S^{v^1}, S^{v^2}, \dots, S^{v^N}$  ( $v = \overline{1, L}$ ) – цепочки ассоциативных изображений;

$L$  – число цепочек ассоциативных изображений, которые запоминаются;

$v$  – номер цепочки ассоциативных изображений;

$t_0^1, t_1^1, t_2^1, \dots$  – последовательные моменты времени при получении ассоциативных изображений, при этом  $t_1^1 = t_0^1 + \Delta t, t_k^1 = t_{(k-1)}^1 + \Delta t$  и  $t_k^1 = t_0^1 + k\Delta t$ ;

$\Delta t$  – время, необходимое для получения выходного сигнала нейронов с помощью функции активации;

$f_i$  – функция активации  $i$ -го элемента.

Алгоритм работы многослойной двунаправленной ассоциативной памяти при подаче изображения на первый сенсорный вход, предусматривает выполнение шагов, аналогичных шагам при функционировании ДАП:

*Шаг 1.* Инициируются веса связей  $W_{iq_1}^{11}, W_{q_1 i}^{12}$  ( $i = \overline{1, n}; q_1 = \overline{1, g_1}$ ).

Задается начальное время:  $t = t_0^1$ . Инициируются нулевыми входными сигналами все нейроны сети:

$$U_{\text{вх.}X_i}(0) = 0; U_{\text{вых.}X_i}(0) = f_i(U_{\text{вх.}X_i}) = 0; i = \overline{1, n};$$

$$U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}(0) = 0; U_{\text{вых.}Z_{q_1}^1}(0) = f_{q_1}(U_{\text{вх.}Z_{q_1}^1}) = 0; q_1 = \overline{1, g_1}.$$

*Шаг 2.* Для изображения  $S^v = (S_1^v, \dots, S_n^v)$  из произвольной цепочки обучающих изображений  $S^v, S^{v^1}, S^{v^2}, \dots, S^{v^N}$  ( $v = \overline{1, L}$ ), выполняются шаги 3 – 7.

*Шаг 3.* Задаются входные сигналы нейронов  $X$ -слоя сети

$$U_{\text{вх.}X_i}(t_0^1) = S_i^v, i = \overline{1, n}.$$

В интервале времени  $[t_0, t_1^1 = t_0^1 + \Delta t]$  вычисляются выходные сигналы  $X$ -элементов:

$$U_{\text{вых.} X_i}(t_i^1) = f_i(U_{\text{вх.} X_i}(t_0^1)), \quad i = \overline{1, n}.$$

*Шаг 4.* Пока не устанавливаются выходные сигналы всех  $X$ - и  $Z^1$ -нейронов, выполняются шаги 5 – 7.

*Шаг 5.* Адаптируется активность элементов  $Z^1$ -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы  $Z^1$ -элементов:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх.} Z_{q_1}^1}(t_1^1) &= \sum_{i=1}^n W_{iq_1}^{11} U_{\text{вых.} X_i}(t_1^1), \quad i = \overline{1, n}; \quad q_1 = \overline{1, g_1}; \\ U_{\text{вых.} Z_{q_1}^1}(t_2^1) &= f_{q_1}(U_{\text{вх.} Z_{q_1}^1}(t_1^1)); \quad i = \overline{1, n}; \quad q_1 = \overline{1, g_1}. \end{aligned}$$

Выходные сигналы  $Z^1$ -нейронов посылаются на входы элементов  $X$ -слоя.

*Шаг 6.* Адаптируется активность элементов  $X$ -слоя. Вычисляются входные и выходные сигналы  $X$ -элементов:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх.} X_i}(t_2^1) &= \sum_{q_1=1}^{g_1} W_{q_1 i}^{12} U_{\text{вых.} Z_{q_1}^1}(t_2^1), \quad i = \overline{1, n}; \quad q_1 = \overline{1, g_1}; \\ U_{\text{вых.} X_i}(t_3^1) &= f_i(U_{\text{вх.} X_i}(t_2^1)), \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

Выходные сигналы  $X$ -нейронов посылаются на входы элементов  $Z^1$ -слоя:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх.} Z_{q_1}^1}(t_3^1) &= \sum_{i=1}^n W_{iq_1}^{11} U_{\text{вых.} X_i}(t_3^1), \quad q_1 = \overline{1, g_1}; \quad i = \overline{1, n}; \\ U_{\text{вых.} Z_{q_1}^1}(t_4^1) &= f_{q_1}(U_{\text{вх.} Z_{q_1}^1}(t_3^1)); \quad q_1 = \overline{1, g_1}; \quad i = \overline{1, n}. \end{aligned}$$

*Шаг 7.* Проверяется тест на сходимость. Сравниваются выходные сигналы  $X$ -нейронов  $U_{\text{вых.} X_i}(t_3^1)$  и  $U_{\text{вых.} X_i}(t_1^1)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , а также выходные сигналы  $Z^1$ -нейронов  $U_{\text{вых.} Z_{q_1}^1}(t_2^1)$  и  $U_{\text{вых.} Z_{q_1}^1}(t_4^1)$ ,  $q_1 = \overline{1, g_1}$ , которые получены на предыдущих шагах. Если не выполнено хотя бы одно равенство

$$\begin{aligned} U_{\text{вых. } X_i}(t_3^1) &= U_{\text{вых. } X_i}(t_1^1), \quad i = \overline{1, n}; \\ U_{\text{вых. } Z_{q_1}^1}(t_2^1) &= U_{\text{вых. } Z_{q_1}^1}(t_4^1), \quad q_1 = \overline{1, g_1}, \end{aligned}$$

то осуществляется переприсваивание значений выходных сигналов нейронов  $X$ - и  $Z^1$ -слоев:

$$\begin{aligned} U_{\text{вых. } X_i}(t_1^1) &= U_{\text{вых. } X_i}(t_3^1), \quad i = \overline{1, n}; \\ U_{\text{вых. } Z_{q_1}^1}(t^1) &= U_{\text{вых. } Z_{q_1}^1}(t_2^1), \quad q_1 = \overline{1, q_1}, \end{aligned}$$

и переход к шагу 5 алгоритма, иначе – на выходе  $Z^1$ -слоя получено изображение  $S_1^{v^1}$ , которое является входным изображением для  $Z^2$ -слоя ассоциативной памяти. Поскольку любые два  $Z$ -слоя нейронов  $Z^1$  и  $Z^2$ ,  $Z^2$  и  $Z^3$ , ...,  $Z^{N-1}$  и  $Z^N$ , имеют архитектуру двунаправленной ассоциативной памяти, то их функционирование аналогично функционированию ДАП (алгоритм 1) или первых двух слоев рассматриваемой многослойной ассоциативной памяти (алгоритм 2, первые семь шагов алгоритма). Последовательное применение основного алгоритма ДАП (алгоритм 1) к слоям нейронов  $Z^1$  и  $Z^2$ ,  $Z^2$  и  $Z^3$ , ...,  $Z^{N-1}$  и  $Z^N$  позволяет получать всю цепочку ассоциативных изображений  $S^{v^1}, S^{v^2}, \dots, S^{v^N}$ . Предложенная многослойная ассоциативная память является двунаправленной. Поэтому, если на входы  $Z^N$ -нейронов подать изображение  $S^{v^N}$ , то будет получена цепочка ассоциативных изображений  $S^{v(N-1)}, S^{v(N-2)}, \dots, S^{v^1}, S^v$ . Процессы функционирования предложенной нейронной сети в этом случае аналогичны процессам функционирования сети при подаче изображения  $S^v$  на входы слоя  $X$ -нейронов.

#### Шаг 8. Останов.

Разработано программное обеспечение, моделирующее архитектуру и алгоритмы функционирования многослойной дискретной двунаправленной ассоциативной памяти. Программа позволяет в процессе работы нейронной сети восстанавливать по входной информации, подаваемой на входы  $X$ - и  $Z^N$ -нейронов цепочки ассоциативных изображений.

**Выводы.** Таким образом, впервые на основе двунаправленной ассоциативной памяти предложена архитектура и алгоритмы

функционирования двунаправленной многослойной дискретной нейронной сети, которая способна восстанавливать по входной информации, подаваемой на любой из ее двух входов, цепочки ассоциативных изображений. На архитектуру и алгоритмы функционирования сети получен патент Украины на изобретение.

- Список литературы:** 1. Архангельский В.І. Нейронні мережі в системах автоматизації / В.І. Архангельський, І.М. Богасенко, Г.Г. Грабовський, М.О. Рюмшин. – К.: Техніка, 1999. – 364 с. 2. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Р. Каллан. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 288 с. 3. Дмитриенко В.Д. Основы теории нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с. 4. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с. 5. Бодянский Е.В. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применение / Е.В. Бодянский, О.Г. Руденко. – Харьков: ТЕЛЕТЕХ, 2004. – 372 с. 6. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае: в 2 т. / А.И. Галушкин. Т. 1. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 367 с. 7. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с. 8. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344 с. 9. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Изд. дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. 10. Яхъяева Г.Э. Нечеткие множества и нейронные сети: Учебное пособие / Г.Э. Яхъяева. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 316 с. 11. Галушкин А.И. Нейронные сети: основы теории / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 496 с. 12. Рутковский Лешек. Методы и технологии искусственного интеллекта / Лешек Рутковский. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 520 с. 13. Дмитриенко В.Д. Моделирование и оптимизация процессов управления движением дизель-поездов / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный. – Харьков: Изд. центр НТМТ, 2013. – 248 с. 14. Дмитриенко В.Д. Пристрій багатошарової двонаправленої асоціативної пам'яті / В.Д. Дмитриєнко, О.Ю. Заковоротний, І.П. Хавіна, В.О. Бречко // Патент на винахід 108947 Україна, МПК G06G 7/60. Заявник та володар патенту НТУ "ХПІ". – № a 2014 02402; Заявлено 11.03.2014; Опубліковано 25.06.2015; Бюл. № 12.

**Bibliography (transliterated):** 1. Arhangel's'kij V.I. Nejronni merezhi v sistemah avtomatizacii / V.I. Arhangel's'kij, I.M. Bogaenko, G.G. Grabovs'kij, M.O. Rjumshin. – K.: Tehnika, 1999. – 364 p. 2. Kallan R. Osnovnye koncepcii nejronnyh setej / R. Kallan. – M.: Izdatel'skij dom "Vil'jams", 2001. – 288 p. 3. Dmitrienko V.D. Osnovy teorii nejronnyh setej / V.D. Dmitrienko, N.I. Korsunov. – Belgorod: BIIMMAP, 2001. – 159 p. 4. Komashinskij V.I. Nejronnye seti i ih primenenie v sistemah upravlenija i svjazi / V.I. Komashinskij, D.A. Smirnov. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2002. – 94 p. 5. Bodjanskij E.V. Iskusstvennye nejronnye seti: arhitektury, obuchenie, primenenie / E.V. Bodjanskij, O.G. Rudenko. – Har'kov: TELETEH, 2004. – 372 p. 6. Galushkin A.I. Nejrokomp'yutery i ih primenenie na rubezhe tysjacheletij v Kitae: v 2 t. / A.I. Galushkin. – T. 1. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2004. – 367 p. 7. Barskij A.B. Nejronnye seti: raspoznavanie, upravlenie, prinjatie reshenij / A.B. Barskij. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 176 p. 8. Osovskij S. Nejronnye seti dlja obrabotki informacii / S. Osovskij. – M.: Finansy i statistika, 2004. – 344 p. 9. Hajkin S. Nejronnye seti: polnyj kurs / S. Hajkin. – M.: Izd. dom "Vil'jams", 2006. – 1104 p. 10. Jah"jaeva G.Je. Nechetkie mnozhestva u nejronnye seti: Uchebnoe posobie / G.Je. Jah"jaeva. – M.: Internet-Universitet Informacionnyh Tehnologij; BINOM. Laboratoriya znanij, 2006. – 316 p. 11. Galushkin A.I. Nejronnye seti: osnovy teorii / A.I. Galushkin. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2010. – 496 p. 12. Rutkovskij Leshek. Metody

i tehnologii iskusstvennogo intellekta / Leshek Rutkovskij. – M.: Gorjachaja linija – Telekom, 2010. – 520 p. **13.** Dmitrienko V.D. Modelirovaniye i optimizacija processov upravlenija dvizheniem dizel'-poezdov / V.D. Dmitrienko, A.Ju. Zakovorotnyj. – Har'kov: Izd. centr NTMT, 2013. – 248 p. **14.** Dmitrienko V.D. Pristrij bagatosharovoї dvonapravlenoi asociativnoi pam'jati / V.D. Dmitrienko, O.Ju. Zakovorotnj, I.P. Havina, V.O. Brechko // Patent na vinahid 108947 Ukraina, MPK G06G 7/60. Zajavnik ta volodar patentu NTU "HPI". – № a 2014 02402; Zajavлено 11.03.2014; Opublikовано 25.06.2015; Bjul. № 12.

*Поступила (received) 7.10.2015*

*Статью представил д-р техн. наук, проф., заслуженный изобретатель Украины, зав. кафедрой "Системы информации" НТУ "ХПИ" Серков А.А.*

Dmitrienko Valerii, Dr. Tech. Sci., Professor  
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002  
tel./phone: +38 (057) 707-61-98, e-mail: valdmitrienko@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Migushenko Ruslan, Dr. Tech. Sci., Prorector,  
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002  
tel./phone: +38 (057) 707-61-98, e-mail: serleomail@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0003-2523-595X

Zakovorotniy Alexandr, Cand. Tech. Sci., Docent, Doctoral Candidate  
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002  
tel./phone: +38 (067) 546-35-27, e-mail: arcade@i.ua  
ORCID ID: 0000-0003-4415-838X

Brechko Veronika, Post Graduate Student  
National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002  
tel./phone. (066) 311-12-81, e-mail: trin\_all@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0001-9578-2102

УДК 681.5.013

**Ю.И. ДОРОФЕЕВ**, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"

## **СИНТЕЗ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ В СЕТЯХ ПОСТАВОК НА ОСНОВЕ РОБАСТНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДСИСТЕМ**

Предложен подход к решению задачи синтеза децентрализованного управления запасами в сетях поставок. Локальные регуляторы строятся с использованием линейной динамической обратной связи по состоянию. Для подавления влияния возмущений, моделирующих изменения внешнего спроса, одновременно с обеспечением робастной устойчивости замкнутых локальных подсистем применен метод инвариантных эллипсоидов. Важнейшим свойством полученного решения является устойчивость по Ляпунову управляемой сети поставок с децентрализованными регуляторами. Рассмотрен численный пример. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 15 назв.

**Ключевые слова:** управление запасами, децентрализованное управление, робастная устойчивость, метод инвариантных эллипсоидов.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Сеть поставок представляет собой систему, состоящую из совокупности взаимосвязанных объектов, осуществляющих добывчу сырья, производство, хранение, транспортировку и распределение ресурсов с целью удовлетворения потребительского спроса и получения прибыли. Модель сети поставок представляют в виде ориентированного графа, вершины которого, соответствующие узлам сети, определяют виды и объемы управляемых запасов, а дуги представляют управляемые и неуправляемые потоки в сети. Управляемые потоки описывают процессы переработки и перераспределения ресурсов между узлами сети и процессы поставок сырья извне. Неуправляемые потоки описывают спрос на ресурсы, который формируется внешними потребителями.

В процессе функционирования производственных звеньев, ассоциированных с узлами сети поставок, и воздействия внешнего спроса уровни запаса ресурсов в узлах сети изменяются с течением времени. В результате возникает необходимость в разработке стратегий управления запасами для сетей поставок с целью удовлетворения внешнего спроса и минимизации собственных издержек. Под стратегией управления запасами понимается структура правил определения моментов и размеров заказов на пополнение запасов.

С точки зрения теории управления спрос на ресурсы, поступающий из внешней среды, целесообразно рассматривать в качестве внешних возмущающих воздействий. Анализ различных подходов к управлению

запасами можно найти в книге [1] и обширной библиографии к ней. Выбор модели управления запасами определяется характером внешнего спроса. На практике, как правило, отсутствует информация для построения адекватной модели спроса. Поэтому в условиях неопределенности спроса используется концепция "неизвестных, но ограниченных" воздействий [2]. При этом соответствующая модель спроса характеризуется интервальной неопределенностью.

Другим источником неопределенности в задачах управления запасами является наличие транспортных запаздываний, обусловленных задержками в пополнении запасов относительно моментов формирования заказов. Предполагается, что значения длительности транспортировки и переработки ресурсов в узлах сети известны. Однако, в процессе функционирования эти параметры могут отличаться от своих номинальных значений. В результате возникает необходимость обеспечения робастности системы управления относительно вариаций указанных параметров.

В задачах синтеза регуляторов часто возникает необходимость учета ограничений на значения переменных. При этом, как правило, рассматривают ограничения, заданные в какой-либо норме. Тогда как спецификой задач управления запасами является неотрицательность значений переменных, что приводит к наличию несимметричных ограничений на значения состояний и управляющих воздействий.

В последнее десятилетие сформировался новый подход к рассматриваемой проблематике, основанный на концепции инвариантных множеств [3], среди которых особо выделяются эллипсоиды вследствие их простой структуры и прямой связи с квадратичными функциями Ляпунова.

Большинство процедур, разработанных для анализа и синтеза систем управления запасами в последние десятилетия, используют централизованный подход, когда вся информация о текущем состоянии системы передается на единый регулятор, формирующий управляющие воздействия для всех узлов. Однако, такой способ построения системы управления характеризуется значительной вычислительной сложностью. Поэтому для решения задач управления сетями поставок перспективным представляется децентрализованный подход, при котором исходная оптимизационная задача заменяется набором локальных задач меньшей размерности, решаемых параллельно и независимо друг от друга. Однако, при этом возникает необходимость обеспечения робастной устойчивости системы в целом с учетом наличия взаимосвязей.

Большое внимание удалено рассмотрению проблемы робастности в децентрализованной структуре управления в работе [4], где условия

устойчивости формулируются с использованием техники линейных матричных неравенств (ЛМН). Для уменьшения размерности задачи может быть применена концепция диагональной или блочно-диагональной доминантности, с использованием которой в работе [5] предложен подход, основанный на методе эквивалентных подсистем. Главное преимущество указанного подхода состоит в том, что статическая обратная связь, обеспечивающая робастную устойчивость, строится на уровне отдельных подсистем. Однако, при построении модели авторы не учитывают ограничения, а также не рассматривают внешние воздействия, что является весьма существенным для сетей поставок.

**Целью работы** является синтез децентрализованной робастной стратегии управления запасами, которая может использоваться для определения в каждый момент времени объемов заказа ресурсов с учетом ограничений на их значения в виде функции от уровней запаса ресурсов в узлах сети, которые позволяют удерживать состояния в ограниченном компактном множестве в условиях действия неизвестного, но ограниченного внешнего спроса.

Рассмотрим сеть поставок  $S$ , состоящую из  $N$  взаимосвязанных узлов  $S_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ . Для математического описания сети используется дискретная модель в пространстве состояний. В качестве переменных состояний рассматриваются наличные уровни запаса ресурсов. В качестве управляющих воздействий выступают размеры заявок на поставку ресурсов, которые формируются узлами сети в текущем периоде, а возмущениями являются размеры внешнего спроса.

Поведение системы определяется уравнениями, описывающими изменение уровня запаса ресурсов в каждом из узлов сети. Предполагается, что структура сети известна, а состояния доступны непосредственному измерению, при этом измеренные значения состояний поступают только на соответствующие локальные регуляторы. С учетом транспортных задержек каждый из узлов сети поставок описывается разностным уравнением с запаздыванием

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{t=0}^{\Lambda_i} B_i^t u_i(k-t) + E_i w_i(k), \quad i = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $x_i(k) \in \mathbb{R}^{n_i}$  – вектор состояний узла  $S_i$ ;  $k = 0, 1, \dots$  – номер дискретного интервала;  $u_i(k) \in \mathbb{R}^{m_i}$  – вектор управляющих воздействий;  $w_i(k) \in \mathbb{R}^{n_i}$  – вектор внешних возмущений;  $\Lambda_i$  – максимальное значение

запаздывания управляемых потоков между узлом  $S_i$  и узлами – поставщиками ресурсов;  $B_i^t \in \mathbb{R}^{n_i \times m_i}$ ,  $t = \overline{0, \Lambda_i}$ ,  $E_i \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$  – матрицы влияния управлений и возмущений, соответственно, методика построения которых изложена в работе [6].

Внешние воздействия узла  $S_i$  включают в себя функции внешнего спроса, формируемого вне сети, и внутреннего спроса, формируемого узлами сети, для которых узел  $S_i$  является поставщиком ресурсов:

$$w_i(k) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \Pi_{ij} u_j(k) + \Pi_i d(k), \quad (2)$$

где  $u_j(k) \in \mathbb{R}^{m_j}$  – вектор управлений узла  $S_j$ ;  $d(k) \in \mathbb{R}^q$  – вектор внешнего спроса;  $\Pi_{ij} \in \mathbb{R}^{n_i \times m_j}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$  – продуктивные матрицы; значение элемента  $\Pi_{ij}(p, r)$  равно количеству единиц ресурса  $p = \overline{1, n_i}$  узла  $S_i$ , необходимого для производства единицы ресурса  $r = \overline{1, n_j}$  узлом  $S_j$ ;  $\Pi_i \in \mathbb{R}^{n_i \times q}$  – матрица влияния внешнего спроса.

В процессе функционирования сети должны выполняться локальные ограничения

$$\begin{aligned} x_i(k) \in X_i &= \{x_i \in \mathbb{R}^{n_i} : 0 \leq x_i \leq x_i^{\max}\}, \\ u_i(k) \in U_i &= \{u_i \in \mathbb{R}^{m_i} : 0 \leq u_i \leq u_i^{\max}\}, \quad i = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (3)$$

где векторы  $x_i^{\max}$  и  $u_i^{\max}$ , определяющие максимальные вместительности хранилищ и максимальные размеры заказов узла  $S_i$ , считаются заданными.

Предполагается, что возмущения удовлетворяют ограничениям

$$d(k) \in D = \{d \in \mathbb{R}^q : d^{\min} \leq d \leq d^{\max}\}, \quad (4)$$

где векторы  $d^{\min}$  и  $d^{\max}$  определяют граничные значения спроса и предполагаются известными.

Выполним преобразование модели (1) к стандартному виду без запаздывания на основе расширения вектора состояний [7], который будет равен

$$\xi_i(k) = [x_i^T(k), u_i^T(k-1), u_i^T(k-2), \dots, u_i^T(k-\Lambda_i)]^T,$$

а уравнения расширенной модели примут вид

$$\xi_i(k+1) = A_i \xi_i(k) + B_i u_i(k) + G_i w_i(k), \quad x_i(k) = C_i \xi_i(k), \quad (5)$$

где матрицы  $A_i \in \mathbb{R}^{N_i \times N_i}$ ,  $B_i \in \mathbb{R}^{N_i \times m_i}$ ,  $G_i \in \mathbb{R}^{N_i \times q_i}$ ,  $C_i \in \mathbb{R}^{n_i \times N_i}$ ,  $N_i = n_i + m_i \Lambda_i$  имеют соответствующую блочную структуру [6].

Рассмотрим построение матрицы динамики  $A_i$  расширенной модели узла в случае, когда величина запаздывания управляемых потоков  $\Lambda_i$  отличается от номинального значения. Тогда матрица становится нестационарной и в каждый момент времени  $k$  может принимать какое-либо значение из множества

$$A_i(\theta) = \{A_i \in \mathbb{R}^{N_i \times N_i} : A_i = A_i^{(0)} + \sum_{j=1}^{L_i} \theta_j(k) A_i^{(j)}, \quad \theta \in \Theta\}, \quad (6)$$

где  $L_i = 2^l$ ,  $l$  – количество узлов, интервалы запаздывания которых могут варьироваться в процессе работы;  $\theta_j(k), j = \overline{1, L_i}$  – набор параметров, которые описывают неопределенность модели и удовлетворяют требованиям

$$\Theta = \{\theta \in \mathbb{R}^{L_i} : \theta_j(k) \geq 0, \quad \sum_{j=1}^{L_i} \theta_j(k) = 1\}. \quad (7)$$

В результате расширенная модель узла может быть представлена в виде модели с неопределенностью следующего вида:

$$\begin{aligned} \xi_i(k+1) &= A_i(\theta) \xi_i(k) + B_i u_i(k) + G_i w_i(k), \\ x_i(k) &= C_i \xi_i(k), \quad A_i(\theta) \in \Omega_i = \text{Co}\{A_i^{(1)}, \dots, A_i^{(L_i)}\}, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\text{Co}\{\cdot\}$  – выпуклая оболочка;  $A_i^{(j)}, j = \overline{1, L_i}$  –  $j$ -я вершина множества  $\Omega_i$ .

Для системы (8) с параметрической неопределенностью (7) рассматривается задача синтеза децентрализованной стратегии управления запасами, которая для любого допустимого спроса  $d(k) \in D$  и любого варианта реализации неопределенности  $\forall k \geq 0$  обеспечивает: удовлетворение спроса на ресурсы, то есть выполнение первого из ограничений (3); рабочую устойчивость замкнутой системы при ограничениях (3); некоторую гарантированную стоимость управления.

**Синтез локальных регуляторов.** Первым этапом решения задачи является вычисление граничных значений внешних воздействий каждого из узлов, для чего предлагается следующий алгоритм:

1.  $i = \overline{1, N} : d_i^{\min} = \Pi_i d^{\min}, d_i^{\max} = \Pi_i d^{\max}.$
2.  $i = \overline{1, q} : \Pi_i^{\min} = \sum_{j=1, j \neq i}^q \Pi_{ij} d_j^{\min}, \Pi_i^{\max} = \sum_{j=1, j \neq i}^q \Pi_{ij} d_j^{\max},$   
 $w_i^{\min} = d_i^{\min} + \Pi_i^{\min}, w_i^{\max} = d_i^{\max} + \Pi_i^{\max}.$  (9)
3.  $i = \overline{q+1, N} : \Pi_i^{\min} = \sum_{j=1}^{i-1} \Pi_{ij} (\Pi_j^{\min} + d_j^{\min}), w_i^{\min} = d_i^{\min} + \Pi_i^{\min},$   
 $\Pi_i^{\max} = \sum_{j=1}^{i-1} \Pi_{ij} (\Pi_j^{\max} + d_j^{\max}), w_i^{\max} = d_i^{\max} + \Pi_i^{\max}.$

Тогда множество значений внешних воздействий узла  $S_i$  может быть аппроксимировано эллипсоидом

$$E(w_i^*, Q_i^w) = \{w_i \in \mathbb{R}^{n_i} : (w_i(k) - w_i^*)^T Q_i^{w^{-1}} (w_i(k) - w_i^*) \leq 1\}, \quad (10)$$

параметры которого  $Q_i^w$ ,  $w_i^*$  определяются в результате решения задачи полуопределенного программирования по аналогии с [8].

Будем строить локальный закон управления в виде линейной динамической обратной связи по сигналу рассогласования между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов

$$u_i(k) = K_i(k)(\xi_i(k) - \xi_i^*), \quad (11)$$

где  $K_i(k) \in \mathbb{R}^{m_i \times N_i}$  – нестационарная матрица коэффициентов обратной связи;  $\xi_i^*$  – вектор, определяющий размер страховых запасов узла  $S_i$ , состоящий из  $(\Lambda_i + 1)$  векторов  $x_i^*$ , которые вычисляются на основании верхних граничных значений внешних воздействий  $w_i^{\max}$

$$x_i^* = \Lambda_i w_i^{\max}. \quad (12)$$

Тогда модель (8) для управления (11) можно представить в виде:

$$\begin{aligned} \xi_i(k+1) &= (A_i(\theta) + B_i K_i(k))(\xi_i(k) - \xi_i^*) + A_i(\theta) \xi_i^* + G_i(w_i(k) - w_i^*) + G_i w_i^*, \\ x_i(k) &= C_i \xi_i(k), \quad A_i(\theta) \in \Omega_i. \end{aligned} \quad (13)$$

Запишем квадратичный критерий качества в случае бесконечного временного горизонта

$$J_i^\infty(k) = \sum_{k=0}^{\infty} ((\xi_i(k) - \xi_i^*)^T W_i^\xi (\xi_i(k) - \xi_i^*) + u_i^T(k) W_i^u u_i(k)), \quad (14)$$

где  $0 \prec W_i^\xi \in R^{N_i \times N_i}$ ,  $0 \prec W_i^u \in R^{m_i \times m_i}$  – диагональные весовые матрицы; " $\succ 0$ " – означает положительную определенность матрицы.

Задача синтеза локального гарантирующего управления эквивалентна решению минимаксной задачи

$$u_i(k) = \arg \min_{u_i(k) \in U_i} \left( \max_{w_i(k) \in E(w_i^*, Q_i^W), A_i(0) \in \Omega_i} J_i^\infty(k) \right). \quad (15)$$

Определим квадратичную модифицированную функцию Ляпунова (ФЛ), построенную на решениях системы (13):

$$V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) = (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T P_i(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*), \quad P_i(k) = P_i^T(k) \succ 0. \quad (16)$$

Вычислим первую разность по  $k$  ФЛ (16) и потребуем, чтобы ее значение с течением времени убывало с некоторой гарантированной скоростью

$$\begin{aligned} V_i(\xi_i(k+1) - \xi_i^*) - V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) &\leq \\ &\leq -((\xi_i(k) - \xi_i^*)^T W_i^\xi (\xi_i(k) - \xi_i^*) + u_i^T(k) W_i^u u_i(k)). \end{aligned} \quad (17)$$

Если неравенство (17) выполняется, то можно показать, что ФЛ (16)  $\forall k \geq 0$  определяет верхнее граничное значение критерия (14). Тогда задача (15) эквивалентна задаче минимизации значения ФЛ

$$u_i(k) = \arg \min_{u_i(k) \in U_i} V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*), \quad (18)$$

для решения которой применим метод инвариантных эллипсоидов [9].

Эллипсоид, описываемый уравнением

$$E(\xi_i^*, Q_i(k)) = \{\xi_i \in R^{N_i} : (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T Q_i^{-1}(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*) \leq 1\}, \quad (19)$$

называется инвариантным по состоянию для системы (13), если из условия  $\xi_i(0) \in E(\xi_i^*, Q_i(k))$  следует, что  $\xi_i(k) \in E(\xi_i^*, Q_i(k)) \quad \forall k \geq 0$ . Другими словами, любая траектория системы, начавшись в инвариантном эллипсоиде, остается в нем для любого дискретного интервала  $k \geq 0$ .

Эллипсоид (19) выступает в качестве аппроксимации множества достижимости замкнутой системы (13), то есть позволяет характеризовать влияние внешних возмущений и неопределенности значений параметров на траекторию замкнутой системы. Тогда

минимизация в некотором смысле инвариантного эллипсоида (19) соответствует робастному управлению системой (13).

Сравнение выражений (19) и (16) позволяет утверждать, что если выполняется тождество  $P_i(k) = Q_i^{-1}(k)$ , то эллипсоид (19) представляет собой множество, находящееся внутри поверхности уровня ФЛ (16). Тогда задача робастной стабилизации заключается в вычислении в каждый момент  $k \geq 0$  матрицы  $K_i(k)$  такой, чтобы регулятор (11) обеспечивал минимизацию по некоторому критерию эллипсоида (19) при ограничениях (3). Выберем в качестве критерия сумму квадратов полуосей эллипсоида, то есть след матрицы  $Q_i(k)$ . Записав неравенства (17) и (10) в виде квадратичных форм относительно составного вектора

$$s_i(k) = [(\xi_i(k) - \xi_i^*)^T, \quad \xi_i^{*T}, \quad w_i^{*T}, \quad (w_i(k) - w_i^*)^T]^T \in \mathbb{R}^{2(N_i + n_i)},$$

и введя матричную переменную  $Y_i(k) = K_i(k)Q_i(k)$ , с помощью S-процедуры [9] представим их в виде совокупности ЛМН

$$\begin{bmatrix} Q_i(k) & 0_{N_i \times N_i} & 0_{N_i \times n_i} & \Psi^T(k) & 0_{N_i \times n_i} & Q_i(k)W_i^\xi & Y_i^T(k)W_i^u \\ 0_{N_i \times N_i} & 0_{N_i \times N_i} & 0_{N_i \times n_i} & A_i^{(j)T} - I_N & 0_{N_i \times n_i} & 0_{N_i \times N_i} & 0_{N_i \times m_i} \\ 0_{n_i \times N_i} & 0_{n_i \times N_i} & 0_{n_i \times n_i} & G_i^T & 0_{n_i \times n_i} & 0_{n_i \times N_i} & 0_{n_i \times m_i} \\ \Psi(k) & A_i^{(j)} - I_N & G_i & Q_i(k) & G_i Q_i^{w/2} & 0_{N_i \times N_i} & 0_{N_i \times m_i} \\ 0_{n_i \times N_i} & 0_{n_i \times N_i} & 0_{n_i \times n_i} & Q_i^{w/2} G_i^T & \alpha_i(k) I_{n_i} & 0_{n_i \times N_i} & 0_{n_i \times m_i} \\ W_i^\xi Q_i(k) & 0_{N_i \times N_i} & 0_{N_i \times n_i} & 0_{N_i \times N_i} & 0_{N_i \times n_i} & W_i^\xi & 0_{N_i \times m_i} \\ W_i^u Y_i(k) & 0_{m_i \times N_i} & W_i^u \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (20)$$

$$j = \overline{1, L_i}, \quad Q_i(k) \succ 0,$$

где  $\Psi(k) = A_i^{(j)} Q_i(k) + B_i Y_i(k)$ ;  $0_{m \times n}$  – нулевая матрица;  $\alpha_i(k) > 0$  – некоторый скаляр.

Ограничения (3) на значения состояний и управлений с помощью леммы Шура [9] представим в виде ЛМН

$$\begin{bmatrix} Q_i^x & C_i Q_i(k) \\ Q_i(k) C_i^T & Q_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad \begin{bmatrix} \varepsilon e_{m_i} (\xi_i(k) - \xi_i^*)^+ Y_i^T(k) & Y_i(k) \\ Y_i^T(k) & Q_i(k) \end{bmatrix} \preceq 0, \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} u_i^{\max}(\xi_i(k) - \xi_i^*)^+ Y_i^T(k) & Y_i(k) \\ Y_i^T(k) & Q_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (22)$$

где  $Q_i^x \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$  – матрица эллипсоида наименьшего объема, аппроксимирующего множество  $X_i$ ;  $e_{m_i} = [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^{m_i \times 1}$ ;  $\varepsilon > 0$  – малая константа; "+" – псевдообращение Мура-Пенроуза.

Именно наличие ЛМН (21), (22) приводит к закону управления в виде динамической обратной связи, поскольку матрицы неравенств зависят от текущего значения вектора состояний  $\xi_i(k)$ .

Тогда результат решения задачи синтеза робастного гарантирующего управления запасами для локальной подсистемы может быть представлен в виде следующей теоремы.

*Теорема.* Рассмотрим систему (13) с параметрической неопределенностью (7) и ограничениями (3) и пусть матрицы  $\hat{Q}_i(k), \hat{Y}_i(k)$  получены в результате решения оптимизационной задачи

$$\text{trace}(Q_i(k)) \rightarrow \min \quad (23)$$

при ограничениях (20) – (22).

Если указанная задача, которая является задачей полуопределенного программирования, имеет решение, то: для любого начального состояния  $x_i(0) \geq x_i^*$ ,  $u_i(k) = 0_{m_i \times 1} \forall k \leq 0$  и любого значения  $A_i(\theta) \in \Omega_i$ , а также возмущения  $w_i(k) \in E(w_i^*, Q_i^w)$  подсистема (13) является робастно устойчивой при ограничениях (3); среди всех линейных управлений вида (11) регулятор с матрицей  $K_i(k) = \hat{Y}_i(k)\hat{Q}_i^{-1}(k)$  доставляет минимум по критерию следа матрицы инвариантному эллипсоиду (19) в момент  $k$ .

Доказательство теоремы аналогично доказательству, приведенному в [10], с очевидными техническими изменениями.

**Анализ устойчивости децентрализованной системы управления запасами.** Представим уравнение динамики замкнутой расширенной модели узла  $S_i$  с учетом взаимосвязей (2) в следующем виде

$$\xi_i(k+1) = A_i(\theta)(\xi_i(k) - \xi_i^*) + A_i(\theta)\xi_i^* + \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ij}(k)(\xi_j(k) - \xi_j^*) + F_i d(k), \quad (24)$$

где  $F_{ij}^T(k) = [E_i \Pi_{ij} K_j(k) \ 0_{m_i \times N_j} \ \dots \ 0_{m_i \times N_j}]$ ;  $F_i^T = [E_i \Pi_i \ 0_{m_i \times q} \ \dots \ 0_{m_i \times q}]$ .

Для анализа устойчивости управляемой сети поставок  $S$  с децентрализованными регуляторами применим метод сравнения и математический аппарат векторных функций Ляпунова [11].

Сформируем для системы  $S$  векторную функцию Ляпунова

$$V(\xi(k) - \xi^*) = [v_1(\xi_1(k) - \xi_1^*), \dots, v_N(\xi_N(k) - \xi_N^*)]^T, \quad (25)$$

где  $\xi(k) = [\xi_1^T(k), \dots, \xi_N^T(k)]^T; \xi^* = [\xi_1^{*T}, \dots, \xi_N^{*T}]^T$ .

Компонентами функции (25) являются ФЛ локальных подсистем в форме Шилака [12]

$$v_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) = ((\xi_i(k) - \xi_i^*)^T P_i(k)(\xi_i(k) - \xi_i^*))^{1/2}, \quad i = \overline{1, N}.$$

На основе векторной ФЛ (25) сформируем общую ФЛ

$$V_0(\xi(k) - \xi^*) = P_0 V(\xi(k) - \xi^*), \quad (26)$$

где  $P_0 = [p_{01}, \dots, p_{0N}], \quad p_{0i} > 0, \quad i = \overline{1, N}$ .

Сопоставим набору подсистем линейную систему сравнения (ЛСС), определяемую разностными уравнениями

$$\begin{aligned} v(k+1) &= \Lambda(k)v(k), \quad v(0) = V(\xi(0) - \xi^*), \\ \eta(k) &= P_0 v(k), \end{aligned} \quad (27)$$

где  $v = [v_1^T, \dots, v_N^T]^T$  – вектор состояний ЛСС;  $\eta$  – скалярная функция, являющаяся выходом ЛСС.

Вычисление элементов нестационарной матрицы  $\Lambda(k)$  производится по характеристическому уравнению пучка квадратичных форм

$$\begin{aligned} \det((A_i(\theta) + B_i K_i(k))^T P_i(k)(A_i(\theta) + B_i K_i(k)) - \mu_{ii}(k)P_i(k)) &= 0, \quad i = \overline{1, N}, \\ \det(F_{ij}^T(k)P_i(k)F_{ij}(k) - \mu_{ij}(k)P_j(k)) &= 0, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad j \neq i, \end{aligned} \quad (28)$$

где  $\lambda_{ij}(k) = [\mu_{ij}^{\max}(k)]^{1/2}$ ;  $\mu_{ij}^{\max}(k)$  – максимальное значение корня соответствующего характеристического уравнения.

В работе [13] сформулирована теорема, согласно которой для векторной (25) и общей (26) функций Ляпунова справедливы следующие неравенства, если элементы матрицы  $\Lambda(k)$  определяются согласно (28):

$$V(\xi(k) - \xi^*) \leq v(k), \quad V_0(\xi(k) - \xi^*) \leq \eta(k). \quad (29)$$

Элементы матрицы  $\Lambda(k)$  можно трактовать следующим образом: диагональные элементы  $\lambda_{ii}(k)$  дают оценку сверху коэффициентов передачи подсистем  $S_i$ , а внедиагональные элементы  $\lambda_{ij}(k)$  дают оценку сверху коэффициентов взаимосвязи между подсистемами  $S_i$  и  $S_j$ . Таким образом, система сравнения (27) покомпонентно мажорирует векторную (25) и общую (26) функции Ляпунова. В результате анализ устойчивости управляемой сети поставок  $S$  с децентрализованными регуляторами сводится к анализу ЛСС (27).

При построении модели сети поставок узлы нумеруются и группируются в соответствии со стадиями переработки сырья и полуфабрикатов, начиная с тех, на которые поступает внешний спрос. В результате, если граф, представляющий модель сети, не имеет циклов, то матрица динамики  $\Lambda(k)$  системы сравнения является нижнетреугольной. Поскольку замкнутые локальные подсистемы являются устойчивыми, то значения диагональных элементов матрицы  $\Lambda(k)$  являются положительными и меньше единицы:  $0 < \lambda_{ii}(k) < 1$ . В результате  $\forall k \Lambda(k)$  является нильпотентной и, таким образом, система сравнения (27) является устойчивой. Следовательно, управляемая сеть поставок  $S$ , состоящая из взаимосвязанных подсистем  $S_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , замкнутых локальными обратными связями с децентрализованными регуляторами (11), является устойчивой по Ляпунову.

**Численный пример.** В качестве примера рассмотрим сеть поставок, которая изучалась в работе [14]. Модель сети описывается графом  $G = (\{1, 2, 3, 4, 5\}, \{(5, 1), (5, 2), (5, 3), (4, 3), (3, 1), (3, 2)\})$ . Каждый из 5 узлов является однономенклатурной системой, то есть  $n_i = 1$ ,  $i = \overline{1, 5}$ . Представим управляемые потоки  $u_1, u_2, u_3$ , описывающие процессы сборки, в виде гипердуг, добавив два потока  $u_4$  и  $u_5$ , которые описывают поставки сырья извне (см. рис. 1). Дуги  $d_1, d_2$ , изображенные пунктиром, представляют внешний спрос. Значение времени транспортировки  $T_{i,j}$  и количество единиц продукции  $\Pi_{ij}$ , которое требуется в соответствии с технологическим процессом, указаны для каждого управляемого потока в круглых и квадратных скобках,

соответственно. Возле каждого узла указаны значения времени выполнения заказа  $T_i$ .

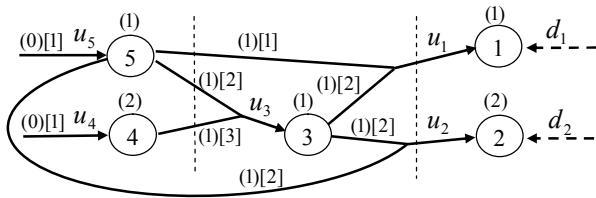


Рис. 1. Графическое представление модели сети

По формуле  $\Lambda_i = \max\{T_{j,i} + T_i, j = \overline{1,5}, j \neq i\}, i = \overline{1,5}$  определим величины запаздывания управляемых потоков всех узлов. В результате размерности расширенных моделей подсистем равны:  $N_1 = 3$ ,  $N_2 = 4$ ,  $N_3 = 3$ ,  $N_4 = 2$ ,  $N_5 = 3$ . Пусть время транспортировки ресурсов между узлами 3 и 1 в процессе функционирования может увеличиваться на один период, т.е.  $T_{3,1} \in \{1, 2\}$ . Тогда величина запаздывания управляемых потоков узла 1 может принимать значение из множества  $\Lambda_1 \in \{2, 3\}$ . В результате  $A_1(\theta) \in \Omega_1 = \text{Co}\{A_1^{(1)}, A_1^{(2)}\}$ , где

$$A_1^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad A_1^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Границные значения внешнего спроса предполагаются известными:  $d^{\min} = [10, 5]^T$ ,  $d^{\max} = [20, 10]^T$ . С помощью алгоритма (9) вычислим граничные значения внешних воздействий:  $w^{\min} = [10, 5, 30, 90, 80]^T$ ,  $w^{\max} = [20, 10, 60, 180, 160]^T$ . В соответствии с (12) вычислим размеры страховых запасов  $x_i^*, i = \overline{1,5}$ . Следуя [8], вычислим параметры эллипсоидов, аппроксимирующих множества значений внешних воздействий (в рассматриваемом примере эллипсоиды вырождаются в отрезки):  $Q_1^w = 25$ ,  $w_1^* = 15$ ;  $Q_2^w = 6.25$ ,  $w_2^* = 7.5$ ;  $Q_3^w = 225$ ,  $w_3^* = 45$ ;

$Q_4^w = 2025$ ,  $w_4^* = 135$ ;  $Q_5^w = 1600$ ,  $w_5^* = 120$ ; а также параметры эллипсоидов, аппроксимирующих множества значений состояний:  $Q_1^x = 1600$ ,  $Q_2^x = 900$ ,  $Q_3^x = 14400$ ,  $Q_4^x = 129600$ ,  $Q_5^x = 25600$ .

Границные значения состояний и управлений, начальные условия, а также размеры страховых запасов для всех узлов представлены в таблице, где также приведены выбранные значения диагональных элементов весовых матриц локальных критериев качества (14).

Таблица

Характеристики узлов сети поставок

$i$	$x_i^{\max}$ , ед.	$u_i^{\max}$ , ед.	$x_i^*$ , ед.	$x_i(0)$ , ед.	$w_i^\zeta$	$w_i^\mu$
1	80	20	40	40	5.0	1.0
2	60	10	30	30	3.0	1.2
3	240	55	120	120	4.0	2.0
4	720	150	360	360	5.0	1.0
5	320	160	160	160	2.0	1.3

Решение задачи (23) при ограничениях (20) – (22) получено с помощью пакета CVX [15]. Результаты моделирования для узла 1 при скачкообразно изменяющемся внешнем спросе представлены на рис. 2, где  $a$  – значения граничного, страхового и наличного уровней запаса;  $b$  – значения внешнего спроса и объемов заказов.

Построим векторную (25) и общую (26) функции Ляпунова, выбрав  $P_0 = [100, 120, 5, 0.1, 0.1]$ , а затем – систему сравнения (27). Матрица динамики системы сравнения  $\Lambda(k) \forall k$  является нильпотентной, следовательно, система управления запасами с децентрализованными регуляторами является устойчивой. Поскольку в момент начала моделирования каналы транспортировки ресурсов не были загружены, во всех узлах наблюдаются переходные процессы, длительности которых совпадают со значениями интервалов запаздывания управляемых потоков. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что локальные регуляторы обеспечивают полное и своевременное удовлетворение как внешнего, так и внутреннего спроса на ресурсы. При этом выполняются заданные локальные ограничения, поскольку объемы наличных запасов ресурсов и объемы заказов не превышают граничные значения.

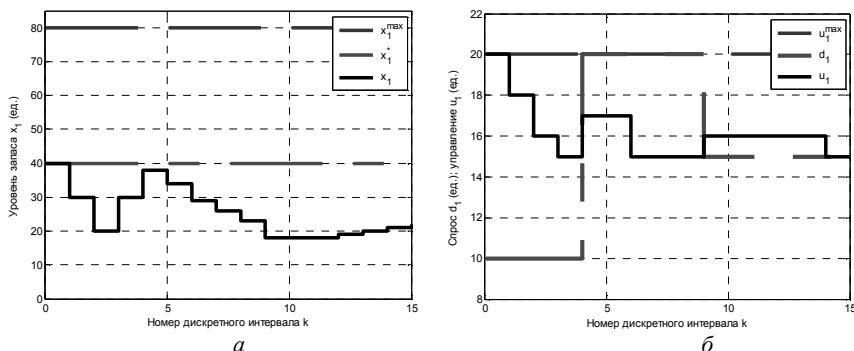


Рис. 2. Графики переходных процессов для узла 1 сети поставок

**Выводы.** В работе предложен подход к решению задачи синтеза децентрализованного управления запасами в сетях поставок. Локальные регуляторы строятся с использованием линейной динамической обратной связи по сигналу невязки между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов. Для подавления влияния возмущений, моделирующих изменения внешнего спроса, одновременно с обеспечением robustной устойчивости замкнутых локальных подсистем применен метод инвариантных эллипсоидов, что позволило сформулировать задачу в терминах линейных матричных неравенств, а синтез управления свести к последовательности задач полуопределенного программирования.

Новизна и практическая полезность работы заключается в усовершенствовании методики анализа устойчивости динамических управляемых сетевых систем на основе метода сравнения и метода векторных функций Ляпунова.

**Список литературы:** 1. Лотоцкий В.А. Модели и методы управления запасами / В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель. – М.: Наука, 1991. – 188 с. 2. Bertsekas D.P. Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty / D.P. Bertsekas, I. Rhodes // IEEE Trans. Automat. Control. – 1971. – Vol. 16. – P. 117-128. 3. Blanchini F. Set theoretic methods in control / F. Blanchini, S. Miani. – Boston: Birkhäuser, 2008. – 504 p. 4. Šiljak D.D. Decentralized Control of Complex Systems / D.D. Šiljak. – New York, Academic Press, 1991. – 527 p. 5. Rosinova D. Robust decentralized controller design: subsystem approach / D. Rosinova, N.Q. Thuau, V. Vesely, L. Marko // Journal of Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 63. – № 1. – P. 28-34. 6. Дорофеев Ю.И. Построение математических моделей управляемых сетей поставок с учетом запаздываний потоков / Ю.И. Дорофеев, А.А. Никульченко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – № 1. – С. 16-27. 7. Blanchini F. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays / F. Blanchini, R. Pesenti, F. Rinaldi, W. Ukovitch // IEEE Trans. on Robot. and Autom. – 2000. – Vol. RA-16. – № 3. – P. 313-317. 8. Дорофеев Ю.И. Синтез системы оптимального управления запасами с

дискретным ПИД-регулятором с использованием линейных матричных неравенств / Ю.И. Дорофеев // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 4 (41). – С. 34-41. 9. Поляк Б.Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: техника линейных матричных неравенств / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков. – М.: Ленанд, 2014. – 560 с. 10. Дорофеев Ю.И. Робастное стабилизирующее управление запасами в сетях поставок в условиях неопределенности внешнего спроса и интервалов задержки пополнения запасов / Ю.И. Дорофеев, Л.М. Любчик, А.А. Никульченко // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 5. – С. 146-160. 11. Воронов А.А. Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости / А.А. Воронов, В.М. Матросов. – М.: Наука, 1987. – 312 с. 12. Šiljak D.D. Robust stability of discrete systems / D.D. Šiljak, M.E. Sezer // Int. J. Control. – 1988. – Vol. 48 (5). – P. 2055-2063. 13. Бобцов В.В. Управление непрерывными и дискретными процессами / В.В. Бобцов, Г.И. Болтунов, С.В. Быстров, В.В. Григорьев. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 175 с. 14. Hennet J.-C. A bimodal scheme for multi-stage production and inventory control / J.-C. Hennet // Automatica. – 2003. – Vol. 39. – P. 793-805. 15. Grant M. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 1.21. / M. Grant, S. Boyd. – Режим доступа : <http://cvxr.com/cvx>.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Lotockij V.A.* Modeli i metody upravlenija zapasami / V.A. Lotockij, A.S. Mandel'. – M.: Nauka, 1991. – 188 p. 2. *Bertsekas D.P.* Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty / D.P. Bertsekas, I. Rhodes // IEEE Trans. Automat. Control. – 1971. – Vol. 16. – P. 117-128. 3. *Blanchini F.* Set theoretic methods in control / F. Blanchini, S. Miani. – Boston: Birkhäuser, 2008. – 504 p. 4. *Šiljak D.D.* Decentralized Control of Complex Systems / D.D. Šiljak. – New York, Academic Press, 1991. – 527 p. 5. *Rosinova D.* Robust decentralized controller design: subsystem approach / D. Rosinova, N.Q. Thuan, V. Vesely, L. Marko // Journal of Electrical Engineering. – 2012. – Vol. 63. – № 1. – P. 28-34. 6. *Doroфеев Ju.I.* Postroenie matematicheskikh modelej upravlyayemykh setej postavok s uchetom zapazdyvaniy potokov / Ju.I. Doroфеев, A.A. Nikul'chenko // Sistemni doslidzhennja ta informacijni tehnologii. – 2013. – № 1. – S. 16-27. 7. *Blanchini F.* Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays / F. Blanchini, R. Pesenti, F. Rinaldi, W. Ukovich // IEEE Trans. on Robot. and Autom. – 2000. – Vol. RA-16. – № 3. – P. 313-317. 8. *Doroфеев Ju.I.* Sintez sistemy optimal'nogo upravlenija zapasami s diskretnym PID-regulyatorom s ispol'zovaniem linejnyh matrichnyh neravenstv / Ju.I. Doroфеев // Zbirnik naukovih prac' Harkiv'skogo universitetu Povitrijanih Sil. – H.: HUPS, 2014. – Vip. 4 (41). – P. 34-41. 9. *Poljak B.T.* Upravlenie linejnymi sistemami pri vnesnihnich vozmushhenijah: tehnika linejnyh matrichnyh neravenstv / B.T. Poljak, M.V. Hlebnikov, P.S. Shherbakov. – M.: Lenand, 2014. – 560 p. 10. *Doroфеев Ju.I.* Robastnoe stabilizirujushhee upravlenie zapasami v setjah postavok v uslovijah neopredelennosti vneshnego sprosa i intervalov zaderzhki popolnenija zapasov / Ju.I. Doroфеев, L.M. Ljubchik, A.A. Nikul'chenko // Izvestija RAN. Teoriya i sistemy upravlenija. – 2014. – № 5. – P. 146-160. 11. *Voronov A.A.* Metod vektornyh funkciij Ljapunova v teorii ustojchivosti / A.A. Voronov, V.M. Matrosov. – M.: Nauka, 1987. – 312 p. 12. Šiljak D.D. Robust stability of discrete systems / D.D. Šiljak, M.E. Sezer // Int. J. Control. – 1988. – Vol. 48 (5). – P. 2055-2063. 13. *Bobcov V.V.* Upravlenie nепрерывными i дискретными processami / V.V. Bobcov, G.I. Boltunov, S.V. Bystriv, V.V. Grigor'ev. – Spb.: SPbGU ITMO, 2010. – 175 p. 14. *Hennet J.-C.* A bimodal scheme for multi-stage production and inventory control / J.-C. Hennet // Automatica. – 2003. – Vol. 39. – P. 793-805. 15. *Grant M.* CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 1.21 / M. Grant, S. Boyd. – Rezhim dostupa : <http://cvxr.com/cvx>.

*Поступила (received) 28.09.2015*

*Статью представил д-р техн. наук, проф. кафедры компьютерной математики и математического моделирования НТУ "ХПИ"  
Любчик Л.М.*

Dorofeev Yuri, Cand.Tech.Sci., Docent  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkiv, Ukraine, 61002  
tel./phone. (057) 707-61-03, e-mail: dorofeev@kpi.kharkiv.edu  
ORCID ID: 0000-0002-7964-1286

УДК 004.94:519.6

**B.B. ЖИХАРЕВИЧ**, канд. фіз.-мат. наук, доц., ЧНУ  
ім. Ю.Федьковича, Чернівці,  
**К.П. ГАЗДЮК**, асистент, ЧФ НТУ "ХПІ", Чернівці

**АЛГОРИТМ ВИЗНАЧЕННЯ СУСІДНІХ ЕЛЕМЕНТІВ  
МНОЖИН РУХОМИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ ЗА УМОВ  
ФІКСОВАНОЇ КІЛЬКОСТІ СУСІДІВ**

Розглянуто основні алгоритми пошуку найближчих сусідів для безсіткових методів моделювання фізичних процесів. На основі проведеної аналогії рухомих частинок із рухомими клітинними автоматами, запропоновано та досліджено новий алгоритм пошуку сусідів за умов їх фіксованої кількості. На прикладах рівномірного та довільного розподілу автоматів проілюстровано запропонований алгоритм. Іл.: 8. Бібліогр.: 9 назв.

**Ключові слова:** безсітковий метод, рухомі клітинні автомати, алгоритм пошуку сусідів.

**Постановка проблеми.** Існує ряд задач, які мають велике прикладне значення для моделювання взаємодії та деформації тіл, протікання рідин, процесів теплопередачі, астрофізики тощо. З ростом продуктивності комп'ютерної техніки все більшої популярності для розв'язку таких задач набувають безсіткові методи [1, 2], які апроксимують рівняння з частинними похідними, ґрунтуючись лише на наборі вузлів, без використання розрахункової сітки. В таких методах обов'язковим є визначення частинок, які взаємодіють між собою, тобто поняття сусідства частинок. Існує ряд алгоритмів визначення сусідства довільної множини дискретних елементів, які відрізняються продуктивністю та об'ємом використовуваних додаткових допоміжних ресурсів. Зазвичай оптимальний вибір того чи іншого алгоритму здійснюється із врахуванням особливостей модельованої системи. Наприклад, при моделюванні процесів пластичної деформації можна одноразово на початковому етапі, згідно заданої схеми сусідства, визначити сусідів для всієї множини автоматів. Цю інформацію можна занести у допоміжний індексний масив, вміст якого буде незмінним впродовж процесу моделювання. Звичайно, наведений приклад є частковим випадком широкого спектру модельованих динамічних систем. При моделюванні довільної системи методом РКА можливі такі зміщення окремих автоматів, при яких вони вийдуть за межі свого сусідства в околицю іншого. В цьому випадку необхідно визначити нових сусідів. Існуючі алгоритми пошуку сусідів передбачають можливість існування довільної

змінної кількості сусідів для різних дискретних елементів. В той же час, очевидно, що в межах будь-якої множини сусідів, можна виділити підмножину, взаємодія із якою є визначальною, а вплив решти елементів є несуттєвим.

**Аналіз літератури.** Найпростішим підходом до пошуку сусідів є повний перебір всеможливих пар частинок, проте при збільшенні кількості частинок в 10 разів затрати часу та ресурсів на пошук сусідів збільшаться у 100 разів, що значною мірою ускладнює обчислювальний процес. При необхідності пошуку лише одного найближчого сусіда зазвичай використовують метод kD-дерева [3], а також окто-дерева [4], у випадку сусідства згідно заданого радіусу взаємодії. Недоліком окто-дерев є їх ієрархічна структура даних, яка моделює ієрархічну структуру процесів. При значній кількості частинок виникає необхідність моделювання протікання паралельних процесів, і пошуку алгоритму для паралельних задач. В [5 – 7] описані методи, які полягають в розбитті області на комірки нерухомою сіткою різної розмірності в залежності від поставлених задач. В останні роки широкого застосування набули клітинні автомати (КА) [8] та рухомі клітинні автомати (РКА) [9], які не мають жорсткої прив'язки до просторової стаціонарної решітки та можуть набувати довільних значень у просторі. Це дозволяє провести чітку аналогію із безсітковими методами моделювання.

**Мета роботи.** В даній роботі пропонується алгоритм пошуку сусідів, заснований на ідеї фіксованої кількості сусідів (аналог фіксованої схемі сусідства для класичних КА).

**Реалізація алгоритму.** Вся множина автоматів нумерується (індексується) і для кожного окремого КА вказуються індекси його сусідів. Далі, на кожному кроці взаємодії, яке передбачає зокрема і зміну координат КА, відбувається порівняння відстаней до "віддалених" сусідів (сусідів вираного сусіда). Якщо деяка відстань виявиться меншою за "ближній" максимум, то більшім встановлюється індекс "віддаленого" сусіда.

Кількість сусідів може бути довільною. Якщо автомати, що моделюють деяку систему, не взаємодіють один з одним, то сусідство може бути відсутнє взагалі (нульова кількість). І навпаки, якщо є необхідність організувати взаємодію кожного автомата зі всією множиною одночасно, то кількість сусідів може дорівнювати повній кількості автоматів у системі мінус один. Нехай, для прикладу, кожен автомат має по шість сусідів (рис. 1). На кожному кроці алгоритму обирається зі всієї множини один автомат (замальовано чорним

кольором) та визначається максимальна відстань до його сусідів (позначене пунктирним колом). Далі випадковим чином обирається один із сусідніх автоматів (замальовано сірим кольором із точкою), з яким по-перше, може бути організовано взаємодію, а по-друге, використовуючи його як автомат-посередник, відшуковуються індекси та координати "віддалених" сусідів (білі автомати, з'єднані із посередником пунктирними лініями).

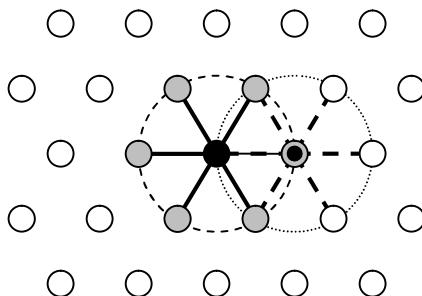


Рис. 1. Схематичне зображення фрагменту множини рухомих клітинних автоматів, де чорним кольором замальовано обраний для взаємодії автомат, сірим – його найближчі сусіди, а сірим із точкою – автомат-посередник для пошуку "віддалених" сусідів

Припустимо, що в системі відбулися деякі зміщення рухомих клітинних автоматів, як показано на рис. 2. В результаті такого зміщення, як видно із рисунку, виявляється, що деякий "віддалений" сусід стає більш чим до обраного автомата у порівнянні із максимально віддаленим "бліжнім" сусідом, радіус-вектор до якого описує пунктирне коло. У нашому випадку кількість найближчих сусідів до будь-якого автомата є фіксованою, а отже необхідно замінити індекс максимально віддаленого "бліжнього" сусіда на індекс відповідного "віддаленого" сусіда, що потрапляє у межі пунктирного кола. Якщо таких автоматів є декілька, обирається найближчий з них.

Результати роботи описаного алгоритму зображені на рис. 3. Крім того, тут зображені зміни сусідів для автомата-посередника. Звичайно, для цього необхідно, щоб автомат-посередник був обраний для взаємодії автомата у подальших кроках ітераційного циклу клітинно-автоматних взаємодій. Якщо порівнювати рис. 2 та 3, то можна відмітити зменшення радіус-векторів, що визначають відстань між обраними автоматами та максимально віддаленими найближчими сусідами.

Таким чином, очевидно, що при довільному випадковому визначенні початкового стану допоміжного індексного масиву сусідства, в результаті роботи запропонованого алгоритму через певну кількість кроків ітераційного циклу клітинно-автоматичних взаємодій, індексний масив самовільно впорядкується за принципом мінімально можливих відстаней між будь-яким автомата та його найближчими сусідами.

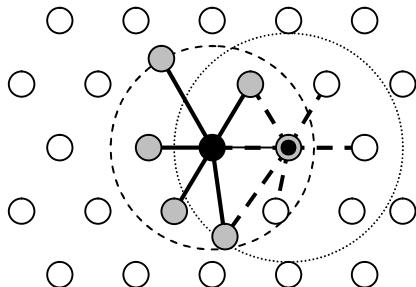


Рис. 2. Схематичне зображення деякого зміщення координат у околі обраного автомата та автомата-посередника

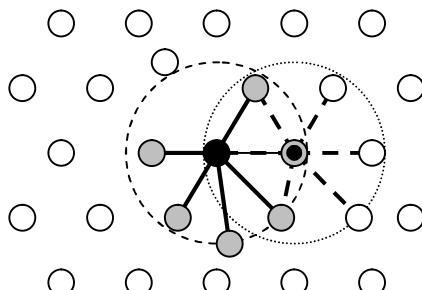


Рис. 3. Схематичне зображення результатів визначення нових сусідів для обраного автомата та автомата-посередника

Продемонструємо це на прикладах. Нехай маємо рівномірний розподіл скінченої кількості рухомих автоматів у деякому обмеженому просторі (рис. 4). Результат роботи запропонованого алгоритму зображено на рис. 5. Видно, що в центральній частині множини автоматів має місце чітке регулярне визначення сусідів, а у граничному шарі – деяке спотворення. На рис. 6, 7 наведено початковий та кінцевий стан зв’язків між сусідами для випадкового розподілу клітинних автоматів у просторі.

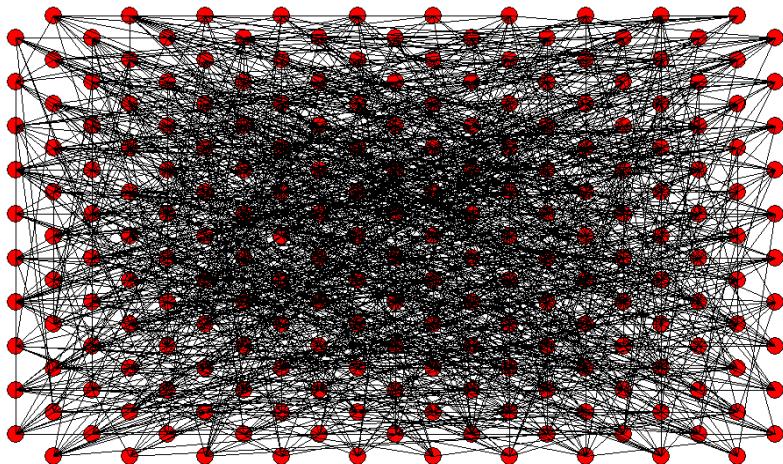


Рис. 4. Приклад випадкового початкового формування зв'язків сусідства для рівномірного розподілу клітинних автоматів у просторі

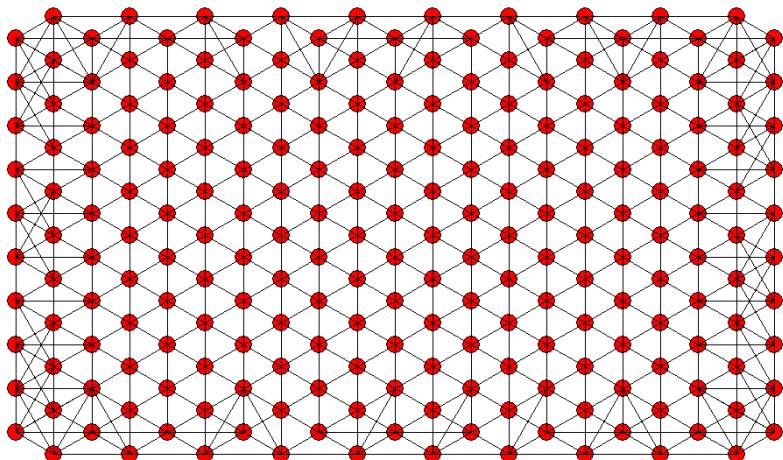


Рис. 5. Результат роботи алгоритму щодо впорядкування індексного масиву сусідства виходячи з критерію мінімальних відстаней до сусідів для рівномірного розподілу клітинних автоматів у просторі

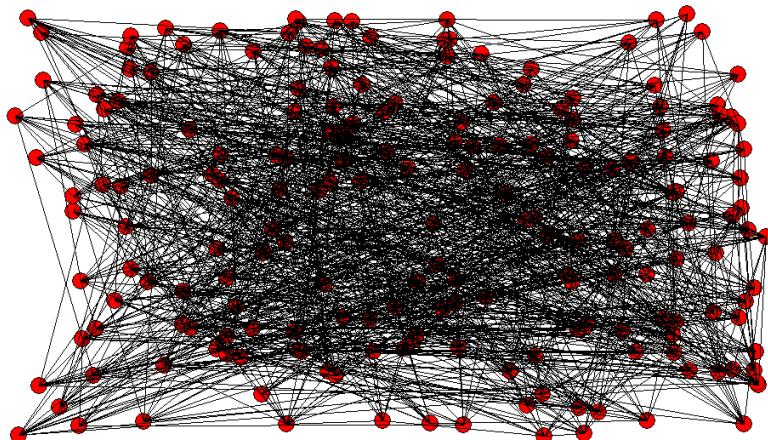


Рис. 6. Приклад випадкового початкового формування зв'язків сусідства для випадкового розподілу клітинних автоматів у просторі

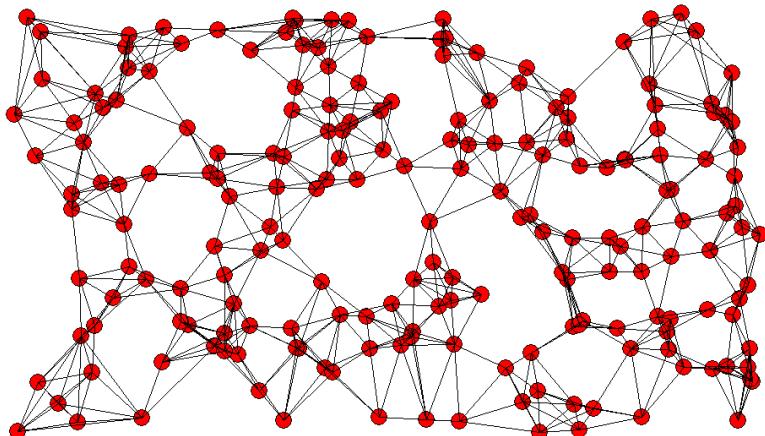


Рис. 7. Результат роботи алгоритму щодо впорядкування індексного масиву сусідства виходячи з критерію мінімальних відстаней до сусідів для випадкового розподілу клітинних автоматів у просторі

Для оцінки даного алгоритму наведемо порівняльні характеристики залежності часу на пошук сусідів від кількості частинок для методу

повного перебору та запропонованого нами (рис. 8). Методи будемо реалізовувати виходячи з критерію мінімальних відстаней до сусідів.

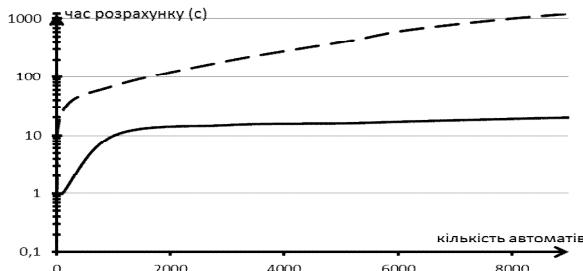


Рис. 8. Залежність часу на пошук сусідів від кількості частинок. Метод повного перебору – пунктирна лінія. Алгоритм щодо впорядкування індексного масиву сусідства – суцільна лінія

Звісно, методи окто-дерев, хеш-таблиць та розглянуті в [5 – 7] також є досить ефективними та значною мірою оптимізують обчислювальний процес, проте одні з них є чутливими до нерівномірності розподілу частинок [7], інші потребують потужних та дорого вартісних програмно-апаратних комплексів. Запропонований нами підхід позбавлений цих недоліків.

**Висновки.** Реалізовано алгоритм пошуку сусідів за умови їх фіксованої кількості шляхом введення допоміжного індексного масиву сусідства. Продемонстровано результати роботи алгоритму щодо впорядкування індексного масиву сусідства виходячи з критерію мінімальних відстаней до сусідів для рівномірного та випадкового розподілу клітинних автоматів у просторі.

**Список литературы:** 1. Афанасьев К.Е. Направления научных исследований кафедры ЮНЕСКО по новым информационным технологиям. Часть 2. Бессеточные методы / К.Е. Афанасьев, С.Н. Карабцев, Р.С. Макарчук, Т.С. Рейн // Вестник КемГУ. – 2013. – № 3 (55). – Т. 2. – С. 27-55. 2. Gingold R.A. Smoothed Particle Hydrodynamics. Theory and Application to Nonspherical Stars / R.A. Gingold, J.J. Monahan. – Monthly Notices Royal Astr. Soc., 1977. – 181 p. 3. Moore A. An introductory tutorial on kd-trees [Електронний ресурс] / Andrew W. Moore. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.autonlab.org/autonweb/14665/version/2/part/5/data/moore-tutorial.pdf?branch=main&language=en>. 4. Потапов А.П. Численное моделирование высокоскоростных соударений деформируемых тел методом сглаженных частиц: дис. на соискание уч. степени канд. фіз.-мат. наук: спец. 05.13.18 "Мат. моделирование, численные методы и комплексы программ" / Потапов Антон Павлович. – Москва, 2009. – 107 с. 5. Хокни Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Истбуд. – М.: Мир, 1987. – 638 с. 6. Калион В.А. Використання методу гідромеханіки згладжених частинок для розвязання задач гідромеханіки довкілля. / В.А. Калион, І.О. Бровченко, А.О. Кущан // Вісник Київського університету. – 2007. – № 4. – С. 77-83. 7. Афанасьев К.Е. Алгоритм поиска ближайших соседей в методе сглаженных частиц и его

параллельная реализация / К.Е. Афанасьев, Р.С. Макарчук, А.Ю. Попов. // Журнал "Вычислительные технологии". – 2008. – № 5. – С. 9-13. 8. Аладьев В.З. Класические однородные структуры. Клеточные автоматы. [Электронный ресурс] / В.З. Аладьев. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: <http://elib.grsu.by/katalog/134963-249078.pdf>. 9. Добрынин С.А. Развитие метода подвижных клеточных автоматов для моделирования генерации и распространения упругих волн при контактном взаимодействии твердых тел: дис. на соискание уч. степени канд. физ.-мат. наук спец. 01.02.04 – "Механика деформируемого твердого тела", 01.04.07 – "Физика конденсированного состояния" [Электронный ресурс] / Сергей Александрович Добрынин. – Томск, 2009. – Режим доступа до ресурсу: [http://serg-dobrinin.narod.ru/disert/1\\_title\\_15-12-2009.pdf](http://serg-dobrinin.narod.ru/disert/1_title_15-12-2009.pdf)

**Bibliography (transliterated):** 1. Afanas'ev K.E. Napravlenija nauchnyh issledovanij kafedry JuNESKO po novym informacionnym tehnologijam. Chast' 2. Bessetochnye metody / K.E. Afanas'ev, S.N. Karabcev, R.S. Makarchuk, T.S. Rejn // Vestnik KemGU. – 2013. – № 3 (55). – T. 2. – P. 27-55. 2. Gingold R.A. Smoothed Particle Hydrodynamics. Theory and Application to Nonspherical Stars / R.A. Gingold, J.J. Monahan. – Monthly Notices Royal Astr. Soc., 1977. – 181 p. 3. Moore A. An introductory tutorial on kd-trees [Elektronniy resurs] / Andrew W. Moore. – Rezhim dostupu do resursu: <http://www.autonlab.org/autonweb/14665/version/2/part/5/data/moore-tutorial.pdf?branch=main&language=en>. 4. Potapov A.P. Chislennoe modelirovanie vysokoskorostnyh soudarenij deformiruemyh tel metodom sglazhennyh chastic: dis. na soiskanie uch. stepeni kand. fiz.-mat. nauk: spec. 05.13.18 "Mat. modelirovanie, chislennye metody i kompleksy programm" / Potapov Anton Pavlovich. – Moskva, 2009. – 107 p. 5. Hokni R. Chislennoe modelirovanie metodom chastic / R. Hokni, Dzh. Istvud. – M.: Mir, 1987. – 638 p. 6. Kalion V.A. Vikoristannja metodu gidromehaniki zgladzhenih chasticok dlja rozyazannija zadach gidromehaniki dovskyillja. / V.A. Kalion, I.O. Brovchenko, A.O. Kushhan // Visnik Kiiv'skogo universitetu. – 2007. – № 4. – P. 77-83. 7. Afanas'ev K.E. Algoritm poiska blizhajshih sosedej v metode sglazhennyh chastic i ego parallel'naja realizacija / K.E. Afanas'ev, R.S. Makarchuk, A.Ju. Popov // Zhurnal "Vychislitel'nye tehnologii". – 2008. – № 5. – P. 9-13. 8. Alad'ev V.Z. Klasicheskie odnorodnye struktury. Kletochnye avtomaty. [Elektronniy resurs] / V.Z. Alad'ev. – 2009. – Rezhim dostupu do resursu: <http://elib.grsu.by/katalog/134963-249078.pdf>. 9. Dobrynin S.A. Razvitiye metoda podvizhnyh kletochnyh avtomatov dlja modelirovaniya generacii i rasprostraneniya uprugih voln pri kontaktnom vzaimodejstvii tverdyh tel: dis. na soiskanie uch. stepeni kand. fiz.-mat. nauk spec. 01.02.04 – "Mehanika deformiruemogo tverdogo tela", 01.04.07 – "Fizika kondensirovannogo sostojaniya" [Elektronniy resurs] / Sergej Aleksandrovich Dobrynin. – Tomsk, 2009. – Rezhim dostupu do resursu: [http://serg-dobrinin.narod.ru/disert/1\\_title\\_15-12-2009.pdf](http://serg-dobrinin.narod.ru/disert/1_title_15-12-2009.pdf)

Надійшла (received) 10.08.2015

*Статью представил д.т.н., проф. НТУ "ХПИ" Поворознюк А.И.*

Zhikharevich Vladimir, PhD, Math-ph  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Str. Universytetska 28, Chernivtsi, Ukraine, 58012  
tel./phone: (050) 254-21-73, e-mail: vzhikhar@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0003-4882-2954

Gazdiuk Kateryna, master  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Str. Universytetska 28, Chernivtsi, Ukraine, 58012  
tel./phone: (066) 491-47-42, e-mail: kateryna.gazdyik@gmail.com

**Г.В. КУЛИНЧЕНКО**, канд. техн. наук, доц., СумГУ, Сумы,  
**Е.Н. МОЗОК**, аспирант, СумГУ, Сумы

## **АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ**

Исследованы возможности построения аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего визуализацию полей термических печей. Модернизация инструментария по обработке первичных сигналов с датчиков, прогрессивные программные средства и алгоритмы позволяют получать распределения теплового поля в режиме реального времени. Результаты оценки теплового поля используют для управления процессом термообработки в режиме реального времени. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 16 назв.

**Ключевые слова:** распределение теплового поля, визуализация полей, режим реального времени, аппаратно-программный комплекс.

**Постановка проблемы.** Электрический нагрев имеет широкое распространение в различных отраслях промышленности. Преимущество электронагрева по сравнению с нагревом в пламенных печах заключается в возможности обеспечения больших скоростей нагрева, высокой точности и равномерности нагрева вследствие легкости регулирования электрического и температурного режимов. Эффективность работы электрических печей достигается в результате широкого использования средств автоматизации технологических процессов нагрева.

В высокотемпературной электрической печи сопротивления, где доминирует передача тепла излучением, единственным способом создания заданного теплового поля на объекте является генерация соответствующего теплового поля на поверхности рабочего пространства печи [1], что предопределяет необходимость фиксации изменений поля во времени. Для корректного управления процессом нагрева в печах, помимо задачи слежения за распределением поля температур самой печи, необходимо учитывать характер изменения температуры обрабатываемого изделия. Для контроля нагрева металла приходится использовать измерители, которые обеспечивают измерения температуры непосредственно на поверхности металла [2].

Необходимость получения информации о текущем распределении поля термопечи и поля объекта обуславливает стремление к разработке соответствующих средств отображения данных о ходе процесса.

Известные разработки в области измерения полей температур

© Г.В. Кулинченко, Е.Н. Мозок, 2015

частично решают проблемы мониторинга полей термообработки металлов. При этом рекламируемые аппаратно-программные комплексы, в силу большого объема решаемых задач, отличаются неприемлемой для производственных условий стоимостью.

В работе решается проблема разработки нового метода измерения тепловых полей и построения недорогого аппаратно-программного комплекса для мониторинга тепловых полей в режиме реального времени. В техническом плане ставится задача идентификации параметров теплового поля на базе минимальных аппаратурных затрат.

**Анализ литературы.** В упрощенных задачах оценки состояния теплового поля печи допускается, что температура объекта соответствует усредненной температуре термопечи. Однако реальные измерения температур нагреваемого объекта и печного пространства в его разных точках показывают, что упомянутые температуры существенно разнятся между собой, соответственно для получения корректных оценок поля приходится усложнять используемые технические средства.

Известны системы измерения, в которых оценка измеряемого параметра производится по взвешенным сигналам пирометров, установленных в определенных точках печи и направленных на поверхность металла. Если металл имеет невысокую температуру относительно излучающих на него поверхностей (стен, свода), и особенно при низкой степени черноты металла, то измерение температуры поверхности металла пирометром невозможно из-за большой доли отраженного излучения.

Наличие погрешностей измерений в реализации измерений температуры металла, связанных с наличием поглощающей газовой среды, влиянием отраженного излучения, неопределенностью степени черноты металла (окалины), привело к созданию двухдатчиковых систем измерения, состоящих из пирометра, направленного на поверхность металла, и датчика корректирующего сигнала (например, пирометра, визированного на футеровку) [3]. Такой подход предполагает использование измеряемой пирометром эффективной температуры кладки, что дает возможность по измеренным угловым коэффициентам излучения, спектральной степени черноты металла скорректировать на основе аппроксимирующих полиномов температуру металла.

Предлагаемые разными авторами системы для построения температурного поля, наряду с достигнутыми положительными результатами, имеют определенные недостатки. Зачастую предложенные решения не предусматривают работу в режиме реального времени [4], либо имеют слишком перегруженный для этого математический аппарат

[5]. Часть решений для достижения режима реального времени основываются на перегруженной аппаратной части [6].

Существующие расчетные методы в силу ряда присущих им недостатков (громоздкость вычислений, малая точность, нестационарность параметров и др.) не позволяют получать объективные параметры теплового поля. Известные алгоритмы уточненного определения температуры металла сложны и могут применяться на крупных металлургических печах. Для небольших нагревательных и термических печей с энергосберегающими технологиями использование дорогостоящих пиromетров и громоздкого программного обеспечения представляется недостаточно экономически эффективным. Поэтому для идентификации параметров тепловых полей и реализации заданных законов управления нагрева/охлаждения целесообразно использовать традиционные способы измерения поля температур печи с обработкой полученных данных на основе компьютерного моделирования.

До настоящего времени не сформировано четких критериев и подходов к построению промышленных анализаторов распределения теплового поля. Варианты устройств, позволяющих строить тепловые поля, реализуются либо для объектов компактных габаритов [7], либо имеют исследовательский характер [8]. Анализ экспериментальных данных ведется специализированным программным обеспечением, что значительно увеличивает стоимость анализаторов.

**Цель работы** заключается в разработке метода исследования тепловых полей на основе экспериментальных данных и соответствующего измерительного комплекса, позволяющего вести контроль за ходом процесса в реальном масштабе времени.

При этом необходимо определить функции, решаемые техническим и программным обеспечением комплекса, поскольку традиционно поставленная задача решается за счет чрезмерного усложнения программного обеспечения либо за счет использования дорогостоящих средств автоматизации.

**Построение аппаратно-программного комплекса.** Для реализации поставленной цели исследований разработан аппаратно-программный комплекс (АПК) оценки тепловых полей. Структура АПК включает в себя устройство сбора и передачи данных, получаемых от поля датчиков, которые регистрируют параметры объекта. Благодаря программному обеспечению, которое включает математическую модель термических процессов печи, осуществляется мониторинг процесса обработки металла в режиме реального времени.

Для настройки модели рассчитанные значения теплового поля  $T_M$  сравниваются с реально измеренными температурами  $T_R$  в соответствующих точках. При необходимости производится подстройка весовых коэффициентов расчетной матрицы  $\Delta A$ . Этот итерационный процесс продолжается до совпадения расчетных значений поля с реальными с заданной точностью. В результате на мониторе АПК осуществляется визуализация теплового поля в масштабе реального времени.

Для минимизации времени вычислений с помощью сложной математической модели, какой является модель теплового поля печи, принимаются следующие допущения [9]:

- преобладающую роль в физических процессах электрической печи играет передача тепла излучением;
- поверхности тел, взаимодействующих в процессах – серые;
- поверхности тел являются диффузно поглощающими и диффузно излучающими;
- температура излучения нагревательных элементов рассматривается как заданная исходная величина по отношению к температуре пространства печи и металла.

При рассмотрении тепловых процессов в пространстве печи определяющую роль играет конвективный перенос тепла, в то же время при нагреве заготовки наиболее существенной является передача тепла излучением.

Программное обеспечение комплекса базируется на решении дифференциальных уравнений теплопроводности. Система уравнений в частных производных, позволяющая описать распространение тепловой энергии в пространстве, имеет вид [10]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q + h(T_u - T), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность;  $C$  – теплоемкость;  $T$  – температура тела, участвующего в теплообмене;  $\nabla$  – градиент;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $Q$  – энергия источника тепла;  $h$  – коэффициент конвективного теплообмена;  $T_u$  – внешняя температура. Физические параметры соответствующих объектов (стенки, воздуха, заготовки) являются табличными величинами и задаются в зависимости от температуры.

Начальную температуру элементов печи принимаем равномерно распределенной и равной температуре окружающей среды. Эта температура определяет значения физических параметров элементов печи, участвующих в процессах теплообмена. Границные условия при упрощенном варианте моделирования представляем в виде

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q(x, y, z, t), \quad (2)$$

где  $n$  – нормаль к границе;  $q$  – плотность теплового потока от стены по координатам  $x, y, z$ ;  $t$  – время.

Краевые условия для решения уравнений формируются из условия баланса входящего и исходящего излучений. Этот баланс определяется результатом взаимодействия конвективной и кондуктивной составляющих переноса тепла.

Тогда для серых тел поток излучения записывается в виде [9]

$$q = \varepsilon(G - \sigma T^4), \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  – излучательная способность поверхности;  $G$  – падающий на поверхность тела радиационный поток (поток облучения);  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T$  – температура излучающей поверхности.

Интересующую нас температуру на поверхности заготовки можно определить из потока излучения [11]

$$T_n = T_{\text{нач}} + \left( 0.5q \frac{s}{\lambda} \right) (2F_{\text{Ом}} + 2/3), \quad (4)$$

где  $T_n$  – температура поверхности заготовки;  $T_{\text{нач}}$  – начальная температура заготовки;  $s$  – толщина заготовки;  $F_{\text{Ом}}$  – параметр Фурье.

Исходя из приведённых уравнений, оценка полей производится в следующей последовательности. Для каждого элемента модели (стена, воздушное пространство печи, заготовка) задаются соответствующие значения физических параметров (температура, плотность, теплоемкость, теплопроводность и т.д.). Вся область моделирования, в соответствии с алгоритмом метода конечных элементов (МКЭ), делится на треугольные для уточнения и установки разных параметров. Таким образом нелинейные зависимости, описывающие процессы теплообмена, преобразуются в систему линейных алгебраических элементов, что позволяет численно рассчитывать значения функций в узлах [12].

Визуализация кадров поля осуществляется циклически со скоростью, которая определяется производительностью вычислительного устройства (ПК). Поэтому время вычисления одного кадра визуализации должно быть меньше постоянных времени изменения краевых условий печи.

Построение температурного поля печи и заготовки, в соответствии с принятым для тестирования АПК алгоритмом, осуществляется на основании данных, получаемых от датчиков, установленных на стенах печи. Эти данные и определяют граничные условия на стенках печи.

Температура печного пространства рассчитывается в результате решения уравнения (1). Учет величины потока излучения (3), используя соотношение (4), позволяет оценить температуру заготовки [13].

Получение реальных значений температур в камере и на стене печи, дальнейшая их обработка, обеспечивается устройством связи с объектом (УСО), в котором осуществляется нормализация и усиление сигналов от датчиков температуры. В качестве датчиков температуры используются термоэлектрические преобразователи ТХА тип К, с диапазоном измерения:  $-270 - 1350^{\circ}\text{C}$ . УСО реализовано на плате *Arduino Leonardo* на базе микроконтроллера (МК) *ATmega32u4*. Данная плата имеет 20 цифровых вводов/выводов, 10 разрядный АЦП, аппаратная поддержка *UART, SB, I2C* [14]. Для согласования сигнала термопары со входом АЦП используется многоканальный операционный усилитель.

С помощью программы, хранящейся в памяти МК, устройство проводит опрос датчиков температуры и усредняет значения по нескольким выборкам перед его передачей в промышленный компьютер. Схема системы сбора и передачи информации представлена на рис. 1.

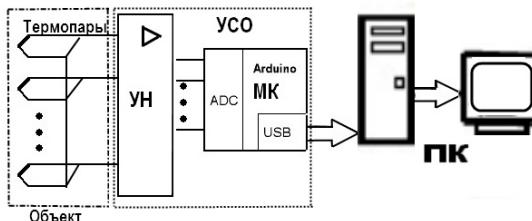


Рис. 1. Система сбора и передачи информации  
УН – усилитель-нормализатор; УСО – устройством связи с объектом; МК – микроконтроллер *Arduino*; ПК – промышленный компьютер

В качестве программного обеспечения для решения задачи теплообмена на персональном компьютере используется среда MatLab с подключенным к ней модулем PDE Toolbox, предназначенным для проведения расчетов и моделирования физических процессов методом конечных элементов [15]. Передачей данных, расчетом и визуализацией управляет программа с соответствующими функциями, оформленная в виде M-файла Matlab. Пример моделирования пространства печи с помещенной заготовкой из углеродистой стали показан на рис. 2, где через  $X$ ,  $Y$  обозначены оси координат печного пространства, при этом считается, что поле по координате  $Z$  изменяется незначительно.

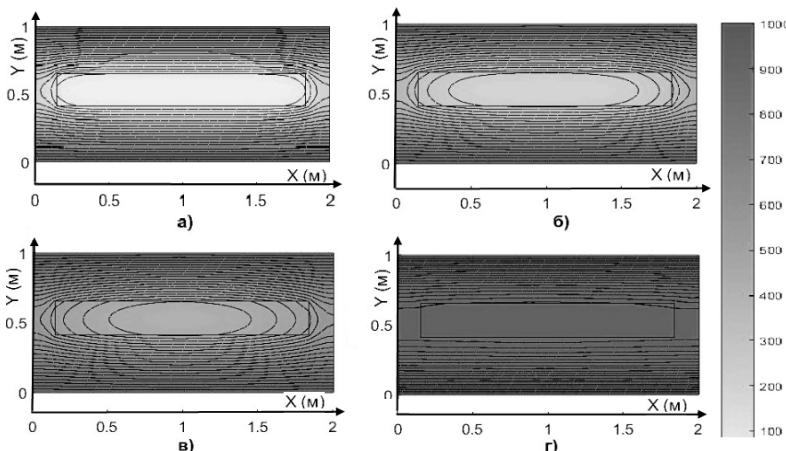


Рис. 2. Результаты моделирования  
а)  $t = 1$ , б)  $t = 10$ , в)  $t = 50$ , г)  $t = 100$

На рисунках представлены состояния печи и заготовки в различные моменты условного времени. Из рис. 2 видно, что с течением времени температура заготовки, находящейся в печи, уравнивается с температурой среды печи. Характерным для процесса нагрева является уменьшение турбулентностей теплового поля печи и заготовки.

Оценка реализации модели при построении одного визуализируемого кадра с разным количеством элементов приведены в таблице.

Таблица

Результаты моделирования

№	Кол-во узлов	Кол-во сторон	Кол-во треугольников	Время моделирования, с
1	1421	212	2720	4,65
2	5561	424	10880	9,26
3	22001	848	43520	33,63

Анализ результатов моделирования показывает, что платой за точность расчетов является потеря производительности расчетов модели. Поэтому условия компромисса являются предметом дальнейших исследований. Для увеличения точности и уменьшения времени расчетов предполагается использовать датчики теплового потока, что позволит корректировать параметры модели по экспериментальным данным, получаемым с объекта. Задача повышения производительности расчетов для реализации модели в режиме реального времени обуславливает

использование алгоритмов высокопроизводительных компьютерных вычислений [16]. Данный подход позволит свести к минимуму аппаратную часть АПК, при этом сохранив необходимую точность и скорость расчетов.

**Выводы.** Исследование возможностей построения аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего визуализацию тепловых полей термической печи показало, что для осуществления мониторинга процесса термообработки требуется модернизация имеющихся на рынке технических средств измерения. В связи с этим разработан метод измерения тепловых полей и измерительный комплекс на его основе. Исходя из функций, выполняемых аппаратной и программной частью комплекса, вытекают задачи по совершенствованию программного обеспечения системы, решение которых позволит отслеживать динамику процесса термообработки в промышленных условиях.

**Список литературы:** 1. Кацевич Л.С. Теория теплопередачи и тепловые расчеты электрических печей / Л.С. Кацевич. – М.: Энергия, 1977. – 304 с. 2. Мирошников В.В. Обзор существующих методов и средств измерения температуры / В.В. Мирошников А.И. Котуза // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Автоматика та приладобудування. – 2008. – С. 118-127. 3. Лисиенко В.Г. Топливо. Рациональное скижание, управление и технологическое использование / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев / Под ред. В.Г. Лисиенко – М.: Теплотехник, 2004. – 832 с. 4. Гуляев А.В. Восстановление и точность представления температурного поля при обжиге подины электролизера, проблемы рассматриваемого метода / А.В. Гуляев // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2008. – № 3. – С. 11-15. 5. Скоб Ю.О. Чисельне розв'язання спряженої задачі теплообміну в камерах термообробки / Ю.О. Скоб // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 4. – С. 79-83. 6. Хабаров В.А. Аппаратный контроль температурных потоков в режиме реального времени / В.А. Хабаров, О.В. Непомнящий // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 5. – С. 54-57. 7. Уваисов С.У. Метод теплового диагностирования латентных технологических дефектов радиоэлектронной аппаратуры и ее тепловая диагностическая модель / С.У. Уваисов, С.П. Сулейманов, Н.К. Юрков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 4 (28). – С. 109-118. 8. Горячев Н.В. Совершенствование структуры современного информационно-измерительного комплекса / Н.В. Горячев, Н.К. Юрков // Инновационные информационные технологии. – 2013. – Т. 3. – № 2. – С. 433-436. 9. Кривандин В.А. Теория, конструкции и расчеты металлургических печей / В.А. Кривандин, Ю.П. Филимонов. – М.: Металлургия, 1986. – 479 с. 10. Heat Transfer and Diffusion [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.mathworks.com/help/pde/ug/heat-transfer.html>. 11. Киселев Е.В. Электрические печи сопротивления / Е.В. Киселев. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – 78 с. 12. Румянцев А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности: Учебное пособие / А.В. Румянцев. – Калининград: Российский госуниверситет им. И. Канта., 2010. – 95 с. 13. Цаплин А. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии / А.И. Цаплин, И.Л. Никулин. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 2011. – 299 с. 14. Arduino Leonardo Overview [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLeonardo>. 15. Matlab Partial Differential Equation Toolbox [Электронный ресурс] – Режим доступа к ресурсу: <http://www.mathworks.com/help/pde/index.html>. 16. Kulincheko G. Thermal field analysis

simulation acceleration / G. Kulincheko, E. Mozok // Fourth International Conference "High Performance Computing" HPC-UA 2014. – Ukraine, Kyiv. – 2014. – P.71-74.

**Bibliography (transliterated):** 1. Kacevich L.S. Teoriya teploperedachi i teplovye raschety jelektricheskikh pechej / L.S. Kacevich. – M.: Jenergiya, 1977. – 304 p. 2. Miroshnikov V.V. Obzor sushhestvujushhih metodov i sredstv izmerenija temperatury / V.V. Miroshnikov, A.I. Kotuza // Visnik NTU "HPI". Serija: Avtomatika ta priladobuduvannja. – 2008. – P. 118-127. 3. Lisienko V.G. Racional'noe szhiganie, upravlenie i tehnologicheskoe ispol'zovanie / V.G. Lisienko, Ja.M. Shhelokov, M.G. Ladygichev. / Pod red. V.G. Lisienko. – M.: Teplotehnika, 2004. – 832 p. 4. Guljaev A.V. Vosstanovlenie i tochnost' predstavlenija temperaturnogo polja pri obzhige podiny jelektrolizera, problemy rassmatrivaemogo metoda / A.V. Guljaev // Zhurnal nauchnyh publikacij aspirantov i doktorantov. – 2008. – № 3. – P. 11-15. 5. Skob Ju.O. Chisel'ne rozv'язання спріяженої задачі теплообміну в камерах термообробки / Ju.O. Skob // Aviacionno-kosmicheskaja tekhnika i tehnologija. – 2012. – № 4. – P. 79-83. 6. Habarov V.A. Apparatnyj kontrol' temperaturnyh potokov v rezhime real'nogo vremeni / V.A. Habarov, O.V. Nepomnashchij // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. – 2009. – № 5. – P. 54-57. 7. Uvajsov S.U. Metod teplovogo diagnostirovaniya latentnyh tehnologicheskikh defektov radiojelektronnoj apparatury i ee teplovaja diagnosticheskaja model' / S.U. Uvajsov, S.P. Sulejmanov, N.K. Jurkov // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki. – 2013. – № 4 (28). – P. 109-118. 8. Gorjachev N.V. Sovershenstvovanie struktury sovremenennogo informacionno-izmeritel'nogo kompleksa / N.V. Gorjachev, N.K. Jurkov // Innovacionnye informacionnye tehnologii. – 2013. – T. 3. – №2. – P. 433-436. 9. Krivandin V.A. Teoriya, konstrukcii i raschety metallurgicheskikh pechej / V.A. Krivandin, Ju.P. Filimonov. – M.: Metallurgija, 1986. – 479 p. 10. Heat Transfer and Diffusion [Elektronniy resurs] – Rezhim dostupa k ressru: <http://www.mathworks.com/help/pde/ug/heat-transfer.html>. 11. Kiselev E.V. Jelektricheskie pechi soprotivlenija / E.V. Kiselev. – Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2010. – 78 p. 12. Rumjancev A.V. Metod konechnyh jelementov v zadachah teploprovodnosti: Uchebnoe posobie / A.V. Rumjancev. – Kaliningrad: Rossijskij gosuniversitet im. I. Kanta., 2010. – 95 p. 13. Caplin A. Modelirovaniye teplofizicheskikh processov i ob'ektov v metallurgii / A.I. Caplin, I.L. Nikulin.. – Perm': Permskij gosudarstvennyj tehnicheskij universitet, 2011. – 299 p. 14. Arduino Leonardo Overview [Elektronniy resurs] – Rezhim dostupa k ressru: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardLeonardo>. 15. Matlab Partial Differential Equation Toolbox [Elektronniy resurs] – Rezhim dostupa k ressru: <http://www.mathworks.com/help/pde/index.html>. 16. Kulincheko G. Thermal field analysis simulation acceleration / G. Kulincheko, E. Mozok // Fourth International Conference "High Performance Computing" HPC-UA 2014. – Ukraine, Kyiv. – 2014. – P.71-74.

*Поступила (received) 20.09.2015*

*Статью представил д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних наук Довбши А.С.*

Kulinchenko Georgij Vasil'evich, PhD Tech  
Sumy State University  
Str. Rimskogo-Korsakova, 2, Sumy, Ukraine, 40007  
tel./phone: (095) 800-0123, e-mail: heorhy@yandex.ua  
ORCID ID: 0000-0002-8501-5636

Mozok Evgen Nikolaevich, postgraduate  
Sumy State University  
Str. Rimskogo-Korsakova, 2, Sumy, Ukraine, 40007  
tel./phone: (099) 421-37-32, e-mail: mozok\_e@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0001-5504-3209

УДК 004.932.72'1

**О.С. ЛОГУНОВА**, д-р техн. наук, зав. каф., ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", Магнитогорск,

**И.А. ПОСОХОВ**, ст. преп., ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", Магнитогорск,

**А.Ю. МИКОВ**, ст. преп., ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова", Магнитогорск

## **МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЕРНЫХ ОТПЕЧАТКОВ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ**

Предложена методика классификации изображений серных отпечатков на основе нечетких множеств и правил принадлежности с использованием экспертических оценок. При исследовании причин неоднозначной классификации введены области изменения формы функции принадлежности: однозначной классификации, пустого множества, полного поглощения и неоднозначной классификации. Однозначно классифицировано 100% изображений. Ил.: 7. Библиогр.: 20 назв.

**Ключевые слова:** неоднозначная классификация, классификация изображений, нечеткие множества, правила принадлежности.

**Постановка проблемы.** Одним из источников получения информации о качестве непрерывнолитой заготовки являются серные отпечатки. Достоверность получаемой информации определяется методами распознавания объектов нерегулярной формы на изображениях серных отпечатков. Авторами работы проводились исследования по идентификации объектов на изображении с использованием статистических методов [1], морфологических операций [2] и адаптивных нечетких деревьев с динамической структурой [3]. Однако, известные процедуры распознавания изображений, изложенные в [4 – 6], не позволяют получить достоверную информацию без предварительной классификации полученных изображений. Таким образом, остается актуальной проблема повышения достоверности информации, получаемой при распознавании серных отпечатков непрерывнолитой заготовки.

**Анализ литературы.** В настоящее время ведутся активные исследования в области классификации изображений и объектов. Среди известных решений можно указать результаты работ, которые ведутся во

многих странах мира, в том числе и в России. Одним из походов к решению задачи классификации является создание библиотеки изображений по категориям. Например, в работе [7] исследовали семь категорий изображений для построения системы векторной классификации. В работе приводится теория выбора с линейно разделяемыми объектами в оптимальной гиперплоскости. Авторами было проведено более 2670 испытаний с классами: *airplanes, birds, boats, buildings, fish, people, vehicles*. В ходе исследования авторы применяли в качестве ядра распределение Гаусса, Лапласиан и распределение  $\chi^2$ . При построении классификатора авторы добились точности классификации от 11 до 16 %. Авторы [8] предлагают использовать Support Vector Machines (SVM) для классификации мультиточечных изображений. В работе приводится метод выбора гиперпланов. Однако, авторы не говорят о проблемах в использовании методов при увеличении количества гиперпланов. Испытание метода проводились в области распознавания объектов на сельскохозяйственной карте Восточной Англии для определения полей с однотипными культурами. Примеры приведенных изображений определяют объекты регулярной формы.

Достаточно много работ посвящается распознаванию лица человека и его элементов. Для этого предлагается использовать автоматическую классификацию на основе карты характерных точек. Например, в работе [9] предлагается использование двухмерного вейвлет-преобразования на основе огибающей волны для выделения основных точек лица. Применение этого метода позволило добиться 82 % уровня верной идентификации лица человека. Недостатками метода являются чувствительность к качеству изображений и мимическому изменению основных элементов лица.

Одним из методов классификации объектов является определение характерных точек заранее заданной текстуры [10, 11]. В работе [7] предлагается приближенная базовая модель сегментации изображения на основе оценки яркости точек. Авторы работы применяли алгоритм для изображений головного мозга. В результате была получена классификация изображений с различными текстурами с точностью до 84,4%. В работе [11] рассматривался статистический подход к классификации текстур из отдельных изображений, который базируется на определении качества освещения, положения камер и условий обработки изображения. Метод основан на использовании фильтров, устойчивых к вращению изображения, оценки гистограммы изображения и оценки формы гистограммы. За основу принятия решений о классе изображения принята процедура *k*-средних (*k*-Means), которая является

чувствительной к выбору исходных центров сгущения. Количество правильно классифицированных текстур для учебных примеров составило 98%. Задача классификация изображения решалась также и с помощью аппарата нечетких множеств и нечеткой логики. Первые работы по применению нечеткого аппарата к классификации изображений появились в конце 80-х – начале 90-х годов 20 века и показали хорошие результаты распознавания картографических изображений с объектами регулярной формы [12 – 14].

Изложенные основы получили развитие в современных исследованиях [15 – 20]. Однако, несмотря на множество существующих исследований, остаются нерешенными проблемы классификации изображений с множеством объектов нерегулярной формы, низкой контрастности, низкого качества и контрастности.

**Цель статьи** – разработка математического обеспечения для классификации изображений серных отпечатков для дальнейшего эффективного применения методов сегментации.

**Методика каскадной классификации изображений.** В методику классификации изображений включено три каскада. Каждый последующий каскад классификации предусмотрено применять для изображений, находящихся в области неоднозначной идентификации по результатам оценки предыдущего шага. Каждый построенный каскад отличается от предыдущего количеством идентификационных признаков и сложностью функций принадлежности. Первый каскад использует правила идентификации изображения, построенные на основе трех формообразующих характеристик гистограммы: положение порога яркости; положение максимума яркости слева от порога; положение максимума яркости справа от порога. Второй каскад, наращивая количество идентификационных признаков с 3 до 256, использует три меры сходства, характеризуя дисперсию для оценки рассеяния расстояния относительно среднего значения каждого класса. Третий каскад используется только для изображений, не прошедших однозначную идентификацию на предыдущих двух каскадах. Учитывая невозможность идентификации изображений на основе детерминированных параметров гистограммы, принято решение ввести лингвистические переменные, термы и правила для идентификации изображений в классы. Методики, построенные на нечетких правилах, включают экспертные оценки и позволяют учсть скрытые закономерности при формализации процессов.

Учитывая, что 31% изображений после применения двух методик, основанных на формообразующих характеристиках гистограмм и

расстояния, остаются в области неоднозначной идентификации, была разработана методика классификации изображений серных отпечатков на основе нечетких множеств и правил нечеткой логики.

**Термы и функции принадлежности для устранения неоднозначной идентификации изображений.** Наиболее сложным этапом в применении нечетких множеств к решению прикладных задач является определения лингвистических переменных и их термов. Для решения задачи классификации изображений введем структурированную лингвистическую переменную – *Image* (Изображение), которая в своем составе содержит три компоненты: *T*, *m*, *M*, где *T* – абсцисса точки для положения порога яркости; *m* – абсцисса точки положения максимума яркости слева от порога; *M* – абсцисса точки положения максимума яркости справа от порога. На рис. 1 приведена структура лингвистической переменной *Image* с указанием всех составляющих.

Особенностью переменной *Image* является включение в ее структуру трех элементов, описывающих формообразующие характеристики, для которого должны быть определены термы и функции принадлежности. Каждая из компонент лингвистической переменной *Image* принимает три значения: "Принадлежит классу *A*"; "Принадлежит классу *B*"; "Принадлежит классу *C*", которые образуют множество термов (рис. 1).

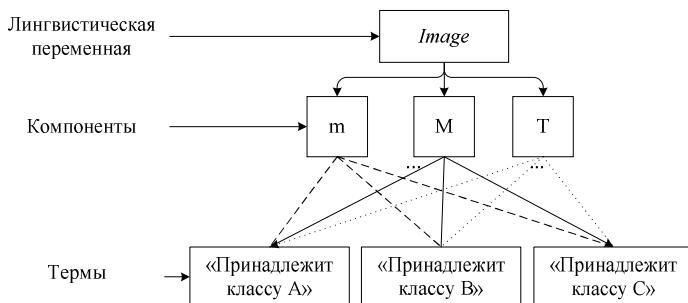


Рис. 1. Структура лингвистической переменной "Изображение"

Рассмотрим общие случаи расположения областей идентификации переменной *Image* для построения функции принадлежности. При рассмотрении эталонных гистограмм возникает четыре вида областей: области однозначной идентификации (рис. 2), область неоднозначной идентификации (перекрытие областей рис. 3), область "пустого множества", в которую не включено ни одно из эталонных изображений

и область "полного поглощения". Для каждого из случаев запишем в общем виде функцию принадлежности  $\mu_i$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , где  $i$  – обозначение классов.

**Вид функции принадлежности для областей однозначной идентификации по формообразующим характеристикам гистограммы.** При наличии однозначной идентификации во всех трех классах получим вид функции принадлежности, приведенный на рис. 3. На рис. 2 введены обозначения:  $x$  – рассматриваемый компонент лингвистической переменной,  $[0; 255]$  – область определения функции принадлежности согласно области существования гистограммы яркости.

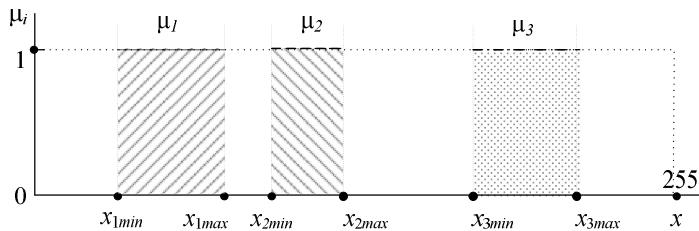


Рис. 2. Схема формирования функции принадлежности для областей однозначной идентификации

Условием существования схемы, приведенной на рис. 2, является упорядоченность интервалов выбранных характеристик гистограммы, и соответственно выполнение условия упорядочения формообразующих характеристик:

$$x_{1\min} < x_{1\max} < x_{2\min} < x_{2\max} < x_{3\min} < x_{3\max} \quad (1)$$

**Вид функции принадлежности для области неоднозначной идентификации по формообразующим характеристикам гистограммы.** После проведения второго каскада методики классификации остаются случаи неоднозначной классификации для двух групп. Для двух перекрывающихся областей возникает интервал, в котором возникает два решения о принадлежности переменной *Image* к рассматриваемым классам. На рис. 3 показана схема пересечения двух областей в процессе классификации изображений.

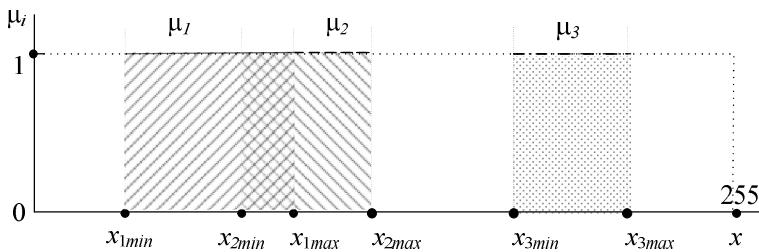


Рис. 3. Схема пересечения областей неоднозначной идентификации

В случае, показанном на рис. 3, возникает область пересечения на интервале  $[x_{2min}, x_{1max}]$  и нарушается условие (1). Поэтому необходимо аксиоматически принять форму функции принадлежности для этого интервала.

Простейшим вариантом формы функции принадлежности является линейная "равновесная" модель (рис. 4, а) и более сложным вариантом усиление вероятности принадлежности классу на основе сочетания двух квадратичных функций (рис. 4, б) – "неравновесная" модель. При этом точка пересечения этих функций определяется в ходе адаптации или обучения системы классификации.

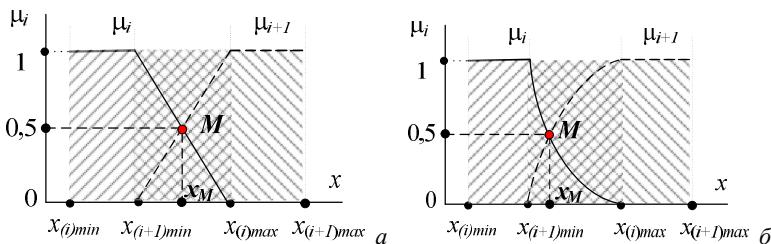


Рис. 4. Схема формирования функции принадлежности для пересекающихся областей: а – равновесная модель; б – неравновесная модель

На рис. 5 дополнительно введены обозначения: \$M\$ – точка пересечения функций принадлежности для области неоднозначной классификации; \$x\_M\$ – абсцисса точки пересечения функций принадлежности.

Абсцисса точки \$M\$ может смещаться от положения равновесия как влево, так и в право, сохраняя ординату. Сохранение ординаты позволяет определить аналитическую запись параболических функций

принадлежности при обучении системы. Запишем аналитический вид функции принадлежности для равновесной и неравновесной модели.

Для функции  $\mu_i$  на интервале  $[x_{(i+1)\min}, x_{(i)\max}]$  воспользуемся каноническим уравнением прямой, проходящей через две точки с координатами  $(x_{(i+1)\min}, 1)$  и  $(x_{(i)\max}, 0)$  для получения аналитической записи согласно рис. 4, а.

В итоге функция принадлежности  $\mu_i$  примет вид

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i+1)\min}]; \\ -\frac{1}{Q}x + L, & \text{при } x \in (x_{(i+1)\min}; x_{(i)\max}); \\ 0, & \text{при } x \in [x_{(i)\max}; x_{(i+1)\max}]. \end{cases}$$

Аналогичным образом, используя те же обозначения, получаем

$$\mu_{i+1} = \begin{cases} 0, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i+1)\min}]; \\ \frac{1}{Q}x - R, & \text{при } x \in (x_{(i+1)\min}; x_{(i)\max}); \\ 1, & \text{при } x \in [x_{(i)\max}; x_{(i+1)\max}], \end{cases}$$

где  $R = \frac{x_{(i+1)\min}}{x_{(i)\max} - x_{(i+1)\min}}$  и  $Q = x_{(i)\max} - x_{(i+1)\min}$ .

При неравновесной модели для функции  $\mu_i$  на интервале  $[x_{(i+1)\min}, x_{(i)\max}]$  воспользуемся уравнением параболы, проходящей через три точки с координатами  $(x_{(i+1)\min}, 1)$ ,  $(x_{(i)\max}, 0)$  и  $(x_M, 0,5)$  для получения аналитической записи согласно рис. 4, б. Абсцисса  $x_M$  задается в интерактивном режиме при обучении системы классификации и считается заранее известной.

В итоге функция принадлежности  $\mu_i$  примет вид

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i+1)\min}]; \\ a_i + b_i x + c_i x^2, & \text{при } x \in (x_{(i+1)\min}; x_{(i)\max}); \\ 0, & \text{при } x \in [x_{(i)\max}; x_{(i+1)\max}]. \end{cases}$$

Аналогичным образом, используя те же обозначения, получаем

$$\mu_{i+1} = \begin{cases} 0, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i+1)\min}]; \\ a_{i+1} + b_{i+1}x + c_{i+1}x^2, & \text{при } x \in (x_{(i+1)\min}; x_{(i)\max}); \\ 1, & \text{при } x \in [x_{(i)\max}; x_{(i+1)\max}]. \end{cases}$$

**Вид функции принадлежности для области "пустого множества" по формообразующим характеристикам гистограммы.** Рассмотрим случай, при котором образуются области "пустого множества". Эти области образуются при построении гистограмм яркости, по которым не классифицируется ни одно из эталонных изображений, но любое новое изображение может иметь характеристики из этих областей (рис. 5). Для указанных областей также должны быть записаны функции принадлежности, которые могут быть построены по тому же принципу, что и области неоднозначной идентификации. Причем порядок следования границ интервалов должен соответствовать выражению (1).

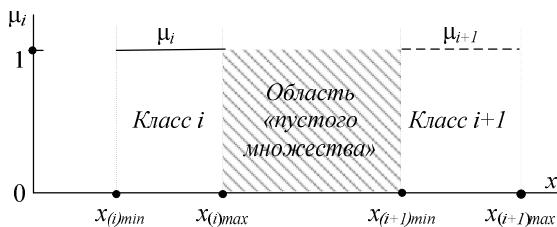


Рис. 5. Схема расположения областей "пустого множества"

В этом случае достаточно рассмотреть область между двумя непересекающимися интервалами (рис. 6). Запишем для каждой модели аналитическую форму функции принадлежности.

Для функции  $\mu_i$  на интервале  $[x_{(i)\max}, x_{(i+1)\min}]$  воспользуемся каноническим уравнением прямой, проходящей через две точки с координатами  $(x_{(i)\max}, 1)$  и  $(x_{(i+1)\min}, 0)$  для получения аналитической записи согласно рис. 6, а.

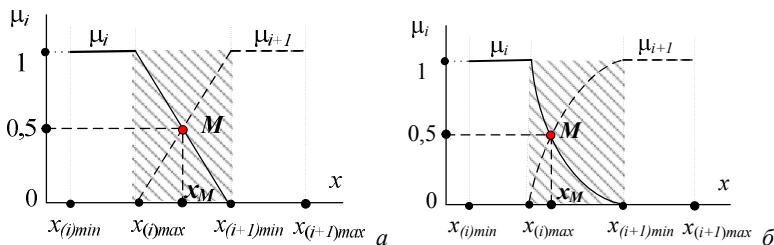


Рис. 6. Схема формирования функции принадлежности для пересекающихся областей: *a* – равновесная модель; *б* – неравновесная модель

В итоге функция принадлежности  $\mu_i$  примет вид

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i)\max}]; \\ \frac{1}{Q}x - R, & \text{при } x \in (x_{(i)\max}; x_{(i+1)\min}); \\ 0, & \text{при } x \in [x_{(i+1)\min}; x_{(i+1)\max}]. \end{cases}$$

Аналогичным образом, используя те же обозначения, получаем

$$\mu_{i+1} = \begin{cases} 0, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i)\max}]; \\ -\frac{1}{Q}x + L, & \text{при } x \in (x_{(i)\max}; x_{(i+1)\min}); \\ 1, & \text{при } x \in [x_{(i+1)\min}; x_{(i+1)\max}], \end{cases}$$

$$\text{где } L = \frac{x_{(i)\max}}{x_{(i)\max} - x_{(i+1)\min}} \text{ и } Q = x_{(i)\max} - x_{(i+1)\min}.$$

При неравновесной модели для функции  $\mu_i$  на интервале  $[x_{(i)\max}, x_{(i+1)\min}]$  воспользуемся также уравнением параболы, проходящей через три точки с координатами  $(x_{(i)\max}, 1)$ ,  $(x_{(i+1)\min}, 0)$  и  $(x_M, 0,5)$ , для получения аналитической записи согласно рис. 6, б. Абсцисса  $x_M$  задается в интерактивном режиме при обучении системы классификации и считается заранее известной. В итоге функция принадлежности  $\mu_i$  примет вид

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i)\max}]; \\ a_i + b_i x + c_i x^2, & \text{при } x \in (x_{(i)\max}; x_{(i+1)\min}); \\ 0, & \text{при } x \in [x_{(i+1)\min}; x_{(i+1)\max}]. \end{cases}$$

Аналогичным образом, используя те же обозначения, получаем

$$\mu_{i+1} = \begin{cases} 0, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i)\max}]; \\ a_{i+1} + b_{i+1} x + c_{i+1} x^2, & \text{при } x \in (x_{(i)\max}; x_{(i+1)\min}); \\ 1, & \text{при } x \in [x_{(i+1)\min}; x_{(i+1)\max}]. \end{cases}$$

**Вид функции принадлежности для области "полного поглощения" по формообразующим характеристикам гистограммы.** Область "полного поглощения" возникает при нарушении порядка следования отрезков (1). Возможно два варианта образования области "полного поглощения": перекрытие первым интервалов (рис. 7, а) и перекрытие вторым интервалом (рис. 7, б).

В этом случае для области поглощения необходимо назначить аксиоматические значения функции принадлежности. Как один из возможных вариантов примем, что:

- при соблюдении условия  $(x_{(i+1)\min}; x_{(i+1)\max}) \in [x_{(i)\min}; x_{(i)\max}]$  (рис. 7, а)

$$\mu_i = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [x_{(i)\min}; x_{(i+1)\min}] \cup [x_{(i+1)\max}; x_{(i)\max}]; \\ 0, & \text{при } x \in (x_{(i+1)\min}; x_{(i+1)\max}), \end{cases} \quad \text{и } \mu_{i+1} = 0, \forall x;$$

- при соблюдении условия  $(x_{(i)\min}; x_{(i)\max}) \in [x_{(i+1)\min}; x_{(i+1)\max}]$  (рис. 7, б)

$$\mu_{i+1} = \begin{cases} 1, & \text{при } x \in [x_{(i+1)\min}; x_{(i)\min}] \cup [x_{(i)\max}; x_{(i+1)\max}]; \\ 0, & \text{при } x \in (x_{(i)\min}; x_{(i)\max}), \end{cases} \quad \text{и } \mu_i = 0, \forall x.$$

Фактически обнуление функции принадлежности на одном из интервалов исключает эту область из рассмотрения при принятии решения о принадлежности изображения одному из классов. Размер такой области составляет не более 4 % области определения функции принадлежности. На указанном интервале происходит скачкообразный "провал" в значениях функции принадлежности.

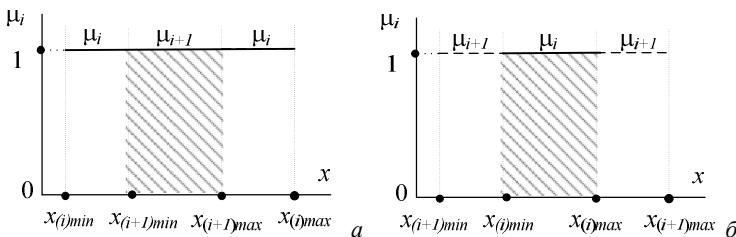


Рис. 7. Схема образования области "полного поглощения":  
а – перекрытие первым интервалом; б – перекрытие вторым интервалом

**Выводы.** Для устранения неоднозначной классификации изображений серных отпечатков предложена методика каскадной классификации, которая содержит три каскада принятия решений по формообразующим характеристикам гистограмм яркости, мерам расстояния до эталонных гистограмм и нечетким функциям принадлежности с использованием экспертных логических правил вывода. Каждый последующий каскад используется при наличии неоднозначной классификации на предыдущем шаге.

Для устранения областей неоднозначной идентификации изображения предложена методика, основанная на использовании теории нечетких множеств для сложно-структурированной лингвистической переменной *Image*, содержащей три компоненты: максимум яркости справа, порог яркости и максимум яркости слева. Для каждой компоненты введены терм-множества, определяющие принадлежность введенным классам *A*, *B* и *C*.

В предлагаемом математическом обеспечении при описании функции принадлежности введены понятия равновесной и неравновесные модели, представлена обобщенная методика построения этих моделей и ее применение при классификации изображений серных отпечатков. При построении функций принадлежности нечетких множеств введены понятия областей "пустого множества" и "полного поглощения", которые позволили однозначно идентифицировать изображения из нового потока ретроспективной информации.

**Список литературы:** 1. Логунова О.С. Оценка качества непрерывно литой заготовки статистическими методами с использованием программных средств / О.С. Логунова, Д.Х. Девятов, Х.Х. Нуров // Изв. высш. учеб. зав. Черная металлургия. – 2005. – № 9. – С. 54–58. 2. Посохов И.А. Технология обработки изображений заготовок на основе операций морфологического анализа / И.А. Посохов, О.С. Логунова // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. – 2011. – № 1-2. – С. 191-196.

- 3.** Логунова, О.С. Система интеллектуальной поддержки процессов управления производством непрерывнолитой заготовки / О.С. Логунова, И.И. Мацко, И.А. Порохов. – Магнитогорск, 2013. – 176 с. **4.** Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: 2005. – 1072 с. **5.** Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: 1982. – Кн. 1. – 312 с. **6.** Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – СПб.: 2006. – С. 752. **7.** Чапелль О. Support Vector Machines for Histogram-Based Image Classification / О. Чапелль, Р. Гаффнер, В. Вапник // IEEE Transactions on neural networks. – 1999. – № 10 (5). – Р. 1055-1064. **8.** Фуди G. A relative Evaluation of MultiClass Image Classification by Suuport Vector Machines / Г. Фуди // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2004. – № 42 (6). – Р. 1335-1343. **9.** Lyons Michael J. Automatic Classification of Single Facial Images / Michael J. Lyons, Julien Budynek, Shigeru Akamatsu // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1999. – № 21 (12). – Р. 1357-1362. **10.** Leemput K.V. Automated Model-Based Tissue Classification of MR Images of the Brain / K.V. Leemput, F. Maes, D. Vandermeulen, P. Suetens // IEEE Transactions on medical imaging. – 1999. – № 18 (10). – Р. 897-908. **11.** Varma M. A Statistical Approach to Texture Classification from Single Images / M. Varma, A. Zisserman // International Journal of Computer Vision. – 2005. – № 62 (1/2). – Р. 61-81. **12.** Wang F. Fuzzy Supervised Clasification of Remote Sensing Images / F. Wang // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 1990. – № 28 (2). – Р. 194-201. **13.** Wang F. Design and implementation of knowledge-base system for remotely sensed change detection / F. Wang, R. Newkirk // J. Imaging Techn. – 1987. – № 13. – Р. 116-122. **14.** Cannon R.L. Segmentation of a thematic Mapper Image using the fuzzy c-means clustering algorithm / R.L. Cannon, J.V. Dave, J.C. Bezdek, H.G. Kolsky // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1986. – № GE-24. – Р. 400-408. **15.** Morlini I. A New Class of Weighted Similarity Indices Using Polytomous Variables / I. Morlini, S. Zani // Journal of Classification. – 2012. – № 29 (2). – Р. 199-226. **16.** Giordani P. FINDCLUS: Fuzzy INdividual Differences CLUstering / P. Giordani, H. Kiers // Journal of Classification. – 2012. – № 29 (2). – Р. 170-198. **17.** Contreras P. Fast, Linear Time Hierarchical Clustering using the Baire Metric / P. Contreras, F. Murtagh // Journal of Classification. – 2012. – № 29 (2). – Р. 118-143. **18.** Bar-Hen A. Influence Measures for CART Classification Trees / A. Bar-Hen, S. Gey, J.-M. Poggi // Journal of Classification. – 2012. – № 32 (1). – Р. 21-45. **19.** Шестаков А.Л. О новой концепции белого шума / А.Л. Шестаков, Г.А. Свиридов // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2012. – № 19 (2). – С. 287-288. **20.** Шестаков А.Л. Динамические измерения в пространствах "шумов" / А.Л. Шестаков, Г.А. Свиридов, Ю.В. Худяков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – № 13 (2). – С. 4-11.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Logunova O.S. Ocena kachestva nepreryvno litoj zagotovki statisticheskimi me-todami s ispol'zovaniem programmnih sredstv / O.S. Logunova, D.H. Devyatov, H.H. Nurov // Izv. vyssh. ucheb. zav. Chernaja metallurgija. – 2005. – № 9. – Р. 54-58. **2.** Posohov I.A. Tehnologija obrabotki izobrazhenij zagotovok na osnove operacij morfologicheskogo analiza / I.A. Posohov, O.S. Logunova // Matematicheskoe i programmnoe obespechenie sistem v promyshlennoj i social'noj sfereh. – 2011. – № 1-2. – Р. 191-196. **3.** Logunova O.S. Sistema intellektual'noj podderzhki processov upravlenija proizvodstvom nepreryvnolitoy zagotovki / O.S. Logunova, I.I. Macko, I.A. Posohov. – Magnitogorsk, 2013. – 176 p. **4.** Gonsales R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij / R. Gonsales, R. Vuds. – M.: 2005. – 1072 p. **5.** Prjett U. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij / U. Prjett. – M.: 1982. – Kn. 1. – 312 p. **6.** Shapiro L. Komp'yuternoe zrenie / L. Shapiro, Dzh. Stokman. – SPb.: 2006. – Р. 752. **7.** Chapelle O. Support Vector Machines for Histogram-Based Image Classification / O. Chapelle, P. Haffner, V. Vapnik // IEEE Transactions on neural networks. – 1999. – № 10 (5). – Р. 1055-1064. **8.** Foody G. A relative Evaluation of MultiClass Image Classification by Suuport Vector Machines / Г. Фуди // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 2004. – № 42 (6). – Р. 1335-1343. **9.** Lyons Michael J. Automatic Classification of Single Facial Images / Michael J.

- Lyons, Julien Budynek, Shigeru Akamatsu* // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. – 1999. – № 21 (12). – P. 1357-1362. **10.** *Leemput K.V.* Automated Model-Based Tissue Classification of MR Images of the Brain / *K.V. Leemput, F. Maes, D. Vandermeulen, P. Suetens* // IEEE Transactions on medical imaging. – 1999. – № 18 (10). – P. 897-908.
- 11.** *Varma M.* A Statistical Approach to Texture Classification from Single Images / *M. Varma, A. Zisserman* // International Journal of Computer Vision. – 2005. – № 62 (1/2). – P. 61-81.
- 12.** *Wang F.* Fuzzy Supervised Classification of Remote Sensing Images / *F. Wang* // IEEE Transactions on geoscience and remote sensing. – 1990. – № 28 (2). – P. 194-201. **13.** *Wang F.* Design and implementation of knowledge-base system for remotely sensed change detection / *F. Wang, R. Newkirk* // J. Imaging Techn. – 1987. – № 13. – P. 116-122. **14.** *Cannon R.L.* Segmentation of a thematic Mapper Image using the fuzzy c-means clustering algorithm / *R.L. Cannon, J.V. Dave, J.C. Bezdek, H.G. Kolsky* // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. – 1986. – № GE-24. – P. 400-408. **15.** *Morlini I.* A New Class of Weighted Similarity Indices Using Polytomous Variables / *I. Morlini, S. Zani* // Journal of Classification. – 2012. – № 29 (2). – P. 199-226. **16.** *Giordani P.* FINDCLUS: Fuzzy INdividual Differences CLUSTering / *P. Giordani, H. Kiers* // Journal of Classification. – 2012. – № 29 (2). – P. 170-198.
- 17.** *Contreras P.* Fast, Linear Time Hierarchical Clustering using the Baire Metric / *P. Contreras, F. Murtagh* // Journal of Classification. – 2012. – № 29 (2). – P. 118-143. **18.** *Bar-Hen A.* Influence Measures for CART Classification Trees / *A. Bar-Hen, S. Gey, J.-M. Poggi* // Journal of Classification. – 2012. – № 32 (1). – P. 21-45. **19.** *Shestakov A.L.* O novoj koncepcii belogo shuma / *A.L. Shestakov, G.A. Sviridjuk* // Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki. – 2012. – № 19 (2). – P. 287-288. **20.** *Shestakov A.L.* Dinamicheskie izmerenija v prostranstvah "shumov". / *A.L. Shestakov, G.A. Sviridjuk, Ju.V. Hudjakov* // Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosu-darstvennogo universiteta. Serija: Komp'juternye tehnologii, upravlenie, ra-dioelektronika. – 2013. – № 13 (2). – P. 4-11.

*Поступила (received) 30.07.2015*

*Статью представил д-р техн. наук, проф. ВПО "МГТУ им. Г.И. Носова" Ячиков И.М.*

Logunova Oxana, Dr.Sci.Tech, Professor  
Nosov Magnitogorsk State University  
Str. Lenin, 38, Magnitogorsk, Russia, 455000  
tel./phone: (3519) 22-03-17, e-mail: logunova66@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0002-7006-8639

Posokhov Ivan, master  
Nosov Magnitogorsk State University  
Str. Lenin, 38, Magnitogorsk, Russia, 455000  
tel./phone: +79615789068, e-mail: posohof@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0002-7006-8639

Mikov Fntoly, master  
Nosov Magnitogorsk State University  
Str. Lenin, 38, Magnitogorsk, Russia, 455000  
tel./phone: (3519) 22-03-17, e-mail: mikov.ayu@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0002-7006-8639

**UDC 004.93'11:681.5.015.52**

**V.D. PAVLENKO**, D.Sc., Prof., ONPU, Odessa,  
**O.O. FOMIN**, PhD, Ass. Prof., Odessa

## **INTELLIGENT INFORMATION TECHNOLOGY BUILDING SYSTEMS DIAGNOSTICS USING NUCLEAR MOMENTS VOLTERRA**

The paper presents the intelligent information technology to increase the efficiency of diagnosing the state of nonlinear dynamical objects of different physical nature with the use of mathematical models in the form of Volterra kernels. Research results on the test object monitoring show that moments of nuclei Volterra 2nd order characterized by the highest stability of the quality of diagnosis (probability of correct recognition) errors in measuring the response of objects of control compared to the data of their classification on the basis of samples of nuclei with a given increment. Figs.: 5. Tabl.: 2. Refs.: 13 titles.

**Keywords:** intelligent information technology, systems diagnostics, Volterra kernels, mathematical models in the form of Volterra kernels, quality of diagnosis.

**Statement of the problem.** Increase of the control objects complexity while maintaining the dynamic properties of systems, increased requirements for accuracy and objectivity of decisions leads to the problem of the development of new intelligent computing systems. These systems will ensure required characteristics and automate the monitoring process for objects of different physical nature. Modern diagnostic systems include both new mathematical techniques and modern resources of intelligent computing [1, 2].

At present the methods of technical diagnostics, founded on reconstruction of the control object models [3, 4], is widely developed. It is usually expected that faults change only object's features. However, often defects change object's structure. This fact leads to using of the nonparametric identifications methods for building of object's models on base of experimental data "input/output".

This paper uses a non-parametric nonlinear dynamic models based on integro-power Volterra series. They consist of the sequence of multidimensional weight functions  $w_k(\tau_1, \dots, \tau_k)$ ,  $k = 1, 2, \dots$  – Volterra kernels [5], which are invariant to form of input signal.

Using of models on base of Volterra series allows to take into account nonlinear and inertial characteristics of object. It makes the diagnostics procedure more universal and reliable [6].

The diagnostic procedure in this case contains determination of Volterra kernels on base of "input/output" experiment data in time or in frequency [7, 8]

domain. On base of taken Volterra kernels a set of diagnostic features is formed. In space of these features builds a classifier using statistical recognition methods [8, 9].

As a diagnostic object it's considered a simulation model of nonlinear dynamic electronic device. It is widely used component in electronics, electric drives, robotics, automated production lines, transportation, aerospace engineering and etc.

**The aim of this work** is improving the quality and reliability of diagnosing of nonlinear dynamic object's state using a model-based diagnostic nonparametric identification of objects in the form of Volterra kernels.

**Forming of features space.** For continuous nonlinear dynamic system the relationship between input  $u(t)$  and output  $y(t)$  signals with zero initial conditions can be represented by Volterra serie:

$$\begin{aligned} y(t) = & w_1(\tau)u(t-\tau)d\tau + \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_2(\tau_1, \tau_2)u(t-\tau_1)u(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \\ & + \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)u(t-\tau_1)u(t-\tau_2)u(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots, \end{aligned} \quad (1)$$

where  $w_1(\tau_1)$ ,  $w_2(\tau_1, \tau_2)$ ,  $w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  – Volterra kernels of 1<sup>st</sup>, 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> orders;  $t$  – current time.

High accuracy of Volterra kernels estimation is reached by using of antinoise determinate identification methods, offered in work [10 – 12].

Using of recognition theories methods for decision of the technical diagnostics problems on base of nonparametric dynamic object's models in the form of Volterra series is founded on the following supposition:

1. It exists objective (but implicit) relationship between multidimensional Volterra kernels, which describe the object's structure, and technical condition of object, i.e. it exists a certain function  $F(\mathbf{W}, \mathbf{S})$ , linking object's condition  $\mathbf{S}$  with Volterra kernels  $\mathbf{W} = \{w_n(\tau_1, \dots, \tau_n)\}_{n=1}^N$ .

2. Function  $F(\mathbf{W}, \mathbf{S})$ , built on base of Volterra kernels of explored object's, can be extrapolated on objects with an unknown characteristic.

3. Object's structure can be adequately presented in form of Volterra kernels.

Different approaches to decision of the problems of the technical diagnostics are possible. They can differ by the way of informative features choice and by the algorithm of building of function  $F(\mathbf{W}, \mathbf{S})$  [13].

The effectiveness of recognition methods is largely dependent on informativeness of used sets of features. If selected features adequately characterize the internal structure of the diagnosis object, the objects being identical in structure, appear in the space of these features in the form of a dense set of points. Objects with structural fault will correspond to the points that deviate from this dense set.

**Technology of intelligent diagnostic systems building.** The proposed information technology of nonlinear dynamical objects indirect control and diagnosis bases on nonparametric identification of an objects using Volterra kernels. It consists of following tasks.

**1. Object identification.** *The goal:* to obtain an information model of the object in the form of Volterra kernels.

*Stages of implementation:* supplying of test signals to the object's inputs; measuring of object's responses on output; definition of Volterra kernels on the basis of experimental data "input-output".

**2. Objects diagnostic model building.** *The goal:* to form the feature space.

*Stages of implementation:* parameterization of Volterra kernels (diagnostic information compression), evaluation of features diagnostic values; selection of the most informative features set (reduction of the diagnostic model).

**3. Building an object's states classifier.** *The goal:* construction of decision rules family for optimal classification in the space of informative features.

*Stages of implementation:* construction of decision rules (training); evaluation of the classification reliability (examination); optimization of the diagnostic model.

**4. Object's diagnosis.** *The goal:* Control object's state assessment.

*Stages of implementation:* object's identification; evaluation of diagnostic features; referring an object to a particular class (recognition of states).

Application of the proposed model diagnostics method entails the need of parameterization of Volterra kernels functions [8]. Diagnostic features sets selection has a decisive influence on the accuracy of the diagnostic model and, as a consequence, on the reliability of the object state recognition.

In this paper, the informativeness of the selected features combinations assessed by the results of the classification problem solving. The problem of objects sampling classification solves by constructing a decision rule by maximum likelihood estimation method [13]. So, to separate two classes (dichotomy case) it uses discriminant function of the form:

$$\begin{aligned} d(\mathbf{x}) = & \frac{1}{2} \mathbf{x}' (\mathbf{S}_2^{-1} - \mathbf{S}_1^{-1}) \mathbf{x} + (\mathbf{S}_1^{-1} \mathbf{m}_1 - \mathbf{S}_2^{-1} \mathbf{m}_2)' \mathbf{x} + \\ & + \frac{1}{2} (\mathbf{m}_1' \mathbf{S}_1^{-1} \mathbf{m}_1 - \mathbf{m}_2' \mathbf{S}_2^{-1} \mathbf{m}_2 + \ln \frac{|\mathbf{S}_2|}{|\mathbf{S}_1|}) + \lambda_{\max}, \end{aligned} \quad (2)$$

where  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$  – features combination;  $n$  – features space dimensionality;  $\mathbf{S}_i = M[(\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)(\mathbf{x} - \mathbf{m}_i)']$  – covariance matrix for class  $i$  ( $M[ ]$  – mathematical expectation operation);  $\mathbf{S}_i^{-1}$  – matrix inverse to  $\mathbf{S}_i$ ,  $|\mathbf{S}_i|$  – matrix determinant  $\mathbf{S}_i$ ;  $\mathbf{m}_i$  – mathematical expectation vector for a features of class  $i$ ,  $i = 1, 2$ ;  $\lambda_{\max}$  – classification threshold that provides the highest classification quality for objects of training sample.

Features combinations for which the quality of recognition is insufficient are discarded. In summary, features combination for which the addition of any new feature does not increase its informative value is selected.

Features set informativeness is determined on the base of the maximum of true recognition probability (TRP) criteria  $P_{\max}$ , implemented on a subset  $\mathbf{X}'$  of a given signs set  $\mathbf{X}$  ( $\mathbf{X}' \subset \mathbf{X}$ ).

Analysis of a different features combination quality based on averaging of TRP criterion. Quality of selected features combination from considered features set is evaluated by the result of classification on examination sample of data. Classifier builds using decision rules based on discriminant functions constructed during learning process (2) [13].

TRP is calculated for each decision rule. Then the maximum value of the TRP average assessment  $\bar{P}_{\max}$  is searched [6]:

$$\bar{P}_{\max} = \max_k \left\{ \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^{m-1} P_{ik} \right\}, \quad (3)$$

where  $m$  – classes images count;  $k$  – serial number of features combinations in exhaustive search procedure.

So, during the exhaustive search procedure for considered diagnostic features the most valuable combination of two, three, etc. features are determined.

Object's states recognition performed on the basis of secondary diagnostic features obtained by parameterization of the model:  $\{w_k(t_1, t_2, \dots, t_k)\}_{k=1,2,\dots,N} \Rightarrow \mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$ . The paper considers the system of secondary features obtained as the Volterra kernelssamplesof order  $k$ ;  $k = 1, 2$  with a specified discreteness ( $\mathbf{V}_k$ ) and moments of Volterra kernels  $\mu_r^{(k)}$  of different orders  $r$ ,  $r = \overline{0, 3}$  ( $\mathbf{M}_k$ ).

*Moments of Volterra kernels diagonal sections.* It is offered the universal approach to forming a of diagnostic features sets, which consists in using of Volterra kernels moments.

Let a signal  $u(t)$  in form of analytic function acts on input of stationary system, represented by the model in the form of Volterra kernels. Let's decompose it in a neighborhood of point  $t$  in a Taylor series

$$u(t - \tau) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i!} \frac{d^i u(t)}{d\tau^i} \tau^i. \quad (4)$$

Steady state signal in the system is determined by a series (4) with  $t \rightarrow \infty$ . If the expression (4) substitute in (1) than obtains expression  $u(t)$ :

$$\begin{aligned} y(t) = & \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{i!} \frac{d^i u(t)}{d\tau^i} \int_0^t \tau^i w_i(\tau) d\tau + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^{i+j}}{i! j!} \frac{d^i u(t)}{d\tau^i} \frac{d^j u(t)}{d\tau^j} \times \\ & \times \int_0^t \int_0^t \tau_1^i \tau_2^j w_2(\tau_1, \tau_2) d\tau_1 d\tau_2 + \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(-1)^{i+j+l}}{i! j! l!} \frac{d^i u(t)}{d\tau^i} \times \\ & \times \frac{d^j u(t)}{d\tau^j} \frac{d^l u(t)}{d\tau^l} \int_0^t \int_0^t \int_0^t \tau_1^i \tau_2^j \tau_3^l w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \dots . \end{aligned} \quad (5)$$

Values

$$\mu_{ij...l}^{(k)} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \dots \int_0^{\infty} \tau_1^i \tau_2^j \dots \tau_k^l w_k(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_k) d\tau_1 d\tau_2 \dots d\tau_k, \quad (6)$$

where  $i, j, \dots, l = 0, 1, 2, \dots$  are called the moments of  $r$  order for kernel of  $k$  order,  $i+j+\dots+l = r$  – moments order.

Moments of Volterra kernels diagonal sections ( $\mathbf{M}_k$ ), considered in this work, calculated by the formula:

$$\mu_r^{(k)} = \int_0^{\infty} t^r w_k(t, t, \dots, t) dt. \quad (7)$$

**Analysis of features space informativeness.** Offered method of building an intelligent computing system for diagnostics is analyzed on example of the nonlinear dynamic object simulation model.

*Control object's model.* The simulation model of nonlinear dynamic object, represents connection with feedback. It's blocks have characteristics  $W_1(t) = e^{-\alpha t}$  and  $f(y) = \beta y^2(t)$ .

Such object is described by the nonlinear differential equation of the form:

$$\frac{dy(t)}{dt} + \alpha y(t) + \beta y^2(t) = u(t). \quad (8)$$

Let the  $\alpha$  and  $\beta$  are constant factors (features) inaccessible for direct measurements.

Then, engineering of diagnostic system of nonlinear dynamic objects using indirect measurements becomes widely impotent today.

The model of object as three members of some Volterra series at zero entry conditions looks like:

$$y(t) = \int_0^t w_1(\tau_1)u(t-\tau_1)d\tau_1 + \int_0^t \int_0^t w_2(\tau_1, \tau_2)u(t-\tau_1)u(t-\tau_2)d\tau_1 d\tau_2 + \\ + \int_0^t \int_0^t \int_0^t w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3)u(t-\tau_1)u(t-\tau_2) \times u(t-\tau_3)d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3. \quad (9)$$

Here  $u(t)$  and  $y(t)$  – measured signals accordingly on an input and output of diagnostic object.

The analytical expressions for Volterra kernel of 1<sup>st</sup> order and diagonal sections for Volterra kernels of 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> order are:

$$w_1(\tau_1) = e^{-\alpha\tau_1}, \quad (10)$$

$$w_1(\tau_1, \tau_2) = \frac{\beta}{\alpha} (e^{-\alpha\tau_1} e^{-\alpha\tau_2} - e^{-\alpha\tau_2}), \quad \tau_1 \leq \tau_2, \quad (11)$$

$$w_3(\tau_1, \tau_2, \tau_3) = \frac{2}{3} \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 (e^{\alpha(\tau_1-\tau_2-\tau_3)} + 3e^{-\alpha(\tau_1+\tau_2+\tau_3)} - \\ - 4e^{-\alpha(\tau_2+\tau_3)} - 2e^{-\alpha(\tau_1+\tau_3)} + 2e^{-\alpha\tau_3}), \quad \tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_3. \quad (12)$$

Diagonal sections of Volterra kernelsof 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> order (11) – (12) at  $t_1 = t_2 = t_3 = t$  has the form:

$$w_2(t, t) = \frac{\beta}{\alpha} (e^{-2\alpha t} - e^{-\alpha t}), \quad (13)$$

$$w_3(t, t, t) = 2 \left( \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 (e^{-3\alpha t} - 2e^{-2\alpha t} + e^{-\alpha t}).$$

For diagnostics of the object's states Volterra kernels of 1<sup>st</sup> order  $w_1(t)$  and diagonal sections of Volterra kernels of 2<sup>nd</sup>  $w_2(t, t)$  and 3<sup>rd</sup> order  $w_3(t, t, t)$  are used.

Training and examination samples are received for objects of four classes (100 objects in each class) depending on the  $\alpha$  and  $\beta$  values. The first class forms by objects with features  $\alpha \in [0.95\alpha_n, 1.05\alpha_n]$  and  $\beta \in [0.95\beta_n, 1.05\beta_n]$ , where  $\alpha_n$  and  $\beta_n$  – nominal values (normal mode – class A).The second class forms by objects with features  $\alpha \in (0.9\alpha_n, 0.95\alpha_n) \cup (1.05\alpha_n, 1.1\alpha_n)$  and

$\beta \in [0.95\beta n, 1.05\beta n]$  (fault modes – class B). The third class forms by objects with features  $\alpha \in [0.95\alpha n, 1.05\alpha n]$  and  $\beta \in (0.9\beta n, 0.95\beta n) \cup (1.05\beta n, 1.1\beta n)$  (fault modes – class C). The forth class forms by objects with features  $\alpha \in (0.9\alpha n, 0.95\alpha n) \cup (1.05\alpha n, 1.1\alpha n)$  and  $\beta \in (0.9\beta n, 0.95\beta n) \cup (1.05\beta n, 1.1\beta n)$  (fault and emergency modes – class D).

The estimations of Volterra kernels of 1<sup>st</sup> order  $w_1(t)$  and diagonal sections of Volterra kernels of 2<sup>nd</sup>  $w_2(t, t)$  and 3<sup>rd</sup> order  $w_3(t, t, t)$  for described four classes are taken by the results of the simulation (Fig. 1).

The deterministic approach for classification is impossible, because obtained models for all classes forms the overlaying areas. In this case, the methods of object's states recognition are used.

On base of training sets of data for an object's classes **A**, **B**, **C** and **D** there successively calculates three discriminant functions  $d1(x)$ ,  $d2(x)$  and  $d3(x)$ . The function  $d1(x)$  separates the objects of the first class A from the objects of second, third and fourth classes B  $\cup$  C  $\cup$  D;  $d2(x)$  – separates the objects of the second class B from the objects of third and fourth classes C  $\cup$  D;  $d3(x)$  – separates the objects of the third class C from the objects of fourth class D.

Further, the informativeness of different diagnostic features sets (discrete values of Volterra kernels and the moments (5)) are analyzed.

*Discrete values of Volterra kernels.* The training sample creates on base of ten discrete values (with uniform step on interval (0, T], where T – simulation time) of Volterra kernels of first order (feature set  $V_1$ ) and diagonal sections of Volterra kernels of the second (feature set  $V_2$ ).

Diagnostic spaces form by selection of all features combination. Quality of a features combination estimates by solving the problem of statistical classification [13].

The best results of features sets selection among  $V_1$ ,  $V_2$  and  $V_3$  are shown in a tabular mode (Table 1) and in a chart mode (Fig. 2).

The most informative description of objects from considered features sets gives the collection  $V_2$ .

The most informative part of functions of Volterra kernels of first order and the diagonal sections of Volterra kernels of second order is the initial area, corresponding to first four discrete values. For the set  $V_1$  there are  $x_i = w_1(t_i)$ ,  $i = \overline{1, 4}$ ; for the set  $V_2 - x_i = w_2(t_i, t_i)$ ,  $i = \overline{1, 4}$ .

*Volterra kernels moments.* The training sample creates on base of four Volterra kernels moments (5) of Volterra kernels of first order ( $M_1$ ) and diagonal sections of Volterra kernels of the second order ( $M_2$ ) and third order ( $M_3$ ).

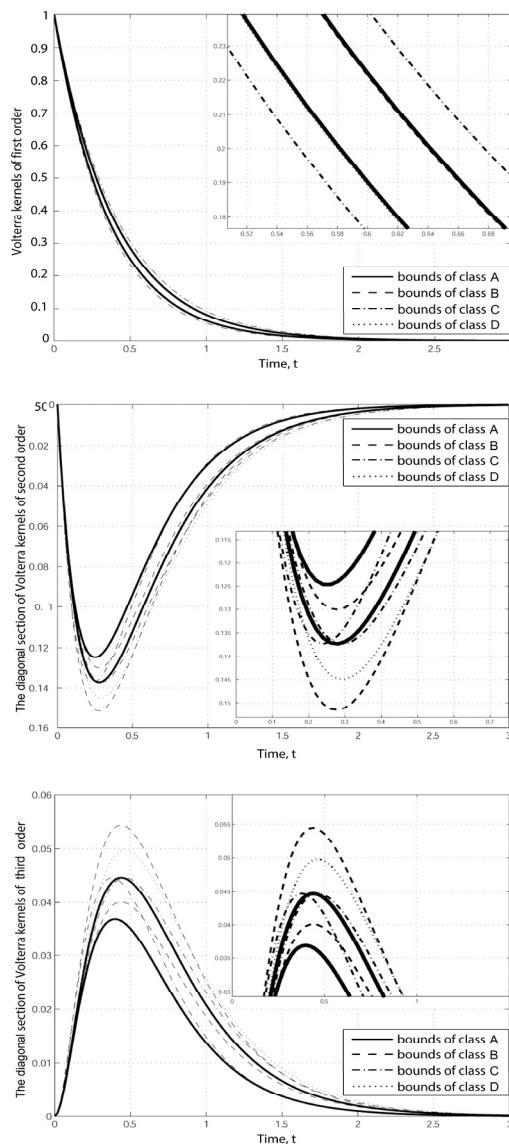


Fig 1. Volterra kernels of first order  $w_1(t)$  and the diagonal sections of Volterra kernels of second  $w_2(t, t)$  and third order  $w_3(t, t, t)$  for objects of 4 classes

The best results of features sets selection among  $M_1$ ,  $M_2$  and  $M_3$  are shown in a tabular mode (Table 1) and in a chart mode (Fig. 2).

The most informative moments correspond to order  $r = 0, 1, 2, 3$ . For the set  $M_1$  there are  $x_{r+1} = \mu_r^1$ ; for the set  $M_2$  there are  $x_{r+1} = \mu_r^2$ ; for the set  $M_3$  there are  $x_{r+1} = \mu_r^3$

The most informative description of motor's states gives the feature set  $V_2$  or  $M_2$  (Table 1).

Table 1

Averaged values of TRP for features sets  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$

Features set	Informative features	TRP
$V_1$	$x_1, x_2, x_3, x_7$	0.84
$M_1$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.83
$V_2$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.95
$M_2$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.95
$V_3$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.95
$M_3$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.94

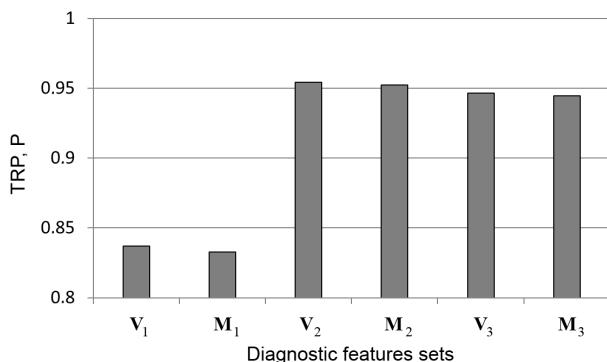


Fig. 2. Averaged values of TRP for features sets  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$

**Stability of features space informativeness to estimation of noisy Volterra kernels.** It was analyzed a stability of informativeness for features sets  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ . It was created 4 training sample on base of noisy Volterra kernels of first order and diagonal sections of Volterra kernels of the second and third order with noise rate accordingly 1%, 3%, 5%, 10% of Volterra kernels extremum. The best results of stability analysis are shown in Fig. 3 and Table 2.

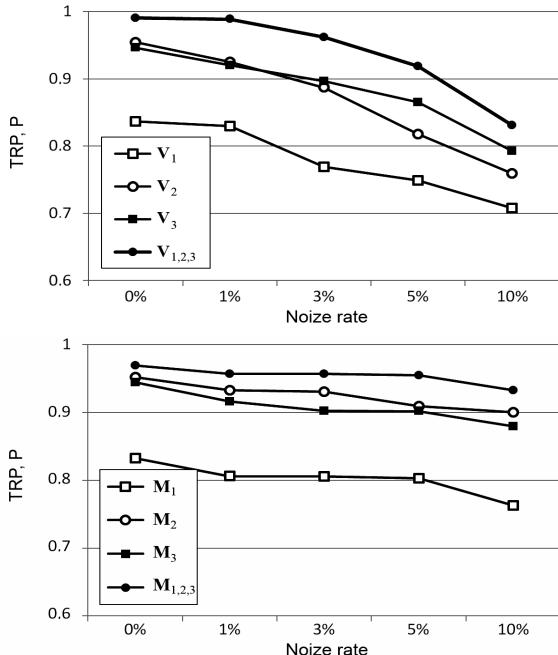


Fig. 3. Informativeness for features sets  $V_1, V_2, V_3, V_{1,2,3}, M_1, M_2, M_3, M_{1,2,3}$  under the influence of noise for Volterra kernels estimations

The most noise immunity features sets are received on the base of diagonal sections of Volterra kernels of the second and third order  $V_3, M_2$ . Herewith, features set  $M_2$  unlike  $V_3$  save a stability as on small as on big noise rates.

However, the TRP decrease even in features set  $M_2$  with increasing noise rate may become critical, so that the features set will not be suitable for use in conditions of noise.

For noise immunity solution in this case we consider a sets, combining a features on the basis of discrete values of Volterra kernels of first order ( $V_1$ ) and diagonal sections of Volterra kernels of the second ( $V_2$ ) and third ( $V_3$ ) order  $V_{1,2,3} = V_1 \cup V_2 \cup V_3 - x_i = w_1(t_i), x_i+1 = w_2(t_i, t_i), i = 1, 10$ . Similarly we consider a features set, combining a features on the basis of Volterra kernels moments of Volterra kernels of first order ( $M_1$ ) and diagonal sections of Volterra kernels of the second and third order ( $M_2, M_3$ )  $M_{1,2,3} = M_1 \cup M_2 \cup M_3 - x_{r+1} = \mu_r^{(1)}, x_{r+4} = \mu_r^{(2)}$ ,  $r = \overline{0, 3}$ .

The best results of stability analysis for the features sets  $V_{1,2,3}$  and  $M_{1,2,3}$  also are shown in Table 2 and Fig. 4. The both features sets  $V_{1,2,3}$  and  $M_{1,2,3}$  have better noise immunity than features sets  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ . The features set  $M_{1,2,3}$  have the better noise immunity over  $V_{1,2,3}$  on a high noise rate.

According to the data in Table 2 the functions of TRP deviation depending on noise rates are build (Fig. 3).

Table 2

Averaged values of TRP for features sets  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $V_{1,2,3}$ ,  $M_{1,2,3}$  at different noise rates of Volterra kernels sections

Features sets	Informative features	Noise rate, %				
		0	1	3	5	10
$V_1$	$x_1, x_2, x_3, x_7$	0.84	0.83	0.77	0.75	0.71
$M_1$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.83	0.80	0.80	0.80	0.76
$V_2$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.95	0.93	0.89	0.82	0.76
$M_2$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.95	0.93	0.93	0.91	0.90
$V_3$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.95	0.92	0.90	0.87	0.79
$M_3$	$x_1, x_2, x_3, x_4$	0.94	0.93	0.92	0.91	0.89
$V_{1,2,3}$	$x_{12}, x_{14}, x_{22}, x_{24}$	0.99	0.96	0.93	0.90	0.81
$V_{1,2,3}$	$x_1, x_4, x_{11}, x_{21}^*$	0.98	0.91	0.74	0.70	0.68
$M_{1,2,3}$	$x_5, x_6, x_{10}, x_{11}$	0.98	0.92	0.92	0.91	0.89

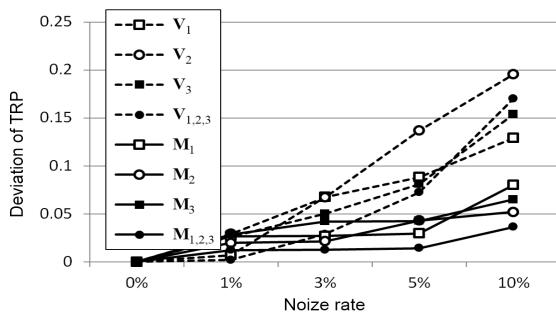


Fig. 4. TRP deviation for features sets  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_{1,2,3}$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_{1,2,3}$  under the influence of noise for Volterra kernels estimations.

Graph clearly demonstrates the change reliability of diagnosis at different noise rates for considered diagnostic features sets.

Each features set in the conditions of noise absence usually has several best solutions (combinations of features), or several solutions that are in the neighborhood of best solution.

In this case, when the noise acts the some solutions remain quite reliable (in terms of diagnostics quality), while others lose in diagnostic quality.

As an example, in Table 2 for the features set  $V_{1,2}$  it is given a combination of features  $\{x_1, x_4, x_{11}, x_{21}\}^*$ . At zero-noise rate it provides maximum diagnostic quality. But when the noise rate increases the diagnostics quality of the features combination is reduced considerably (fig. 5).

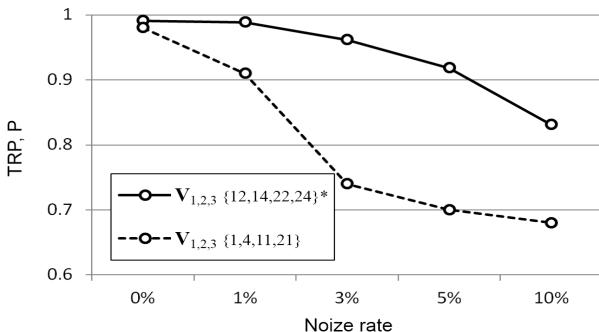


Fig. 5. Informativeness for different combinations of features set  $V_{1,2,3}$  under the influence of noise

**Conclusion.** In this work the method of building an intelligent diagnostics system of nonlinear dynamic objects is offered. The method founds on using integro-power Volterra series as object's models. On base of such models the diagnostic features space builds. There are discrete values of Volterra kernels of first order and diagonal sections of Volterra kernels of the second and third order as well as moments of Volterra kernels.

Estimations of true recognition probability of object's states on base of taken diagnostic features sets received using maximum likelihood estimation method.

Volterra kernels sections of second and third order give more information about diagnostic object than Volterra kernels of first order. It is shown a possibility and advantages to use diagnostic model of object as a union of Volterra kernels of first, second and third orders. These models provide the highest information about diagnostic object.

The highest informativeness and noise immunity is reached by union of moments of Volterra kernels of the first order and Volterra kernels diagonal sections of the second and third order.

Each features set in the conditions of noise absence usually has several best solutions (combinations of features), or several solutions that are in the neighborhood of best solution.

The selection of the best features sets should be carried out taking into account the changes of the diagnostic quality at the noise action.

The results of numerical experiments with nonlinear dynamic object allow making a conclusion about high efficiency of nonparametric dynamic models on base of integro-power Volterra series. The features set on base of Volterra kernels moments is most preferred when intelligent diagnostic system builds.

**References:** 1. Modeling, Diagnostics and Process Control: Implementation in the DiaSter System / J. Korbicz & J.M. Kościelny (eds). – Springer: Berlin, 2010. 2. Korbicz J. Fault Diagnosis: Models, Artificial Intelligence, Applications / J. Korbicz, J.M. Kościelny, Z. Kowalcuk & W. Cholewa (eds). – Springer: Berlin, 2004. 3. Simani S. Model-Based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques / S. Simani, C. Fantuzzi, R.J. Patton. – Springer-Verlag: New York, 2003. 4. Katipamula S. Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems – A Review. Part IHVAC&R RESEARCH / S. Katipamula, M.R. Brambley. – 2005. – Vol. 11. – № 1. – P. 3-25. 5. Doyle F.J. Identification and Control Using Volterra Models / F.J. Doyle, R.K. Pearson, B.A. Ogunnaike // Published Springer Technology & Industrial Arts, 2001. 6. Pavlenko V. Reconstruction of the Parameters Space on the Base of Diagnostic Models of Object with Using Volterra Models / V. Pavlenko, O. Fomin // Proc. of the 5th Middle Eastern Simulation and Modelling Conf. (MESM'2004).– Philadelphia University, Amman, Jordan. – 2004. – P. 30-40. 7. Pavlenko V. Methods For Black-Box Diagnostics Using Volterra Kernels / V. Pavlenko, A. Fomin // Proc. of the 2nd Int. Conf. on Inductive Modelling (ICIM'2008).– Kyiv. – 2008. – P. 104-107. 8. Pavlenko V. Technology for Data Acquisition in Diagnosis Processes By Means of the Identification Using Models Volterra / V. Pavlenko, O. Fomin, V. Ilyin // Proc. of the 5th IEEE Int. Workshop on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS'2009).– Rende (Cosenza), Italy. – 2009.– P. 327-332. 9. Grigorenko S.N. Information technology of diagnostics of electric motor condition using Volterra models / S.N. Grigorenko, S.V. Pavlenko, V.D. Pavlenko, A.A. Fomin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – Vol. 4. – № 11 (70).– P. 38-43. 10. Pavlenko V. Computing of the Volterra Kernels of a Nonlinear System Using Impulse Response Data / V. Pavlenko, M. Massri, V. Ilyin // Proc.of 9th International Middle Eastern Simulation Multiconference MESM'2008.– Philadelphia University, Amman, Jordan. – 2008. – P. 131-138. 11. Pavlenko V. Identification of systems using Volterra model in time and frequency domain (Chapter 10). Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing / V. Pavlenko, V. Speranskyy; Eds. V. Haasz & K. Madani, River Publishers. – 2014. – P. 233-270. 12. Pavlenko V. Identification Accuracy of Nonlinear System Based on Volterra Model in Frequency Domain / V. Pavlenko, A. Fomin, S. Pavlenko, Y. Grigorenko. – AASRI Procedia. – 2013. – Vol. 4.– P. 297-305. 13. Fukunaga K. Introduction to Statistical Pattern Recognition / K. Fukunaga. – Elsevier-Academic Press, 2010.

Надійшла (received) 20.09.2015

*Статью представил д-р техн. наук, проф. заведующий кафедрой "Компьютеризированные системы управления" Одесского национального политехнического университета Положаенко С.А.*

Pavlenko Vitaliy, Dr.Sci.Tech, Professor  
Odessa National Polytechnical University  
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044  
tel./phone: (048) 771-25-64, e-mail: pavlenko\_vitalij@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0002-5655-4171

Fomin Alexander, PhD, Associate Professor  
Odessa National Polytechnical University  
Ave. Shevchenko, 1, Odessa, Ukraine, 65044  
tel./phone: (048) 705-83-79, e-mail: aleksandr.fomin@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0002-8816-0652

УДК 004.2: 004.3

**Н.І. ПОВОРОЗНЮК**, канд. техн. наук, доц., НТУУ "КПІ", Київ,  
**К.Є. БОБРІВНИК**, асистент, НУХТ, Київ

## ОНТОЛОГІЙ – ЗАСІБ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЗМІСТУ НАВЧАЛЬНИХ ДИСЦИПЛІН

Зміст навчальних дисциплін має відображати фундаментальну інформацію у своїй предметній області, а також основні тенденції розвитку. Для представлення знань у предметній області в останні десятиліття широко застосовується онтологічний підхід. Застосування онтологій для формування змісту навчальних дисциплін дає змогу підвищити якість навчання. Бібліогр.: 13 назв.

**Ключові слова:** навчальна дисципліна, предметна область, представлення знань, онтологія.

**Постановка проблеми і аналіз літератури.** Впродовж останніх десятиліть спостерігається інтенсивне впровадження інформаційних технологій в освіті. Дистанційні методи навчання, електронні засоби навчання (*e-learning*), інтелектуальні навчальні системи (*ITS-Intelligent Tutoring System*) – ось лише деякі приклади такого широкого впровадження. Гостра необхідність застосування інформаційних технологій в освіті обумовлена різким зростанням вимог до якості освіти в умовах науково-технічного прогресу [1].

Різко зростаюча складність виробництва, яке змінюється швидкими темпами, призводить до лавиноподібного зростання обсягу інформації, яка швидко застаріває. Це ставить підвищенні вимоги до підготовки фахівців. Навчальні плани і програми підготовки мають адекватно відображати предметні області, у яких будуть працювати майбутні фахівці. Представлення знань у предметних областях (*Knowledge representation*) є одним з важливих напрямів в області штучного інтелекту [2]. Одним з найпопулярніших є онтологічний підхід до представлення знань. Більшість публікацій присвячені втіленню концепції Semantic Web у комп’ютерних мережах [3, 4]. Зокрема велику увагу дослідники зосередили на методологіях побудови онтологій [5 – 9].

Застосування онтологій для формування структури навчальних курсів присвячені лише окремі роботи [1]. Порівняльний аналіз застосування моделей для організації навчального контенту для технічної освіти виконано в [10].

**Мета статті.** Розробити онтологію предметної області для максимально повного її представлення у відповідній навчальній дисципліні.

**Застосування онтологій для представлення знань.** Онтології застосовуються у різних галузях, різних масштабах і з різними цілями, тому загального визначення онтології немає [3, 4, 11]. Зазвичай під онтологією розуміють формальний явний опис понять (*concepts*) предметної області, взаємозв'язків (*relations*) між поняттями і властивостей (*attributes* або *properties*) понять. Широке впровадження онтологій у різних областях обумовлено такими перевагами:

– забезпечується спільне однозначне розуміння понять предметної області і усувається неоднозначне трактування цих понять. Це дає змогу командам розробників обмінюватися інформацією без риску виникнення непорозумінь. Для програмних засобів це можливість перейти від пошуку інформації за структурними ознаками до семантичного пошуку, тобто до пошуку, що ґрунтуються на значенні слова чи виразу. Семантичний пошук інформації значно підвищує її ефективність, тому в Інтернеті здійснюється гігантський проект Semantic Web по переходу на автоматизований семантичний пошук інформації;

– можливість багаторазового використання знання (*reuse knowledge*) про предметну область, тобто розробникам онтології не потрібно кожен раз починати з нуля (*from scratch*), а скористатися вже розробленою онтологією, пристосувавши її до своїх потреб;

– розмежування значущої інформації у предметній області від другорядної і оперативної. Така властивість онтологій має надзвичайно важливе значення для відображення предметної області на навчальну дисципліну, оскільки на останню відводиться обмежена кількість годин у навчальних планах;

– забезпечує ретельний аналіз предметної області і створює її інформаційний каркас.

При розробці онтологій слід керуватися такими критеріями [12].

1. **Ясність** (*Clarity*): визначення мають бути формальними, повними, об'єктивній і незалежними від контексту. Це сприяє обмеженню кількості можливих інтерпретацій понять і підвищенню ефективності комунікацій.

2. **Узгодженість** (*Cohistency*): логічні виводи мають бути узгодженими з існуючими визначеннями понять, забезпечуючи уникнення протиріч.

3. **Розширюваність** (*Extendibility*): під час розробки онтологій спочатку створюються основні поняття, які утворюють ядро онтології. Має бути передбачена можливість для розширення онтології без зміни існуючих визначень.

**4. Мінімальний вплив кодування** (*Minimal encoding bias*): для спільного використання онтологій концептуалізація має бути проведена на рівні знань (knowledge-level), а не на рівні символьного кодування. Це дає змогу обмінюватися інформацією програмними агентами, незалежно від платформи, на якій вони створені.

**5. Мінімальна онтологічне зобов'язання** (*Minimal ontological commitment*): сукупність понять онтології має бути достатньою для успішної діяльності впродовж всього життєвого циклу. Це полегшує обмін інформацією між простими онтологіями. Якщо ж повнота онтології не задоволяє індивідуального користувача, то відповідно до принципу розширеності має бути передбачений механізм доповнення онтології.

**Послідовність розробки онтології предметної області.** У залежності від сфери застосування, масштабу і виду онтології розроблені різні методики їх створення. У той же час існують загальні принципи і етапи створення онтологій. Створення онтології здійснюється у кілька етапів [11, 12].

**Специфікація.** На етапі специфікації має визначатися мета створення онтології, коло осіб і організацій, для яких вона призначається, ступінь формалізму, масштаб онтології, включаючи сукупність термінів, їх характеристики і ступінь деталізації.

**Пошук та збирання інформації** (*Knowledge Acquisition*). Джерелами інформації у конкретній предметній області є книги, підручники, посібники, довідники, періодичні і неперіодичні видання. У наш час гіганські обсяги інформації акумульовані у локальних і глобальних комп’ютерних мережах, зокрема в Інтернеті. Велику цінність мають знання експертів у даній предметній області. У результаті пошуку та збирання інформації формується перелік спеціальних термінів предметної області, які можна поділити на іменники, що позначають об’єкти предметної області, і дієслова, що характеризують стан об’єктів і взаємодію між ними.

**Концептуалізація.** На цьому етапі створюється концептуальна модель предметної області, для чого на основі переліку термінів, сформованому на попередньому етапі, створюється і уточнюється глосарій — словник термінів з поясненнями і тлумаченнями [7, 8, 9].

**Інтеграція.** Створюючи онтологію у певній предметній області доцільно заливати елементи з інших онтологій. Це дає змогу значно прискорити створення онтологій і економити ресурси.

*Формалізація та імплементація.* Модель знань формалізується за допомогою редакторів онтологій і мов програмування. У роботі використовувався редактор Protégé і мова OWL.

*Оцінка (Evaluation).* Створену онтологію слід оцінити на її відповідність певним показникам якості.

*Підтримка (Maintenance).* Функціонування створеної онтології потрібно підтримувати впродовж всього життєвого циклу: усувати недоліки і помилки, допущені при створенні, поповнювати і модернізувати у відповідності з прогресом у предметній області.

*Створення документації.* Документація життєвого циклу онтології дає змогу розробникам і кінцевим користувачам відслідковувати її структуру і процес розвитку.

Особливістю технічно-технологічного напряму освіти є необхідність представлення для опрацювання студентам значної кількості як текстової, так і мультимедійної інформації – схеми, креслення, відео, тощо. Кожен елемент виступає навчальним об'єктом, яким необхідно оперувати в базі даних і складається з тіла і метаданих.

Метаданні є специфікацією, що включає реєстраційні і інтерфейсні атрибути. До реєстраційних атрибутів відносяться імена авторів, дата написання, рівень складності, тощо. Інтерфейсні атрибути служать для узгодження даного навчального об'єкту з іншими навчальними об'єктами і включають списки термінів, використовуваних в навчальному об'єкті. Основні атрибути концептів наступні: назва навчального об'єкту, мета, теза-пояснення, тип НО (декларативний/процедурний), вид представлення (схема, відео, аудіо, текст), зарезервований час на опрацювання. Атрибути концептів визначалися виходячи із структури модуля студента, розроблюваного для технічно-технологічного напряму навчання і розглянуто в [13].

В якості прикладу було використано дисципліну "Алгоритмізація обичлювальних процесів", в якій виділено 65 понять. Аналіз навчальної інформації дав змогу виявити зв'язки між поняттями і визначити їх ієархію. В онтології дисципліни було встановлено відношення наступних типів: "*is-a*" використовується між концептами, які становлять категорії або класи; "*part-of*" використовується між категоріями (класами) і атрибутами (слотами), які відносяться до найвищого класу в ієархії.

Було використано такі атрибути: внутрішні "*have*" (визначаються внутрішньою властивістю об'єкту, наприклад, у фрейма "алгоритм" – лінійний); зовнішні "*is-a*" (визначаються зовнішньою властивістю об'єкту, наприклад, у фрейма "циклійний" – визначення); частина "*part-of*" (є відношенням приналежності і показує, що концепт може бути частиною інших концептів, наприклад, "Види структур алгоритму"). На кафедрі

інформаційних систем Національного університету харчових технологій за допомогою програмного засобу Protégé реалізовано онтологію навчальної дисципліни "Алгоритмізація обчислювальних процесів".

**Висновки.** Застосування онтологій для формування структури навчальної дисципліни дає змогу залучити найважливішу інформацію з предметної області. Студенти можуть здійснювати семантичний пошук потрібної інформації і відслідковувати останні досягнення у вибраній галузі знань. Наукова новизна розробки полягає у тому, що онтології були застосовані для формування оптимального змісту навчальної дисципліни на відміну від традиційного застосування онтологій для розробки більш ефективних пошукових машин згідно з концепцією Semantic Web. Розробка онтології даної дисципліни започаткувало розробку онтології предметної області "Інформатика" для інформаційної підтримки навчального процесу. Застосування онтологій для представлення знань про предметну область у навчальній дисципліні дає змогу вилучити найважливішу і актуальну інформацію, уникнути непорозумінь у трактуванні основних понять, що значно підвищить якість навчання. Розроблену онтологію дисципліни планується використати для організації бази знань навчальних матеріалів, що дозволить спростити обробку інформації в моделі студента і організувати управління навчальними об'єктами в електронному ресурсі навчання.

**Список літератури:** 1. Онтологічний підхід до проектування автоматизованих навчаючих систем / В.П. Зінченко, М.І. Ходаковський, С.В. Зінченко, Т.І. Татулашвілі // Комп'ютерні засоби, мережі та системи. – 2009. – № 8. – С. 113-122. 2. Mizoguchi R. Towards Ontology Engineering / R. Mizoguchi, M. Ikeda // Technical Report AI-TR-96-1, ISIR, Osaka University. – 1996. – P. 78. 3. Guarino N. Understanding, building and using ontologies / N. Guarino // International Journal of Human-Computer Studies. – 1997. – Vol. 46. – P. 293-310. 4. López M.F. Overview of methodologies for building ontologies / M.F. López // Proceedings of IJCAI99's workshop on ontologies and problem solving methods: lessons learned and future trends. – Stockholm, Sweden. – 1999. – P. 4.1-4.13. 5. Noy N. Ontology development 101: A guide to creating your first ontology / N. Noy, D. McGuinness // Technical Report. №. KSL-01-05. – Stanford University. – 2001. – 127 p. 6. Fernández-López M. METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering / M. Fernández-López, A. Gómez-Pérez, N. Juristo // Spring Symposium on Ontological Engineering of AAAI. Stanford University, California. – 1997. – P. 33-40. 7. Sawsaa A.F. Building Information Science ontology (OIS) with Methontology and Protégé / A.F. Sawsaa, J. Lu // Journal of Internet Technology and Secured Transactions (JITST). – 2012. – Vol. 1. – P. 100-109. 8. Jarrar M. Towards Methodological Principles for Ontology Engineering. PhD thesis / M. Jarrar // Vrije Universiteit Brussel. – 2005. – Brussel. – 146 p. 9. Gómez-Pérez A. Ontological engineering: with examples from the areas of knowledge management, e-Commerce and the semantic web / A. Gómez-Pérez, M. Fernandez-Lopez, O. Corcho. – London: Springer-Verlag, 2004. – 235 p. 10. Поворозник Н.І. Моделі організації контенту технічних і технологічних дисциплін / Н.І. Поворозник, К.Є. Бобрівник // Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції "Wschodnie partnerstwo – 2014". – Vol. 5. – Прзemyśl: "Nauka i studia", 2014. – С. 75-77. 11. Pinto H.S. Ontologies: How can They be Built? / H.S. Pinto, J.P. Martins // Knowledge and Information Systems. – 2004. –

Vol. 6. – №. 4. – P. 441-464. 12. Gruber T.R. Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing / T.R. Gruber // International Journal of Human Computer Studies. – 1995. – Vol. 43. – P. 907-928. 13. Бобрівник К.С. Розробка модуля студента для електронних засобів навчання технічних і технологічних дисциплін / К.С. Бобрівник, Н.І. Поворознюк // Наукові записки УНДІЗ. – 2015. – Т. 35. – № 1. – С. 76-80.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ontologichnij pidhid do proektuvannja avtomatizovanih navchajuchih sistem / V.P. Zinchenko, M.I. Hodakov's'kij, S.V. Zinchenko, T.I. Tatulashvili // Komp'juterni zasobi, merezhi ta sistemi. – 2009. – № 8. – P. 113-122. 2. Mizoguchi R. Towards Ontology Engineering / R. Mizoguchi, M. Ikeda // Technical Report AI-TR-96-1, ISIR, Osaka University. – 1996. – P. 78. 3. Guarino N. Understanding, building and using ontologies / N. Guarino // International Journal of Human-Computer Studies. – 1997. – Vol. 46. – P. 293-310. 4. López M.F. Overview of methodologies for building ontologies / M.F. López // Proceedings of IJCAI99's workshop on ontologies and problem solving methods: lessons learned and future trends. – Stockholm, Sweden. – 1999. – P. 4.1-4.13. 5. Noy N. Ontology development 101: A guide to creating your first ontology / N. Noy, D. McGuinness // Technical Report. № KSL-01-05. – Stanford University. – 2001. – 127 p. 6. Fernández-López M. METHONTOLOGY: From Ontological Art Towards Ontological Engineering / M. Fernández-López, A. Gómez-Pérez, N. Juristo // Spring Symposium on Ontological Engineering of AAAI. Stanford University, California. – 1997. – P. 33-40. 7. Sawsaa A.F. Building Information Science ontology (OIS) with Methontology and Protégé / A.F. Sawsaa, J. Lu // Journal of Internet Technology and Secured Transactions (JITST). – 2012. – Vol. 1. – P. 100-109. 8. Jarrar M. Towards Methodological Principles for Ontology Engineering. PhD thesis / M. Jarrar // Vrije Universiteit Brussel. – 2005. – Brussel. – 146 p. 9. Gómez-Pérez A. Ontological engineering: with examples from the areas of knowledge management, e-Commerce and the semantic web / A. Gómez-Pérez, M. Fernandez-Lopez, O. Corcho. – London: Springer-Verlag, 2004. – 235 p. 10. Povoroznjuk N.I. Modeli organizacii kontentu tehnichnih i tehnologichnih disciplin / N.I. Povoroznjuk, K.С. Bobrivnik // Materiały X Międzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji "Wschodnie partnerstwo – 2014". – Vol. 5. – Przemyśl: "Nauka i studia", 2014. – P. 75-77. 11. Pinto H.S. Ontologies: How can They be Built? / H.S. Pinto, J.P. Martins // Knowledge and Information Systems. – 2004. – Vol. 6. – №. 4. – P. 441-464. 12. Gruber T.R. Towards principles for the design of ontologies used for knowledge sharing / T.R. Gruber // International Journal of Human Computer Studies. – 1995. – Vol. 43. – P. 907-928. 13. Bobrivnyk K.C. Rozrobka modulja studenta dla elektronnih zasobiv navchannja tehnichnih i tehnologichnih disciplin / K.C. Bobrivnyk, N.I. Povoroznjuk // Naukovyi zapiski UNDIZ. – 2015. – Т. 35. – № 1. – P. 76-80.

*Поступила (received) 10.08.2015*

*Статтю представив д-р техн. наук, проф. НТУУ "КПІ"  
Сильвестров А.М.*

Povorozniuk Nazar, Ph.D, Ass. Professor  
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"  
Prospect Peremohy, 37, Kyiv, Ukraine, 03056  
tel./phone: +38 044 236 7989, e-mail: Nazar\_Pov@ukr.net  
ORCID ID: 0000-0003-1383-9801

Bobrivnyk Kateryna, master  
National University of Food Technology  
Str. Volodymyrska, 68, Kyiv, Ukraine, 01601  
tel./phone: +38 044 289 5472, e-mail: L.Bobrivnyk@ukr.net  
ORCID ID: 0000-0003-2137-686X

**УДК 004.891.3+681.5**

**A.I. ПОВОРОЗНЮК**, д-р техн. наук, проф., НТУ "ХПІ",  
**Є.С. ХАРЧЕНКО**, магістр, НТУ "ХПІ"

## **ЗАСТОСУВАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ МЕДИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ**

Розглянуто особливості медичної діагностики, що впливають на якість прийняття рішень в системах підтримки прийняття рішень. Формалізовано експертну інформацію щодо заданих множин діагнозів та їх симптомів. Розроблено метод формування діагностичного висновку при проведенні терапевтичних обстежень на основі нечіткої логіки. Іл.: 4. Табл.: 2. Бібліogr.: 10 назв.

**Ключові слова:** медична діагностика, нечітка логіка, система підтримки прийняття рішень.

**Постановка проблеми.** Медицина являє собою слабко структуровану область знань [1], що створює серйозні труднощі при побудові систем прийняття рішень. В той же час, в практичній діяльності лікар вибудовує послідовність висновків, що спирається на уявлення про зв'язок спостережуваних у хворого ознак з певним діагнозом.

Діагностичний процес в медицині, побудований на міркуваннях про ознаки і їх поєднання, що обґрунтують або відкидають певну діагностичну гіпотезу [2], фактично спирається на логіку аргументації, що включає і відносини порядку на множині аргументів. Певний паралелізм у досягненні мети за допомогою міркування існує у лікарів і в інтелектуальних системах.

Особливість діагностичних проблемних ситуацій полягає в тому, що прийняття рішень в цьому випадку характеризується наявністю людського фактора на всіх рівнях і етапах процесу управління [3]. Крім того, в діагностичних проблемних ситуаціях об'єкт управління є джерелом істотно неповної, неточної, нечіткої інформації і протиріч (наприклад, прилад є джерелом неточності, пацієнт в клініці – джерелом нечіткості, неточності та неповноти).

Таким чином, актуальною є проблема формалізації задачі медичної діагностики на основі аналізу різномірної діагностичної інформації, обґрунтування вибору математичного апарату, розробки методу формування діагностичних висновків та його адаптація до заданої предметної галузі медицини з метою побудови системи підтримки прийняття рішень в медицині.

**Аналіз літератури.** Як показує огляд літературних джерел,

діагностичні проблемні ситуації мають кілька аспектів, що вимагають наукового аналізу та дослідження. По-перше, діагностика включає класифікацію неповністю певних станів [4]. По-друге, діагностика має кілька рівнів експертизи з непостійним складом групи експертів, які здійснюють вилучення інформації, виявлення закономірностей і протиріч, висування гіпотез, перевірку гіпотез та ін. [5]. По-третє, прийняття рішень має двоетапну організацію: інструментальними методами верифікуються ознаки, що підтверджують, або заперечують гіпотези; особа, яка приймає рішення, буде або використовує готові логічні правила, приймає робочу гіпотезу (остаточний діагноз) і здійснює потім вибір цілей і шляхів подолання сформованої проблемної ситуації [6].

При виникненні діагностичної проблемної ситуації недостатньо вивченими залишаються також питання дослідження і аналізу ситуацій інструментальними засобами при нечітко заданій інформації [7], де необхідно узгодити оцінки, одержувані від експертів, а також класифікувати діагностичні проблемні ситуації по множині критерій.

Медичний діагноз, як правило, включає в себе ретельне обстеження пацієнта, щоб перевірити наявність і силу деяких осібливостей, пов'язаних з підозрою на хворобу, щоб прийняти рішення – має пацієнт цю хворобу чи ні [8]. Симптом, такий як наприклад нежить, може проявлятися сильніше у одного пацієнта, а може бути помірним або навіть дуже непомітним для іншого. Досвід лікаря говорить йому, як об'єднати множину симптомів (ознаки і їх інтенсивність), щоб встановити правильний діагноз.

З врахуванням вище сказаного, в якості математичного апарату аналізу експертної інформації та результатів інструментальних досліджень пацієнтів выбрано нечітку логіку [9, 10], яка успішно застосовується в медичних діагностичних системах [9]. Але при її застосуванні в конкретній предметній області медицини (терапевтичні обстеження) необхідно формалізувати експертну інформацію щодо заданих множин діагнозів та їх симптомів, узгодити результати інструментальних досліджень пацієнтів з експертними оцінками та розробити методику формування діагностичного висновку.

**Мета статті.** Формалізація задачі медичної діагностики, розробка методики формування діагностичного висновку при проведенні терапевтичних обстежень на основі нечіткої логіки.

**Формалізація задачі медичної діагностики та побудова діагностичного висновку на основі нечіткої логіки.** Розглянемо множину хвороб  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$  а також визначимо множину симптомів  $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$  цих захворювань. Зазвичай маємо  $n \gg m$ .

Для опису симптомів пацієнта, буде виконуватися перевірка симптомів в наборі  $F$ , після чого кожній змінній буде присвоєно нечітке значення. Набір нечітких значень представлений наступною множиною: дуже низьке, низьке, помірне, високе, дуже високе.

Звіривши симптоми пацієнта з усіма  $n$  елементами множини симптомів  $F$  і призначивши належне нечітке значення для кожного компонента, множина симптомів пацієнта  $S$  буде мати наступний вигляд:

$$S = \{\langle f_1, v_1 \rangle, \langle f_2, v_2 \rangle, \dots, \langle f_n, v_n \rangle\},$$

де  $v_i$  – нечітке значення, присвоєне симптуому  $f_i$  при огляді пацієнта,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Досвід лікаря-експерта щодо набору розглянутих захворювань  $D$  зберігається в наборі нечітких таблиць, кожна з яких задає профіль для одного захворювання. Ми розглянемо три нечітких значення "Так", "Може бути" і "Ні", як показано на рис. 1, для виявлення наявності захворювання. Записи в таблицях профілю захворювання будуть формуватися з цих лінгвістичних змінних [9].



Рис. 1. Нечіткі значення для встановлення діагнозу

Для кожного  $i$ -го захворювання формується множина  $R_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k_i$ ) з  $k_i \leq n$  відповідних симптомів, що є підмножиною множини  $F$ . Завдання експерта – встановити відповідні значення для кожного елемента в таблиці профілів захворювань на підставі його досвіду. Це має бути зроблено для кожного захворювання в наборі  $D$ . Табл. 1 ілюструє фрагмент профілю для поширеної інфекції верхніх дихальних шляхів, заснований на експертних консультаціях лікаря.

Розглянемо процес діагностування пацієнта та отримання множини його симптомів  $S$ . Приклад такої множини приведений в табл. 2, яка показує нечіткі значення для всіх симптомів у загальній множині  $F$ .

Таблиця 1

## Профіль для захворювання "Грип"

Атрибути Симптоми \	Дуже низький	Низький	Помірний	Високий	Дуже високий
Нежить	Ні	Ні	Можливо	Так	Так
Лихоманка	Ні	Можливо	Так	Так	Так
Кашель	Ні	Можливо	Так	Так	Так
Ломкість в тілі	Ні	Можливо	Так	Так	Так
Головний біль	Ні	Можливо	Так	Так	Так
Збільшення лімфатичних вузлів	Ні	Ні	Можливо	Можливо	Можливо

Таблиця 2

## Таблиця симптомів пацієнта

Симптом	Нечітке значення*	Симптом	Нечітке значення*
Нежить	П	Збільшення лімфатичних вузлів за вухом	ДН
Висип світло рожевого кольору	ДН	Біль в суглобах	ДН
Лихоманка	В	Збільшення лімфатичних вузлів у шиї	П
Кашель	П	Слабкість	ДВ
Різкий і уривчастий кашель	ДН	Нудота	П
Ломкість в тілі	Н	Біль в горлі	П
Головна біль	Н	Свербіння	ДН
Чутливість до світла	ДН	Втрата апетиту	Н
Кон'юктивіт	В	Судоми	ДН

\* ДВ = дуже високий, В = високий, П = помірний, Н = низький, ДН = дуже низький.

Цілком природно, що розмір нечислових значень симптомів представлений нечіткими значеннями. Тим не менш, є й інші симптоми, такі як температура, тиск, рівень цукру в крові і т.д., які можуть бути задані числовим значенням. Такі значення мають бути належним чином приведені до нечіткого значення.

Нехай:

–  $s[f]$  – нечітке значення симптуому  $f$  у вхідній множині симптомів;

- $r_{ij}$  –  $j$ -й симптомом  $i$ -го діагнозу  $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ ;
- $P_{ij} [r_{ij}, v]$  – процент впевненості в  $i$ -му діагнозу при нечіткому значенні  $v$  симптому  $r_{ij}$ ;
- $\delta_{ij}$  – діагностичне рішення щодо  $i$ -го діагнозу, що базується на відповідному симптомі  $r_{ij}$ ;
- $k_i$  – загальна кількість відповідних симптомів для  $i$ -го діагнозу;
- $w_{ij}$  – вага  $r_{ij}$  симптуому в діагностуванні  $i$ -ої хвороби;
- $\sigma_i$  – загальне діагностичне рішення щодо  $i$ -ої хвороби.

Вплив симптуому  $r_{ij}$  на діагностичне рішення може бути отриманий безпосередньо з таблиці профілю хвороби  $P_{ij} [r_{ij}, v]$ . Нечітке значення  $v$  отримується із симптуому  $r_{ij}$  пацієнта як  $v_j$ . Значеню  $\delta_{ij}$  буде присвоєно одне зі значень нечіткого набору "Так", "Можливо" і "Ні". Воно може бути представлене наступним чином:

$$\delta_{ij} = P_{ij} [r_{ij}, v_j]. \quad (1)$$

Підсумовуючи ефект усіх  $k_i$  відповідних функцій, загальне діагностичне рішення щодо  $i$ -ої хвороби отримується наступним чином:

$$\sigma_i = \left( \sum_{j=1}^{j=k_i} w_{ij} \delta_{ij} \right) / \left( \sum_{j=1}^{j=k_i} w_{ij} \right). \quad (2)$$

Ваговий коефіцієнт  $w_{ij}$  вводиться тут для того, щоб лікар міг вказати, що деякі симптоми можуть мати більше або менше значення ніж інші при діагностиці захворювання, і він повинен встановити відповідні відносні значення ваг. Якщо всі симптоми мають однакове значення, то ваговий коефіцієнт буде дорівнювати одиниці для всіх функцій. У цьому випадку вираз (2) може бути спрощений до:

$$\sigma_i = \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{j=k_i} \delta_{ij}. \quad (3)$$

Останнім кроком є отримання чітких значень [10], що визначають вірогідність наявності для кожного захворювання у множині  $D$ . Щоб показати, як отримати такі чіткі значення, розглянемо наступний приклад.

Припустимо, що дане захворювання  $d_i$ , що має 10 відповідних юому симптомів, кожен з яких має однакову вагу в діагностиці. Припустимо, що при використанні виразу (1) були отримані діагностичні рішення відповідні 7 "Так", 2 "Можливо" і 1 "Ні".

Загальне діагностичне рішення буде мати вигляд:

$$\sigma_i = (7 \text{ "Tak"} + 2 \text{ "Mожливо"} + 1 \text{ "Hi"}) / 10.$$

Отримана нечітка множина зображена на рис. 2.

Нехай:

- $c_i$  – центр ваги загального нечіткої множини рішення;
- $c_y$  – центр ваги для нечіткого значення "Так";
- $q_i$  – визначеність присутності розглянутої хвороби  $d_i$  в процентах.

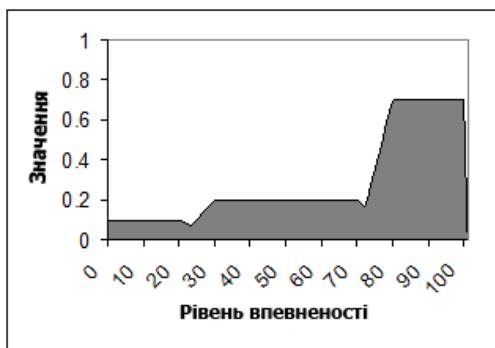


Рис. 2. Нечітка множина, що становить загальне діагностичне рішення

Отже, чітке значення рішення для хвороби  $d_i$  буде обчислено, як показано нижче. Слід зазначити, що якщо для всіх відповідних симптомів діагнозу  $d_i$  значення лінгвістичної змінної буде "Так", то рішення матиме 100%.

$$q_i = (c_i / c_y) \times 100\%. \quad (4)$$

Для даного прикладу значення  $c_i = 0,69$  та  $c_y = 0,87$ . Це говорить про те, що впевненість у присутності розглянутого захворювання становить 79%.

Обробка вимірюваних значень. Симптоми, що мають вимірювані значення, такі як температура, цукор в крові і т.д., будуть вказані в виді числового значення. Для простоти можна використовувати фіксовані таблиці, підготовані лікарем, щоб відобразити ці числові значення в виді нечітких значень з множини {дуже низька, низька, помірна, висока, дуже висока}. Це рішення в деяких випадках може бути доцільним. Тим не менш, розглянемо рішення, яке є більш точним і дозволяє уникнути різких перепадів значень. Розглянемо приклад зі значенням цукру в крові, як показано на рис. 3.

На рис. 3 представлена нечітка множин з чотирьох значень, які відображають рівень глюкози в крові. Якщо виміряне значення, наприклад, дорівнюватиме 8,7%, то дане значення буде віднесене до

нечіткої змінної "середній" зі значенням коефіцієнту 0,3 і "Високий" зі значенням коефіцієнту 0,7.

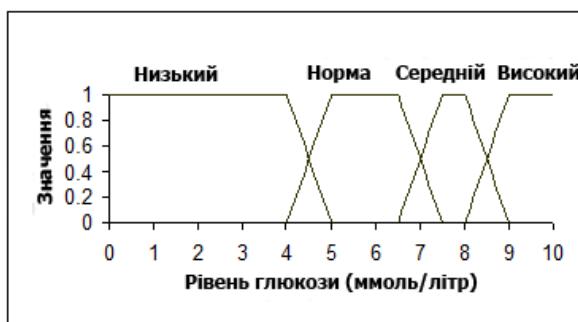


Рис. 3. Нечітка множина рівня цукру в крові

Припустимо, що в профілі деякого захворювання  $d_i$  зберігається наступна інформація:

- якщо рівень цукру "середній", то впевненість у діагнозі  $d_i$  "Можливо".
- якщо рівень цукру "високий", то впевненість у діагнозі  $d_i$  "Так".

Таким чином, діагностичне рішення  $\delta_{ij}$  для захворювання  $d_i$  на основі значення рівню цукру в крові 8,7% буде прийматися на основі двох нечітких значень: "Можливо" з коефіцієнтом 0,3 та "Так" з коефіцієнтом 0,7, як показано на рис. 4.

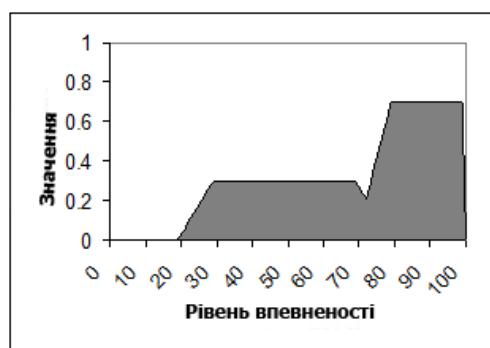


Рис. 4. Нечітка множина діагностичного рішення на основі значення рівню цукру в крові (8,7%)

Дане рішення може бути узагальнене з можливістю включення інших числових значень, таких як кров'яний тиск.

У цьому випадку дана міра може складатися з чотирьох можливих нечітких множин і має бути застосоване правило мінімуму для об'єднання пар нечітких множин з застосуванням оператора "І".

**Висновки.** В результаті виконаної роботи було формалізовано експертну інформацію щодо заданих множин діагнозів та їх симптомів при проведенні терапевтичних обстежень. Запропоновано формування профілів захворювань та їх зберігання у вигляді нечітких таблиць. Розроблено метод формування діагностичного висновку на основі нечіткої логіки. Виконана тестова перевірка працевдатності розробленого методу.

**Список літератури:** 1. Кобринський Б.А. Автоматизовані системи диференціальної діагностики спадкових захворювань / Б.А. Кобринський, Л.З. Казанцева, А.Є. Фельдман // Спадкова патологія людини – М.: Медицина, 1992. – С. 229-239. 2. Виноградов А.В. Диференціальний діагноз внутрішніх хвороб: довідковий посібник для лікарів / А.В. Виноградов. – М.: Медицина, 1987. – С. 96-117. 3. Евербек Г. Диференційна діагностика хвороб у дитячому віці: Пер. з нім. / Г. Евербек. – М.: Медицина, 1980. – С. 146-185. 4. Рігельман Р. Як уникнути лікарських помилок. Книга практикуючого лікаря: Пер. з англ. / Р. Рігельман. – М.: Практика, 1994. – С. 45-216. 5. Лукашевич І.П. Проблема отримання та передачі медичних знань / І.П. Лукашевич, А.Л. Сиркін // Комп'ютерна хроніка. – 1994. – № 8-9. – С. 39-43. 6. Rassel B. Філософія логічного атомізму (1918) / Б. Rassel // Філософія логічного атомізму. – Томськ: Вид-во "Водолій", 1999. – С. 3-108. 7. Кобринський Б.А. Нечітка логіка в аналізі образних уявлень в медичних системах штучного інтелекту / Б.А. Кобринський // Міжнар. конф. по м'яких обчислень і вимірювань: Зб. докл. Т.1. – СПб. – 1998. – С. 233-235. 8. Finn V.K. Pro один варіант логіки аргументації / В.К. Фінн // HTL. Сер.2. – 1996. – № 5-6. – С. 3-19. 9. Innocent P.R. Fuzzy Methods and Medical Diagnosis / P.R. Innocent, R.I. John, J.M. Garibaldi // The Centre for Computational Intelligence Department of Computer Science De Montfort University, Leicester, UK. – 2004. – С. 4-17. 10. Klir J.K. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and applications / J.K. Klir, B. Yuan – Prentice-Hall, 1995. – С. 2-7.

**Bibliography (transliterated):** 1. Koprins'kij B.A. Avtomatizovani sistemi diferencial'noi diagnostiki spadkovih zahvorjuvan' / B.A. Koprins'kij, L.Z. Kazanceva, A.Є. Fel'dman // Spadkova patologija ljudini. – M., Medicina, 1992. – P. 229-239. 2. Vinogradov A.V. Diferencial'nij diagnoz vnutrishnih hvorob: dovidkovij posibnik dlja likariv / A.V. Vinogradov. – M.: Medicina, 1987. – P. 96-117. 3. Everbek G. Diferencijna diagnostika hvorob u ditjachomu vici: Per. z nim. / G. Everbek. – M.: Medicina, 1980. – P. 146-185. 4. Rigel'man R. Jak uniknuti likars'kikh pomilok. Kniga praktikujuchogo likarja: Per. z angl. / R. Rigel'man – M.: Praktika, 1994. – P. 45-216. 5. Lukashevich I.P. Problema otrimannija ta peredachi medichnih znan' / I.P. Lukashevich, A.L. Sirkin // Komp'juterna hronika. – 1994. – № 8-9. – P. 39-43. 6. Rassel B. Filosofija logichnogo atomizmu (1918) / B. Rassel // Filosofija logichnogo atomizmu. – Toms'k: Vid-vo "Vodolij", 1999. – P. 3-108. 7. Koprins'kij B.A. Nechitka logika v analizi obraznih ujavlen' v medichnih sistemah shtuchnogo intellektu / B.A. Koprins'kij // Mizhnar. konf. po m'jakih obchislen' i vimirjuvan': Zb. dokl. – 1998. – T.1. – SPb. – P. 233–235. 8. Finn V.K. Pro odin variant logiki argumentacii / V.K. Finn // NTI. Ser.2. – 1996. – № 5-6. – P. 3-19. 9. Innocent P.R. Fuzzy Methods and Medical Diagnosis / P.R. Innocent, R.I. John, J. M. Garibaldi // The Centre for

Computational Intelligence Department of Computer Science De Montfort University, Leicester, UK. – 2004. – P. 4-17. **10. Klir J.K.** Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and applications / **J.K. Klir, B. Yuan** – Prentice-Hall, 1995. – S. 2-7.

*Поступила (received) 20.07.2015*

*Статтю представив д-р техн. наук, проф. каф. обчислювальної техніки та програмування Леонов С.Ю.*

Povoroznjuk Anatolij, Dr.Sci.Tech, Professor  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002  
tel./phone: (057) 707-60-19, e-mail: Al.Povoroznjuk@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0003-2499-2350

Kharchenko Evgenij, master  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Uchitelskaja, 11, Peresechnoe, Kharkov, Ukraine, 62364  
tel./phone: +38 066 2319803, e-mail: xabi@meta.ua  
ORCID ID: 0000-0006

**УДК 004.67:618.3**

**I.C. СКАРГА-БАНДУРОВА**, д-р техн. наук, доц., СНУ ім. В. Даля,  
Сєвєродонецьк,

**Т.О. БІЛОБОРОДОВА**, асп. СНУ ім. В. Даля, Сєвєродонецьк

## **ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ АНАЛІЗУ ДАНИХ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕОНАТАЛЬНИХ ГІПОКСИЧНИХ УРАЖЕНЬ ЦЕНТРАЛЬНОЇ НЕРВОВОЇ СИСТЕМИ**

Обґрунтовано необхідність використання методів інтелектуального аналізу даних для розв'язання проблеми прогнозування уражень центральної нервової системи (ЦНС) у новонароджених. Визначено основні етапи отримання даних для підтримки прийняття рішень при прогнозуванні патології ЦНС. Запропоновано нові інформаційні моделі прогнозування гіпоксичного ураження ЦНС у новонароджених. Надано результати оцінки ефективності базових алгоритмів аналізу даних. Іл.: 3. Табл.: 3. Бібліогр.: 13 назв.

**Ключові слова:** аналіз даних, прогнозування, підтримка прийняття рішень, алгоритм, оцінка ефективності, модель.

**Опис проблеми.** Патологічні стани матері під час вагітності, її анамнез життя є однією з основних причин ускладнень у новонародженого. Гіпоксичне ураження центральної нервової системи у новонароджених – це ускладнення патології вагітності та пологів, яке викликане кисневим голодуванням головного мозку. Сучасна медицина відносить цю патологію до вкрай серйозних проблем в перинатальній неврології, що може привести до дитячої смертності або інвалідності [1]. Та незважаючи на це, механізми розвитку гіпоксичного ураження центральної нервової системи у новонароджених ще недостатньо вивчені та потребують подальшого дослідження.

Раннє прогнозування ризику розвитку гіпоксичного ураження ЦНС у новонародженого та своєчасно прийняті заходи щодо попередження цих станів збільшують вірогідність сприятливого перебігу та усунення наслідків подібних станів.

Дуже важливо заздалегідь передбачити можливість даної патології у новонародженого, щоб, в разі потреби, своєчасно надати медичну допомогу новонародженному або направити вагітну з високим ризиком розвитку гіпоксичного ураження ЦНС у майбутньої дитини до закладу вищого рівня надання акушерсько-гінекологічної та неонатальної допомоги.

**Огляд літератури.** Поточні дослідження в галузі впровадження

---

© I.C. Скарга-Бандурова, Т.О. Білобородова, 2015

інформаційних технологій для вирішення проблеми патології перинатального періоду дозволили досягти певного прогресу у попередженні ускладнень у новонароджених, разом з тим, через безліч факторів ризику розвитку гіпоксичного ураження ЦНС у новонароджених, відсоток прояви таких станів, як і раніше, високий.

Більшість досліджень в цій галузі спрямовані на вивчення моделювання процесу розвитку передчасних пологів. Для визначення основних п'ятнадцяти факторів, що впливають на передчасні пологи, автори статті [2] застосували такі вбудовані алгоритми комерційного програмного забезпечення для інтелектуального аналізу даних Clementine 10.0, як нейронні мережі та різні різновиди алгоритму дерево рішень. Наявність в акушерсько-гінекологічному анамнезі вагітної кесаревого розтину і штучної стимуляції пологів, як факторів передчасних пологів, були піддані регресійному та розвідувальному аналізу даних в дослідженні канадських вчених [3]. Для виявлення знань з метою поліпшення діагностики передчасних пологів був проведений факторний аналіз великої кількості даних, витягнутих з медичного сховища даних [4]. У досліджені [5] для виявлення та визначення груп, схильних до ризику перинатальної смертності, і кількісної оцінки ймовірності несприятливого результату для кожного певного кластера, авторами запропоновано використання методу кластеризації із застосуванням алгоритмів логістичної регресії і самоорганізованих карт Кохонена. У статті [6] наведено випадок практичного застосування health analytics в реанімаційній неонатології для виявлення закономірностей між частотою серцевих скорочень та інфекцією, що розвивається у немовля, для своєчасної діагностики захворювань в неонатальному періоді. Клінічні дослідження із застосуванням методів інтелектуального аналізу даних для передбачення жовтяниці у новонароджених на підставі даних сімейного анамнезу, фізичного огляду новонародженого і даних клінічних обстежень були проведені авторами роботи [7]. Для виконання моделювання використовувалися дерева рішень, Байесові мережі, нейронні мережі, алгоритми SMO і методи лінійної регресії.

Аналіз робіт в даній області показав, що дані, так само як і результати їх обробки, прогнозування і моделювання для попередження патології новонароджених потребують подальшої систематизації та узагальнення. Також недостатньо вивчено вплив певних поєднань різних факторів на тяжкість стану новонароджених. Це дослідження є наступним кроком у напрямку аналізу медичних даних [8] для отримання більш якісних моделей для реалізації процедур підтримки прийняття рішень при прогнозуванні патологій і ускладнень у новонароджених та використання цих знань для покращення надання медичної допомоги.

**Мета дослідження** – аналіз основних діагностичних ознак, оцінка ефективності базових алгоритмів, визначення найбільш точного методу для визначення патології.

**Підготовка даних.** В ході дослідження були вивчені історії 339 вагітностей, що закінчилися пологами. Прояви гіпоксичного ураження центральної нервової системи у новонароджених, такі як церебральна ішемія 1 – 3 ступенів, синдром церебральної депресії, інtranatalльна асфіксія новонародженого різних ступенів були діагностовані у 24 новонароджених, що дозволяє зробити ряд припущень про їх розвиток. Для кожної породіллі та новонародженого проаналізовані дані, що включають антропометричні, демографічні, клініко-лабораторні та інші показники. На рис. 1 представлена етапи отримання набору даних.

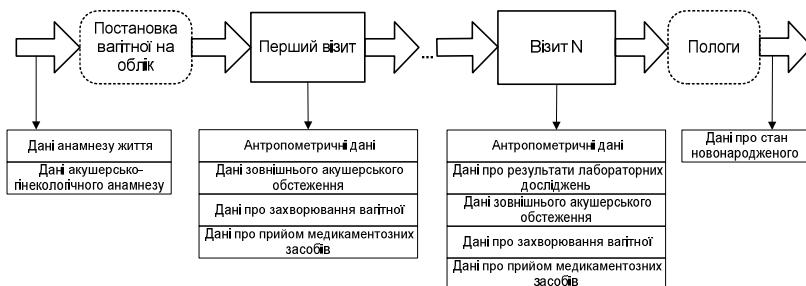


Рис. 1. Етапи отримання набору даних

В процесі роботи було виділено декілька наборів даних:

- анамнез життя: перенесені захворювання, соціальні та екологічні умови життя, умови роботи, погані звички;
- акушерсько-гінекологічний анамнез: початок статевого життя, особливості перебігу та кількість вагітностей, абортів, пологів;
- антропометричні дані під час цієї вагітності: вік, вага, зріст, показники артеріального тиску крові;
- лабораторні дослідження під час поточної вагітності: показники загального аналізу крові, біохімічні показники крові, показники результатів аналізів на специфічні антитіла IgG класу до TORCH-інфекцій, рівень цукру крові;
- зовнішнє акушерське обстеження: аускультація серцебиття плода, передлежання плоду, окружність живота;
- захворювання вагітної під час цієї вагітності;
- прийом медикаментозних засобів під час цієї вагітності;

– стан новонародженого: зрист, вага, оцінка стану по шкалі Апгар, наявність патологічних станів.

На основі виділених наборів даних, для прогнозування патологічних станів були визначені наступні параметри: вік вагітної, її зрист, вага, термін вагітності при пологах, яка вагітність та пологи за рахунком, кількість плодів, серцебиття плоду при аускультації та показники систолічного та діастолічного тиску під час останньої явки вагітної до гінеколога, що передує пологам, показники результатів аналізів на специфічні антитіла IgG класу до TORCH-інфекцій, а саме: токсоплазмозу, цитомегаловірусної інфекції, вірусу звичайного герпеса, краснухи, показники рівня цукру в крові та гемоглобіну. Виходячи з вищевказаного, для вирішення поставленої задачі було використано 18 параметрів. Фрагмент структури вхідних даних представлений у табл. 1.

Таблиця 1  
Фрагмент набору вхідних даних

Data structure	Age, Height, Massa, GestationAge, Pregnancy, Labor, Fetus, FetalHeartbeats, Toxo_IgG, CMV_IgG, HSV_IgG, Clamydia_IgG, Rubella_IgG, BloodSugar, Hemoglobin, SystolicPressure, DiastolicPressure, NeonatHypoxicsChemicalCerebral
Dataset 001	38, 164, 92.9, 39, 20, 3, 1, 136, 25, 89, 74, 0, , , 126, 105, 70, negative
Dataset 002	23, 165, 69, 39, 2, 1, 1, 146, 100, 86, 85, 0, , , 112, 105, 65, negative
Dataset 003	17, 153, 63.6, 39, 1, 1, 1, 140, 23, 19, 29, 0, , 4.8, 128, 90, 60, negative
Dataset 004	24, 167, 73.2, 38, 1, 1, 1, 125, 0, 10, 37, 0, , , 119, 105, 80, negative
Dataset 005	25, 160, 73, 41, 3, 3, 1, 148, 71, 72, 32, 0, , 3.4, 116, 120, 80, positive
Dataset 006	16, 158, 76, 38, 1, 1, 1, 140, 0.98, 0, 0, , , 107, 100, 65, negative
Dataset 007	35, 175, 97.7, 39, 3, 2, 1, 150, 100, 33, 63, 0, , 3.7, 114, 100, 60, negative

Для прогнозування гіпоксичних уражень ЦНС у новонародженого авторами розроблено декілька моделей з використанням наступних алгоритмів: Alternating decision tree, Random Forest, Naïve Bayes, Bayes Net. Аналіз даних проводився за допомогою вбудованих алгоритмів вільного програмного забезпечення для інтелектуального аналізу даних Weka [9].

**Дослідження алгоритмів аналізу даних.** Bayes Net, Naïve Bayes є різновидами Баєсової мережі – графічної ймовірнісної моделі, що являє собою множину змінних і їх причинно-наслідкових залежностей [10].

Фрагмент пропонованої ймовірнісної моделі, що реалізовано за допомогою алгоритму Naïve Bayes представлений на рис. 2.

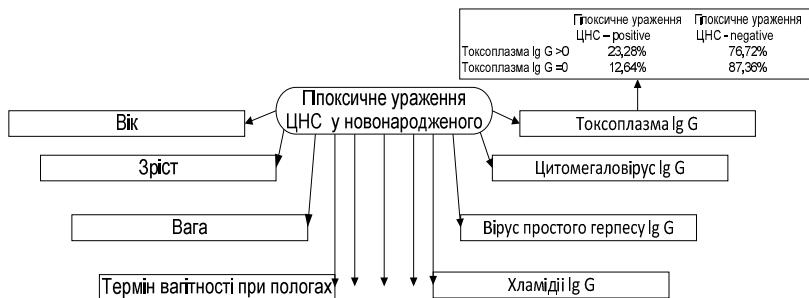


Рис. 2. Фрагмент графічної ймовірності моделі Naïve Bayes для прогнозування розвитку гіпоксичного ураження ЦНС у новонародженого

Представлена модель містить інформацію про залежність між обраними змінними, кожна з яких має асоційовану умовну таблицю ймовірності залежностями змінних від даних [11].

На рис. 2 подано результати обчислення залежності змінної Токсоплазма Ig G від її асоційованої умовної таблиці ймовірності, яка визначає ймовірність наявності гіпоксичного ураження ЦНС у новонародженого. В результаті реалізації ймовірнісної моделі за алгоритмом Naïve Bayes, отримано, що при результатах лабораторних досліджень Токсоплазма Ig G > 0 процент появи гіпоксичного ураження складає 23,28%, відсутність – 76,72%, при Токсоплазма Ig G = 0 процент появи дорівнює 12,64%, а відсутність даної патології – 87,36 %, що само по собі не може вважатися інформативним критерієм для прогнозування гіпоксичного ураження.

При реалізації підходу з використанням дерев рішень (Decision tree) спочатку обирається атрибут, найбільш пов'язаний з шуканою змінною, далі множини діляться на підмножини відповідно до обраного атрибута і процедура поділу підмножин повторюється до визначення остаточних критеріїв. В результаті отримуємо модель, що визначає обмежений набір змінних, які разом мають високу прогностичну силу для цільової змінної. Завдяки легкості інтерпретації та якісним результатам дерева рішень широко застосовуються для вирішення різних завдань в акушерстві, гінекології та неонатології [2, 7, 12].

Для визначення позитивного або негативного прогнозу гіпоксичного ураження ЦНС у новонароджених авторами розроблено наступну модель

з поділом вихідних наборів змінних на підмножини за методом Alternating Decision Tree (ADTree) (рис. 3).

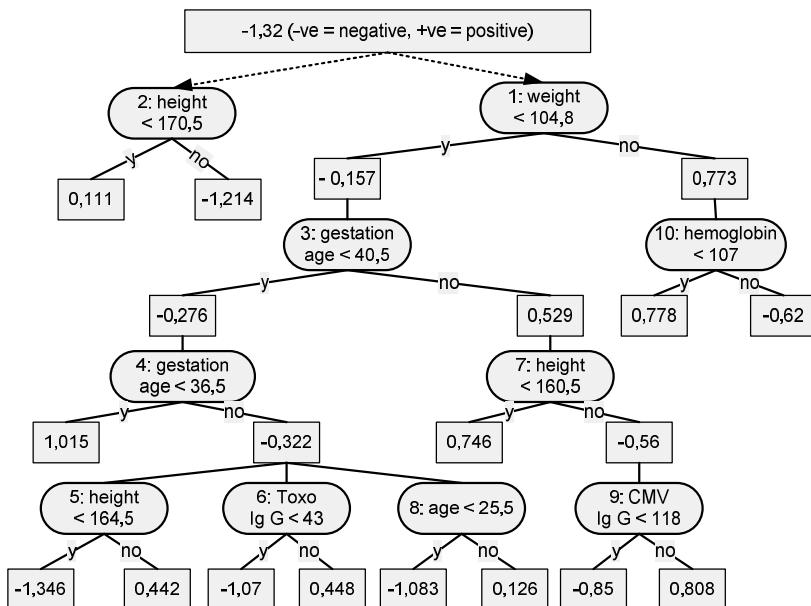


Рис. 3. Фрагмент моделі ADTree для прогнозування розвитку гіпоксичного ураження ЦНС

Графічне представлення ADTree, або знакозмінного дерева рішень, формується з набору вихідних даних. Прогнозні вузли представлені прямокутниками, а розподільні – еліпсами. Кожен роздільний вузол, пов’язаний з речовим числом, яке формує правило для наступного кроку, тобто якщо значення характеристики, наданої у вузлі, менше за вказане в умові, шлях передбачення проходить через лівий дочірній вузол, в іншому випадку – через правий дочірній вузол. Цифри, що стоять перед назвами характеристик у розподільних вузлах вказують на порядок, в якому були виявлені базові правила, це впорядкування може, в деякій мірі, вказувати на відносну важливість цих правил. У розглянутому прикладі загроза розвитку гіпоксичного ураження ЦНС кодується позитивними значеннями, а відсутність загрози – негативними. Остаточний прогноз, розраховується шляхом підсумування значень у вузлах передбачення, через які проходять відповідні характеристики. Наприклад, для значень: age = 25, height = 165, weight = 69,1, gestation

age = 41, Toxo lg G = 100, CMV lg G = 100, hemoglobin = 90, результат розраховується по вузлах 0, 1, 2, 3, 7, 9 (табл.2).

Таблиця 2  
Результати підрахунку прогнозу для наданого прикладу

Номер правила	0	1	2	3	7	9
Перевірка умови	N/A	69,1 < 104,8	165 < 170,5	41 ≥ 40,5	165 ≥ 160,5	100 < 118
Прогноз	- 1,32	- 0,157	0,111	0,529	- 0,56	- 0,85

У результаті підсумування прогнозних вузлів отримуємо значення -2,247, що є негативним, тому перевага надається припущеню про відсутність загрози розвитку гіпоксичного ураження.

Наступним алгоритмом, що перевірявся був Random Forest, який являє собою ансамбль з дерев рішень. При створені базової моделі процедура побудови множини дерев рішень кожен раз повторювалася для декілька зміненого набору даних. Для отримання остаточного прогнозу результати множини дерев рішень усереднювалися.

Для оцінки якості моделей, що використовують описані вище підходи, використовувалися показники ROC Area та Correctly Classified Instances (CCI) (табл. 3). ROC Area це кількісний показник оцінки якості бінарної класифікації, який надає наочне представлення про цінність моделі і дозволяє зробити порівняльний аналіз декількох моделей. Показник ROC Area, який дорівнює 1, згідно [13] відповідає ідеальному класифікатору. При використанні реальних випадків модель з показниками ROC Area, що дорівнюють 0,7 – 0,8, демонструє достатньо високу точність. Показник Correctly Classified Instances (CCI) – показник точності моделі.

Таблиця 3

Виконання різних алгоритмів аналізу даних при прогнозуванні розвитку гіпоксичного ураження ЦНС з використанням вхідних даних перебігу вагітності та перших днів життя новонародженого для тестового набору даних

Гіпоксичне ураження ЦНС		ROC Area / CCI, %			
Кількість пологів	Кількість випадків патології	Naïve Bayes	Bayes Net	Random Forest	Alternating decision tree
339	24	0.657 / 92.33 %	0.5 / 92.92%	0.909 / 97.34 %	0.833 / 93.8 %

Для вихідних даних поточного дослідження, алгоритм Decision tree показав якісніші результати ніж алгоритми Naïve Bayes та Bayes Net. За показниками якості моделі Alternating decision tree поступився тільки алгоритму Random Forest, що цілком логічно, оскільки Random Forest використовує множину дерев рішень для отримання результату.

**Висновки.** У результаті виконаних робіт запропоновано нові інформаційні моделі для прогнозування гіпоксичного ураження ЦНС у новонароджених, які відображають найбільш істотні ознаки досліджуваної патології, виявлені під час вагітності матері, та дозволяють використовувати виділені набори даних для отримання найбільш якісного прогнозу. Отримано результати порівняльного аналізу, що характеризують точність класифікації досліджуваних моделей для тестового набору даних. Розглянуто механізми аналізу даних за допомогою алгоритмів Naïve Bayes, Bayes Net, Random Forest, Alternating decision tree. За результатами моделювання, зроблено висновок, що в подальшому досліджені слід зосередити свою увагу на таких алгоритмах, як Random Forest і Decision Tree, які показали задовільні результати якості та точності при аналізі медичних даних.

У подальшому планується поліпшення результатів моделювання за рахунок збільшення наборів даних додатковими оцифрованими змінними.

**Список літератури:** 1. Волосовець А.П. Последствия перинатальных поражений центральной нервной системы: дискуссионные вопросы [Електронний ресурс] / А.П. Волосовець, С.П. Кривопустов, И.А. Логинова, М.А. Шакотько // Здоровье ребенка. – 2008. – № 4 (13). – Режим доступу www. URL: [http://www.mifua.com/archive/article\\_print/7232](http://www.mifua.com/archive/article_print/7232). – 21.07.2015 р. 2. Chen H.-Y. Exploring the risk factors of preterm birth using data mining / H.-Y. Chen, C.-H. Chuang, Y.-J. Yang, T.-Pi Wu // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38. – P. 5384-5387. 3. Bassil K.L. The association between obstetrical interventions and late preterm birth / K.L. Bassil, A.S. Yasseen III, M. Walker, M.D. Sgro, P.S. Shah, G.N. Smith, D.M. Campbell, M. Mamdani, A.E. Sprague, S.K. Lee, J.L. Maguire // American Journal of Obstetrics & Gynecology. – 2014. – Vol. 210. – Issue 6. – P. 538-540. 4. Prather J.C. Medical Data Mining: Knowledge Discovery in a Clinical Data Warehouse / J.C. Prather, D.F. Lobach, L.K. Goodwin, J.W. Hales, M.L. Hage, W.E. Hammond // Proceedings AMIA Annual Fall Symposium. – 1997. – P. 101-105. 5. A summary of findings and quantitative investigation targeted at: Reducing Infant Mortality in Indiana – Dec. 2014 [Електронний ресурс] – Режим доступу www. URL: [http://www.in.gov/omb/files/Infant\\_Mortality\\_Report.pdf](http://www.in.gov/omb/files/Infant_Mortality_Report.pdf). – 21.07.2015 р. 6. Raghupathi W. An Overview of Health Analytics [Електронний ресурс] / W. Raghupathi, V. Raghupathi // Health Analytics Journal – Режим доступу www. URL: [http://www.fordhamcdt.org/img/2013/07/HealthAnalyticsJournalPaperVersion5.final\\_.pdf](http://www.fordhamcdt.org/img/2013/07/HealthAnalyticsJournalPaperVersion5.final_.pdf). – 21.07.2015 р. 7. Ferreira D. Applying data mining techniques to improve diagnosis in neonatal jaundice [Електронний ресурс] / D. Ferreira, A. Oliveira, A. Freitas // BMC Medical Informatics and Decision Making. – 2012. – Vol. 12. – № 143 – Режим доступу www. URL: <http://www.biomedcentral.com/content/pdf/1472-6947-12-143.pdf>. – 21.07.2015 р. 8. Скарга-Бандурова І.С. Використання методів інтелектуального аналізу даних для діагностики стану плода / І.С. Скарга-Бандурова, Т.О. Білобородова // Theoretical

and Applied Computer Science and Information Technology: Proceedings of the 1st International Conference TACSI-2015. – Severodonetsk: East Ukrainian National University, 2015. – P. 76-80. **9.** The Weka Data Mining Software: An Update [Електронний ресурс] – Режим доступу www. URL: <http://www.kdd.org/explorations/issues/11-1-2009-07/p2V11n1.pdf> – 21.07.2015 р. **10.** Pearl J. Probabilistic Reasoning in Expert Systems: Networks of Plausible Inference [Електронний ресурс] / J. Pearl. – San Francisco: Morgan Kaufmann, 1988. – Режим доступу www. URL: [http://www.cogsci.northwestern.edu/Bayes/Pearl\\_1988.pdf](http://www.cogsci.northwestern.edu/Bayes/Pearl_1988.pdf) – 21.07.2015 р. **11.** Meyfroidt G. Machine learning techniques to examine large patient databases / G. Meyfroidt, F. Güizab, J. Ramonb, M. Bruynooghe // Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology. – 2009. – Vol. 23. – Issue 1. – P. 127-143. **12.** Vovsha I. Predicting Preterm Birth Is Not Elusive: Machine Learning Paves the Way to Individual Wellness / I. Vovsha, A. Rajan, A. Salleb-Aouissi, A. Raja, A. Radeva, H. Diab, A. Tomar, R. Wapner // Big Data Becomes Personal: Knowledge into Meaning. AAAI Spring Symposium Series. – 2014. – P. 82-89. **13.** Altman D. Statistics with Confidence: Confidence Intervals and Statistical Guidelines / D. Altman, D. Machin, T. Bryant, M. Gardner (Eds.). – 2nd Ed. – BMJ Books, 2000. – 254 p.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Volosovec A.P. Posledstvija perinatal'nyh porazhenij central'noj nervoj sistemy: diskussionye voprosy [Elektronniy resurs] / A.P. Volosovec, S.P. Krivopustov, I.A. Loginova, M.A. Shakot'ko // Zdorov'ye rebenka. – 2008. – № 4 (13). – Rezhim dostupu www. URL: [http://www.mif-ua.com/archive/article\\_print/7232](http://www.mif-ua.com/archive/article_print/7232). – 21.07.2015. **2.** Chen H.-Y. Exploring the risk factors of preterm birth using data mining / H.-Y. Chen, C.-H. Chuang, Y.-J. Yang, T.-Pi Wu // Expert Systems with Applications. – 2011. – Vol. 38. – P. 5384-5387. **3.** Bassil K.L. The association between obstetrical interventions and late preterm birth / K.L. Bassil, A.S. Yasseen III, M. Walker, M.D. Sgro, P.S. Shah, G.N. Smith, D.M. Campbell, M. Mamdani, A.E. Sprague, S.K. Lee, J.L. Maguire // American Journal of Obstetrics & Gynecology. – 2014. – Vol. 210. – Issue 6. – P. 538-540. **4.** Prather J.C. Medical Data Mining: Knowledge Discovery in a Clinical Data Warehouse / J.C. Prather, D.F. Lobach, L.K. Goodwin, J.W. Hales, M.L. Hage, W.E. Hammond // Proceedings AMIA Annual Fall Symposium. – 1997. – P. 101-105. **5.** A summary of findings and quantitative investigation targeted at: Reducing Infant Mortality in Indiana – Dec. 2014 [Elektronniy resurs] – Rezhim dostupu www. URL: [http://www.in.gov/omb/files/ Infant\\_Mortality\\_Report.pdf](http://www.in.gov/omb/files/ Infant_Mortality_Report.pdf) – 21.07.2015. **6.** Raghupathi W. An Overview of Health Analytics [Elektronniy resurs] / W. Raghupathi, V. Raghupathi // Health Analytics Journal – Rezhim dostupu www. URL: [http://www.fordhamcdt.org/img/2013/07/HealthAnalyticsJournal PaperVersion5.final\\_.pdf](http://www.fordhamcdt.org/img/2013/07/HealthAnalyticsJournal PaperVersion5.final_.pdf) – 21.07.2015. **7.** Ferreira D. Applying data mining techniques to improve diagnosis in neonatal jaundice [Elektronniy resurs] / D. Ferreira, A. Oliveira, A. Freitas // BMC Medical Informatics and Decision Making. – 2012. – Vol. 12. – № 143 – Rezhim dostupu www. URL: <http://www.biomedcentral.com/content/pdf/1472-6947-12-143.pdf> – 21.07.2015. **8.** Skarga-Bandurova I.S. Vikoristannja metodiv intelektual'nogo analizu danih dlja diagnostiki stanu ploda / I.S. Skarga-Bandurova, T.O. Biloborodova // Theoretical and Applied Computer Science and Information Technology: Proceedings of the 1 International Conference TACSI-2015. – Severodonetsk: East Ukrainian National University, 2015. – S. 76-80. **9.** The Weka Data Mining Software: An Update [Електронний ресурс] – Rezhim dostupu www. URL: <http://www.kdd.org/explorations/issues/11-1-2009-07/p2V11n1.pdf> – 21.07.2015. **10.** Pearl J. Probabilistic Reasoning in Expert Systems: Networks of Plausible Inference [Електронний ресурс] / J. Pearl. – San Francisco: Morgan Kaufmann, 1988. – Rezhim dostupu www. URL: [http://www.cogsci.northwestern.edu/Bayes/Pearl\\_1988.pdf](http://www.cogsci.northwestern.edu/Bayes/Pearl_1988.pdf) – 21.07.2015. **11.** Meyfroidt G. Machine learning techniques to examine large patient databases / G. Meyfroidt, F. Güizab, J. Ramonb, M. Bruynooghe // Best Practice & Research Clinical Anaesthesiology. – 2009. – Vol. 23. – Issue 1. – P. 127-143. **12.** Vovsha I. Predicting Preterm Birth Is Not Elusive: Machine Learning Paves the Way to Individual Wellness / I. Vovsha, A. Rajan, A. Salleb-Aouissi, A. Raja, A. Radeva, H. Diab, A. Tomar, R. Wapner // Big

Data Becomes Personal: Knowledge into Meaning. AAAI Spring Symposium Series. – 2014. – P. 82-89. 13. *Altman D.* Statistics with Confidence: Confidence Intervals and Statistical Guidelines / *D. Altman, D. Machin, T. Bryant, M. Gardner* (Eds.). – 2nd Ed. – BMJ Books, 2000. – 254 p.

*Надійшла (received) 10.08.2015  
Повторно 01.10.2015*

*Статтю представив д.т.н., проф. СНУ ім. В. Даля Рязанцев О.І.*

Skarga-Bandurova Inna, Dr.Sci.Tech, Assoc. Professor, Professor  
East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl  
Radyansky ave., 59-a, Siverodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400  
tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: skarga\_bandurova@ukr.net  
ORCID ID: 0000-0003-3458-8730

Biloborodova Tetyana, PhD student  
East Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl  
Radyansky ave., 59-a, Siverodonetsk, Luhansk region, Ukraine, 93400  
tel./phone: (064) 522-89-97, e-mail: beloborodova.t@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0001-7561-7484

УДК 004.04

**Ю.А. СКОБЦОВ**, д-р техн. наук, зав. каф., ДонНТУ, Донецк,  
**С.А. ЭЛЬ-ХАТИБ**, асп., ДонНТУ, Донецк

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА СЕГМЕНТАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ РОЯ ЧАСТИЦ

Представлена программная система сегментации медицинских изображений на основе алгоритма роя частиц и алгоритма  $k$ -средних. Реализована программная система для визуализации и апробации разработанного алгоритма. Проведено тестирование алгоритма, получены выходные результирующие изображения, выполнено сравнение результатов с другими алгоритмами сегментации. Ил.: 4. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** сегментация медицинских изображений, алгоритм роя частиц, алгоритм  $k$ -средних.

**Постановка проблемы.** Сегментацией называется процесс разделения изображения на различные по некоторому признаку или признакам области. Данные области соответствуют настоящим объектам или их частям, а границы разбиения – границам объектов. Результат обработки изображения во многом зависит от точности алгоритма сегментации. Алгоритмы сегментации разделяют изображение на отдельные области, число которых зависит от характера задачи.

Широкий спектр методов сегментации изображений описан в различной литературе, например, хороший обзор таких методов можно найти в [1].

На данный момент существует достаточно большое количество алгоритмов сегментации, которые имеют свои преимущества и недостатки. Но не существует одного универсального метода, поэтому для каждой задачи в общем случае необходимо подбирать вручную метод, способный выдавать наилучший результат.

**Анализ литературы.** В литературе представлен обширный перечень методов сегментации изображений, например в [1]. Среди них метод с использованием нейронной сети Кохонена (Kohonen Map), являющийся одним из наиболее часто используемых [2]. Сеть Кохонена является двухслойной сетью. Каждый нейрон первого (распределительного) слоя соединен со всеми нейронами второго (выходного) слоя, которые расположены в виде двумерной решетки.

При сегментации достаточно часто используется алгоритм  $k$ -средних, который основан на минимизации квадратичной ошибки. Данный алгоритм, как правило, неплохо выполняет кластеризацию точек (пикселей) на изображении, но в процессе обработки изображения он не

может исключить лишнюю информацию, такую, как например, шумы различного рода. Алгоритм  $k$ -средних выполняет построение  $k$  различных кластеров [1]. Выбор числа кластеров  $k$ , как правило, базируется на результатах предыдущих исследований либо на основании экспертной оценки.

В основе разработанного метода лежит алгоритм роя частиц (Particle Swarm Optimization, PSO) в сочетании с алгоритмом  $k$ -средних, который показал свою конкурентоспособность при решении NP-полных комбинаторных задач по сравнению с генетическими алгоритмами [3] (genetic algorithms) или алгоритмами имитации отжига (simulated annealing algorithms).

В 1995 году Джеймс Кеннеди (James Kennedy) и Рассел Эберхарт (Russel Eberhart) предложили метод для оптимизации непрерывных нелинейных функций, названный ими алгоритмом роя частиц [4]. Вдохновением для них послужила имитационная модель Рейнольдса, а также работа Хеппнера (Heppner) и Гренадера (Grenader) на схожую тему [5]. Кеннеди и Эберхарт отметили, что обе модели основаны на управлении дистанциями между птицами – а, следовательно, синхронность стаи является в них функцией от усилий, которые птицы прилагают для сохранения оптимальной дистанции.

Текущее состояние частицы характеризуется координатами в пространстве решений (то есть, собственно, связанным с ними решением), а также вектором скорости перемещения. Оба этих параметра выбираются случайным образом на этапе инициализации. Кроме того, каждая частица хранит координаты лучшего из найденных ею решений, а также лучшее из пройденных всеми частицами решений – этим имитируется мгновенный обмен информацией между птицами.

Было предложено несколько моделей PSO. Среди них три наиболее успешные: LBEST [4], Inertia Weighted PSO [5], Time-Varying Inertia Weighted PSO [6] и Canonical PSO [7].

**Цель статьи** – разработка метода сегментации медицинских изображений с помощью одного из алгоритмов роевого интеллекта – алгоритма роя частиц, разработка программной системы для исследования алгоритма, а также получение выходных результатов работы алгоритма.

Объектом исследования является процесс сегментации медицинских изображений.

Предметом исследования является метод сегментации изображений на основе смешанного алгоритма  $k$ -средних и роя частиц.

**Материалы и методы.** Для получения эффективного алгоритма сегментации изображений предлагается метод, в котором используется преимущества роевого алгоритма и метода  $k$ -средних. На первом этапе необходимо установить значение количества кластеров и случайным образом инициализировать их центры. Далее, согласно алгоритму кластеризации  $k$ -средних, определяется принадлежность каждого пикселя изображения определенному кластеру.

Смешанный алгоритм роя частиц и  $k$ -средних реализуется по тем же принципам, что и алгоритм муравьиных колоний [8]. Здесь каждая частичка  $x_i$  представляет  $N$  кластеров таким образом, что  $x_i = (m_{i1}, \dots, m_{ij}, \dots, m_{iN})$ , где  $m_{ij}$  представляет центр кластера  $j$  для частицы  $i$ . Фитнесс-функция для каждого набора кластеров рассчитывается согласно выражению:

$$f(x_i, Z_i) = \omega_1 \bar{d}_{\max}(Z_i, x_i) + \omega_2 (z_{\max} - d_{\min}(x_i)), \quad (1)$$

где  $z_{\max} = 2s - 1$  для  $s$ -bit изображения;  $Z_i$  – матрица, отображающая связь между пикселями и центром кластера для частицы  $i$ . Каждый элемент этой матрицы  $Z_{ip}$  показывает, принадлежит ли пиксель  $z_p$  кластеру  $C_{ij}$ , для частицы  $i$ . Константы  $\omega_1$  и  $\omega_2$  определяются пользователем;  $\bar{d}_{\max}$  – максимальное среднее евклидово расстояние от частиц до связанных с ними кластеров. Оно вычисляется согласно выражению:

$$\bar{d}_{\max}(Z_i, x_i) = \max_{j=1..N} \left\{ \sum_{\forall Z_p \in C_{ij}} d(Z_p m_{ij} / |C_{ij}|) \right\}. \quad (2)$$

В выражении (1)  $d_{\min}(x_i)$  – минимальное евклидово расстояние между парами кластерных центров:

$$d_{\min}(x_i) = \min_{\forall j_1, j_2, j_1 \neq j_2} \{d(m_{ij_1}, m_{ij_2})\}. \quad (3)$$

Пошаговое описание смешанного алгоритма роя частиц и  $k$ -средних приведено далее:

1. Инициализируется количество кластеров  $K$ , количество частиц  $m$ .
2. Инициализируются  $m$  наборов для  $K$  кластеров, которые будут использованы  $m$  частицами.
3. Для каждой частицы, пусть каждый пиксель  $x$  принадлежит тому кластеру, ближе к центру которого он находится.

4. Рассчитываются новые центры кластеров. Если кластер схож с предыдущим, то идем дальше, иначе – возвращаемся к пункту 3.
5. Сохраняется лучшее решение для каждой частицы ( $pbest$ ).
6. Сохраняется лучшее решение среди всех  $t$  частиц ( $gbest$ ).
7. Обновляются кластерные центры согласно решениям  $pbest$  и  $gbest$ .
8. Если выполняется условие останова, то выводится решение, иначе – возврат к пункту 3.

**Описание разработанной системы.** Разработана система, позволяющая производить визуализацию и индивидуально настраивать процесс сегментации. Имеется возможность сохранения результатов обработки в базе данных для последующего сравнения и визуального определения лучших результатов. Система разработана на платформе Microsoft.NET Framework в среде Microsoft Visual Studio.

На вход системы передается количество кластеров, на которые необходимо разбить изображение и само изображение. Результатом является результирующее изображение. Добавленный модуль роевого алгоритма является дополнением к уже существующей системе [8].

**Эксперименты.** В качестве базы для проверки алгоритма использовались изображения из набора известной компании в области телемедицины Ossiris [9]. Для сравнения результатов сегментации будем также приводить обработку одним из методов автоматической сегментации (алгоритм C-means [10]), а также одним из методов интерактивной сегментации (алгоритм Grow Cut[1]).

Все представленные изображение имеют глубину цвета 8 бит на пикセル и разрешающая способность 300 dpi.

Оценивание результата выполняется наблюдателем, имеющим представление о верном разбиении областей на снимках.

На рис. 1 представлен МРТ-снимок маленькой менингиомы серпа в межполушарной щели (1, *a*), после сегментации разработанным алгоритмом (1, *б*), после сегментации алгоритмом C-means (1, *в*) и алгоритмом Grow Cut (1, *г*).

Для сегментации изображение сегментировали на 5 кластеров. Как видно, контуры основных объектов были очерчены, но подробная идентификация весьма затруднительна. Данный снимок содержит едва различимую опухоль в центре. Различить ее без использования контрастного вещества практически невозможно. Как видно из результатов, наилучший результат показали автоматический и разработанный алгоритмы. Результирующие контуры более явно выделены в алгоритме роя частиц.

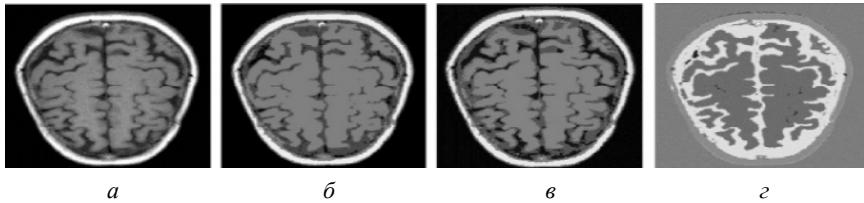


Рис. 1. Маленькая менингиома серпа в межполушарной щели:  
а – исходный снимок, б – алгоритм роя частиц, в – алгоритм C-means, г – алгоритм Grow Cut

На рис. 2 представлен этот же снимок, но с использованием контрастного вещества. В качестве контрастного вещества использовался гадолиний. Соответственно 2, а – изображение до сегментации, 2, б – после сегментации с помощью алгоритма роевых колоний, 2, в и 3, г – соответственно сегментация с помощью автоматического и интерактивного алгоритмов.

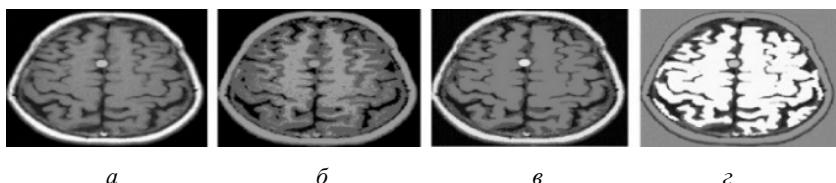


Рис. 2. Маленькая менингиома серпа в межполушарной щели с контрастным веществом: а – исходный снимок; снимки после применения алгоритмов: б – PSO, в – C-means, г – Grow Cut

Параметры начальных изображений на рисунках 1 и 2 идентичны. Размеры изображения – 800 на 600 пикселей. Результат сегментации получился похожим на сегментацию изображения 1. Но в данном случае, лучший с точки зрения наблюдателя результат у интерактивного алгоритма и алгоритма роя частиц. Все контуры были выделены четко, и получилась правильная разбивка на области. Окружность посередине изображения 2 – шваннома (невринома) – опухоль (размер 1 – 2 см). Чаще всего образуется из оболочек слухового и лицевого нервов. Обнаруживается с помощью компьютерной томографии или МРТ с контрастированием.

Для оценки качества работы алгоритма, необходимо также рассмотреть вариант нечетких границ контуров на снимке (нечеткая

резкость). На рис. 3 приведено нечеткое изображение черепа (границы размыты).

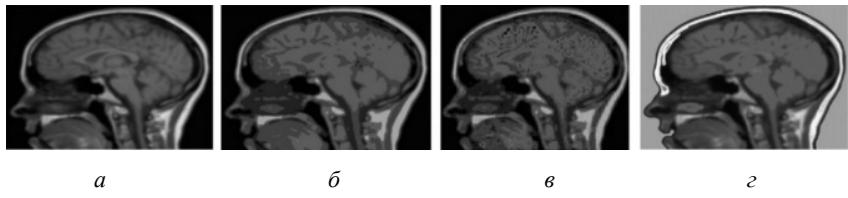


Рис. 3. Снимки после применения алгоритмов сегментации:  
(снимок черепа с размытыми исходными контурами)  
а – исходный снимок, б – PSO, в – C-means, г – Grow Cut

Параметры изображения 3: ширина – 800, высота – 600 пикселей.

Как видно из рисунков, наиболее четко и правильно выходные контуры были выделены на рис. 3, б и 3, г – соответственно алгоритмами роя частиц и Grow Cut.

Для оценивания работы алгоритма также необходимо проверить его работоспособность на контрастных изображениях. На рис. 8 приведен пример МРТ-снимка головного мозга с контрастированием.

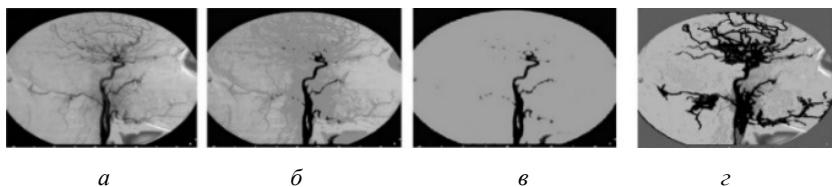


Рис. 4. Снимки после применения алгоритмов сегментации:  
МРТ-снимок головного мозга с контрастированием: а – исходный снимок,  
б – PSO, в – C-means, г – Grow Cut

Параметры изображения на рис. 4: ширина – 1024, высота – 1024 пикселя. Как видно из полученных результатов, наилучшее решение было найдено с помощью алгоритма роя частиц и алгоритма Grow Cut. На данных снимках присутствует и явно отделена сеть различных узловых элементов.

В табл. приведены лучшие найденные решения для изображений, а также количество кластеров для разбиения.

Как видно из представленной таблицы, для решения задач в общем случае не существует одного универсального алгоритма. В разных

случаях получаются различные результаты для разных снимков с помощью одного и того же алгоритма.

Таблица  
Результаты исследований

Номер изображения	Наилучшее решение	Количество кластеров
1	PSO, C-means	5
2	PSO, C-means	5
3	PSO, Grow Cut	5
4	Grow Cut	4

Разработанный алгоритм показал хорошую динамику, в 3 из 4 снимков, результаты его работы были правильными. Данные результаты подтверждают необходимость проведения дальнейших более глубоких исследований.

**Выводы.** Была разработана компьютерная система сегментации изображений на основании модифицированного алгоритма роя частиц и  $k$ -средних. Апробация показала высокую эффективность разработанного алгоритма. Использованный алгоритм показал в некоторых случаях свое превосходство по качеству результатов по сравнению с существующими алгоритмами сегментации изображений.

**Список литературы:** 1. *Fu K.S. A Survey on Image Segmentation / K.S. Fu, J.K. Mui // Pattern Recognition*, CA. – 1991. – Vol. 13. – P. 200-210. 2. *Dong G. Color clustering and learning for image segmentation based on neural networks / G. Dong, M. Xie // Neural Networks, IEEE Transactions*. – 2005. – P. 925-936. 3. *Sivanandam S.N. Introduction to genetic algorithms / S.N. Sivanandam, S.N. Deepa // Springer-Verlag Berlin Heidelberg*. – 2008. 4. *Kennedy J. Particle swarm intelligence / J. Kennedy, R.C. Eberhart // In Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks*. – LA. – 1995. – P. 1942-1948. 5. *Shi Y. A modified particle swarm optimizer / Y. Shi, R. Eberhart // The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings*. – 1998. – P. 69-73. 6. *Shi Y. Empirical study of particle swarm optimization / Y. Shi, R. Eberhart // Proceedings of the 1999 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. – 1999. – P. 1945-1950. 7. *Clerc M. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space / M. Clerc, J. Kennedy // IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. – 2012. – № 6 (1). – P. 58-73. 8. *Скобцов Ю.А. Сегментация изображений методом муравьиных колоний / Ю.А. Скобцов, С.А. Эль-Хатиб, А.И. Эль-Хатиб // Вестник Херсонского Национального технического университета*. – Херсон. – 2013. – № 1 (46). – С. 204-211. 9. Медицинская система OsiriX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.osirix-viewer.com/> 10. *Zhou H. An Overview of Fuzzy C-Means Based Image Clustering Algorithms / H. Zhou, G. Schaefer // Foundations of Computational Intelligence Studies in Computational Intelligence*. – 2010. – Vol. 202. – P. 295-310.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Fu K.S.* A Survey on Image Segmentation / *K.S. Fu, J.K. Mui* // Pattern Recognition. – CA. – 1991. – Vol. 13. – P. 200-210. 2. *Dong G.* Color clustering and learning for image segmentation based on neural networks / *G. Dong, M. Xie* // Neural Networks, IEEE Transactions. – 2005. – P. 925-936. 3. *Sivanandam S.N.* Introduction to genetic algorithms / *S.N. Sivanandam, S.N. Deepa* // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 2008. 4. *Kennedy J.* Particle swarm intelligence / *J. Kennedy, R.C. Eberhart* // In Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks. – LA. – 1995. – P. 1942-1948. 5. *Shi Y.* A modified particle swarm optimizer / *Y. Shi, R. Eberhart* // The 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. – 1998. – P. 69-73. 6. *Shi Y.* Empirical study of particle swarm optimization / *Y. Shi, R. Eberhart* // Proceedings of the 1999 IEEE Congress on Evolutionary Computation. – 1999. – P. 1945-1950. 7. *Clerc M.* The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space / *M. Clerc, J. Kennedy* // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2012. – № 6 (1). – P. 58-73. 8. *Skobcov Ju.A.* Segmentacija izobrazhenij metodom murav'inyh kolonij / *Ju.A. Skobcov, S.A. El'-Hatib, A.I. El'-Hatib* // Vestnik Hersonskogo Nacional'nogo tehnicheskogo universiteta. – Herson. – 2013. – № 1 (46). – P. 204-211. 9. Medicinskaja sistema OsiriX [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.osirix-viewer.com/> 10. *Zhou H.* An Overview of Fuzzy C-Means Based Image Clustering Algorithms / *H. Zhou, G. Schaefer* // Foundations of Computational Intelligence Studies in Computational Intelligence. – 2010. – Vol. 202. – P. 295-310.

*Поступила (received) 15.04.2015*

*Статью представил д.т.н., проф. кафедры "Электронная техника"  
ДонНТУ Чичикало Н.И.*

Skobtsov Yuri, Dr.Sci.Tech, Professor,  
Head of the "Automated control systems" department of  
Donetsk National Technical University  
Str. Tupoleva, 15, av. 73, Donetsk, Ukraine, 83112  
tel./phone: (062) 304-90-20, e-mail: ya\_skobtsov@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0003-3209-5297

El-Khatib Samer, master,  
postgraduate of the "Automated control systems" department of  
Donetsk National Technical University  
Str. Y. Galana, 48, Donetsk, Ukraine, 83076  
tel./phone: +38 095 310-77-74, e-mail: samer\_elkhatib@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0003-1929-0362

**УДК 519.95:612.018**

**Е.И. СОКОЛ**, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН Украины, ректор НТУ  
"ХПИ",

**С.С. ЛАПТА**, канд. техн. наук, доц., УИПА

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛЯЦИИ УГЛЕВОДНОГО ОБМЕНА**

Используя функционально-структурный компартментный подход, на основе современных физиологических представлений о системе регуляции углеводного обмена выполнено построение ее математической модели. Проверка адекватности модели и параметрическая идентификация проведены в случае внутривенного теста толерантности к глюкозе по литературным клиническим данным. Ил.: 1. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** функционально-структурный компартментный подход, регуляция углеводного обмена, математическая модель.

**Постановка проблемы.** В наших работах [1, 2] по математическому моделированию процессов регуляции углеводного обмена и нарушений, которые приводят к тяжелому эндокринному заболеванию – сахарному диабету (СД), была разработана модель, которая адекватно воспроизводит многочисленные экспериментальные и клинические данные динамики гликемии. На ее основе были предложены компьютерные методы диагностики и инсулинотерапии СД. Однако необходимость в их совершенствовании требует углубления и детализации этой модели, т.е. построения общей модели системы регуляции углеводного обмена с описанием динамики не только гликемии, но и инсулинемии.

**Анализ литературы.** Проблему недоступности для прямых измерений большинства физиологических переменных человека, необходимых для проведения диагностики состояния его организма, уже давно пытаются разрешить на основе построения математических моделей соответствующих физиологических процессов и пересчета с их помощью значений косвенных клинических данных, которые удалось измерить, на те, что недоступны, но непосредственно необходимы для проведения диагностики [3]. При этом традиционно применялось структурно-функциональное обобщение функциональной модели "черного ящика" Н. Винера [4] с морфологической структуризацией сложной системы и с последующим синтезом полученного множества моделей в интегральную модель всей системы [3]. Необходимость в описании большого множества, часто дублирующих друг друга

многофункциональных органов биосистемы и еще большего числа их взаимосвязей при существенно ограниченных возможностях экспериментальных измерений приводит к принципиальной гипотетичности таких моделей, проверить адекватность которых не представляется возможным.

Как альтернатива структурно-функциональному подходу в наших предшествующих работах [1, 2] было разработано оригинальное функционально-структурное обобщение функциональной модели "черного ящика" Н. Винера, согласно которому ее структуризация проводится не в морфологическом, а лишь в функциональном аспекте. Действие всех основных факторов, регулирующих уровень гликемии, учитывалось опосредовано, в конечном итоге, через его же значения. При этом получено простое дифференциально-разностное уравнение 1-го порядка с запаздывающим аргументом, удобное для проведения его численного анализа методом пошагового интегрирования. Уравнение оказалось физиологически адекватным и эффективным в медицинских приложениях.

Поэтому именно эта модель представляется наиболее перспективной для ее развития в полноценную глюкозоинсулиновую модель регуляции углеводного обмена, что и является **целью данной статьи**.

**Основной материал исследований.** Быстрая циркуляция крови по замкнутому кровеносному руслу за время около 1 минуты и ее перемешивание позволяют ограничиться однокомпартментным описанием, при котором это русло представляется однородной областью с концентрацией глюкозы (гликемией) в нем такой, какой она в действительности является лишь на перipherии и может быть измерена.

Известно, что в отсутствии воздействия внешних факторов в результате динамического равновесия противоположно направленных процессов эндогенного производства глюкозы и ее утилизации, секреции поджелудочной железой инсулина (главного регуляторного фактора гликемии) и его элиминации взаимосогласовано устанавливаются некоторые стационарные базальные значения гликемии  $g_b$  и инсулинемии  $i_b$ , к которым уровни гликемии  $g(t)$  и инсулинемии  $i(t)$  возвращаются по принципу отрицательной обратной связи [5]. В связи с клинически установленной неизменностью базальных значений  $g_b$  и  $i_b$  у каждого пациента в течение длительного времени (по крайней мере, в течение года) [5], для решения практических вопросов допустима упрощенная постановка задачи с заданными "установками"  $g_b$  и  $i_b$ .

Так что наличие базальных уровней гликемии и инсулинемии берется за аксиому и затем исследуется лишь динамика отклонений  $y(t) = g(t) - g_b$  и  $j(t) = i(t) - i_b$ . При этом интенсивности всех процессов повышения и понижения текущего уровня гликемии представляются в виде слагаемых двух видов. Первые из них обеспечивают базальное равновесное состояние и не представляют интереса при такой постановке задачи. Все вторые составляющие интенсивности отмеченных процессов, которые можно назвать дополнительными интенсивностями, равны нулю в базальном состоянии, а в других случаях обуславливают отклонение от него.

В наших предыдущих работах по моделированию гипогликемического действия инсулина мы опирались на эмпирически установленное клиническое правило по определению необходимой дозы инъекции инсулина: 1 Ед инсулина, введенная подкожно, способствует утилизации от 2 до 5 г глюкозы, в зависимости от индивидуальных особенностей пациента [6]). Таким образом, величины  $\Delta g$  и  $\Delta i$  пропорциональны:  $\Delta g = -\lambda \Delta i$  или, что, то же самое (при делении этого равенства на время действия  $\Delta t$  и при переходе к пределу  $\Delta t \rightarrow 0$ ), интенсивность инсулинозависимой утилизации глюкозы пропорциональна скорости его поступления в кровь:

$$g'_{\text{ин. зав}} = -\lambda i'_{\text{пост}} \Rightarrow y'_{\text{ин. зав}} = -\lambda j'_{\text{пост}}. \quad (1)$$

В случае отсутствия введения экзогенного инсулина интенсивность поступления инсулина в кровь – это интенсивность его секреции поджелудочной железой, которая согласно [6] имеет двухфазный характер. При этом первая фаза пропорциональна  $g' = y'$ , а вторая, – как текущему уровню гликемии  $y(t)$ , так и его значению с некоторым запаздыванием  $\tau$ :  $y(t - \tau)$

$$j'_{\text{пост}}(t) = j'_{\text{секр}}(t) = \xi E s(y(t)) + \mu E s(y(t - \tau)) + \eta y'(t).$$

Подстановка этого выражения в формулу (1) в наших ранних работах позволила в системе уравнений динамики гликемии и инсулинемии выделить уравнение, содержащее только гликемию. Однако, как отмечено в фундаментальной эндокринологической монографии [7], инсулинозависимая утилизации глюкозы помимо основного фактора, учтенного в формуле (1), определяется также и текущим уровнем инсулина. Так что формула (1) должна быть обобщена:

$$y'_{\text{ин. зав}} = -\lambda j'_{\text{пост}} - \chi j . \quad (2)$$

Использование в модели динамики гликемии и инсулинемии формулы (2) приводит к системе дифференциальных уравнений 1-го порядка с запаздывающим аргументом, с числовыми параметрами  $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\tau$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $g^*$ ,  $\chi$ ,  $\eta$ ,  $\mu$ ,  $\xi$ ,  $\zeta$ , имеющими физиологический смысл:

$$\begin{cases} y'(t) = (1-\alpha)f(t) - \beta^- Es(y(t-\tau)) + \beta^+ Es(-y(t-\tau)) - \\ - \gamma Es(y(t)) - \delta Es(g(t) - g^*) - \chi j(t), \quad t \geq 0, \\ j'(t) = \eta f(t) + \mu Es(y(t-\tau)) + \xi Es(y(t)) - \zeta j(t), \quad t \geq 0, \\ y(t) = \phi(t), \quad j(t) = \omega(t), \quad -\tau \leq t < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где  $t$  – текущее время в минутах,  $f(t)$  – интенсивность поступления в кровь экзогенной глюкозы;  $Es(z) = z e(z)$  – пороговая функция, причем  $e(z)$  – единичная функция Хевисайда; индексы  $\mp$  у параметра  $\beta$  введены в соответствии с направлением изменения уровня гликемии в регуляторных и контррегуляторных процессах;  $\phi(t)$ ,  $\omega(t)$  – начальные функции, которые обеспечивает единственность решения системы дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом (3), при выведении гомеостатической системы из равновесного состояния, в нулевой момент времени  $\phi(t) \equiv \omega(t) \equiv 0$ .

В связи с запаздыванием в 1 минуту в гуморальных регуляциях, обусловленных временем оборота крови, его следует учитывать в аргументах всех соответствующих функций.

Решение системы дифференциальных уравнений с запаздыванием (3) находилось численным аналогом аналитического метода шагов на сетке.

Проверка физиологической адекватности и параметрическая идентификация модели проведена по клиническим данным ВТТГ здорового пациента из работы [8] в предположении нормальных справочных значений параметров глюкозурии у него:  $g^* = 170 \text{ мг\%}$ ,  $\delta = 0,020 \text{ мин}^{-1}$ . При этом были получены следующие значения остальных параметров:  $\alpha = 0,743$ ,  $\beta^- = 0,0174 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\gamma = 0,0354 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\beta^+ = 0,0477 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\tau = 23 \text{ мин}$ ,  $\eta = 25,0 \text{ мкЕд мг}^{-1}$ ,

$$\mu = 0,586 \text{ мкЕд} (\text{мг мин})^{-1}, \quad \xi = 1,108 \text{ мкЕд} (\text{мг мин})^{-1}, \quad \zeta = 0,060 \text{ мин}^{-1},$$

$$\chi = 0,036 \text{ мг\%} (\text{с мкЕд})^{-1}.$$

Представление о степени близости полученных расчетных значений к соответствующим клиническим данным и о физиологической адекватности модели дает рисунок.

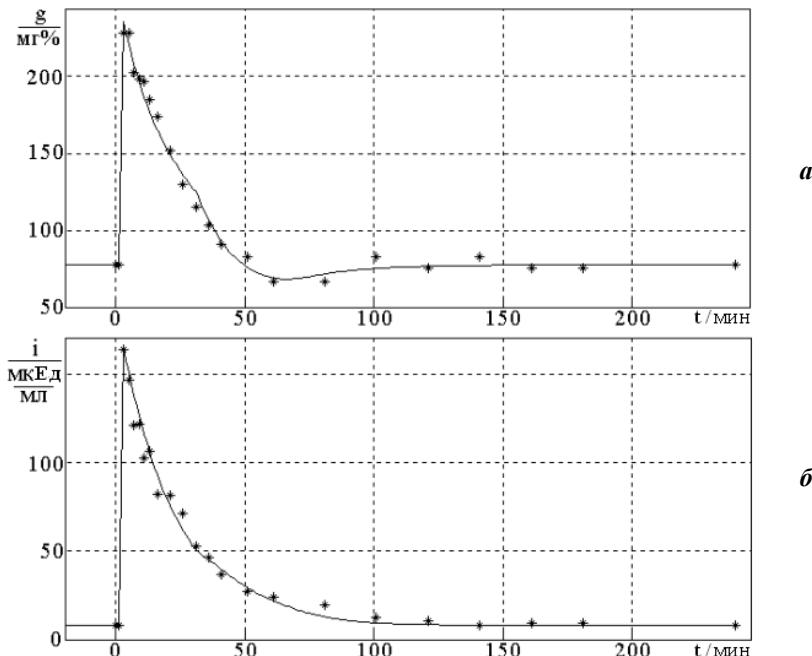


Рис. 1. Сравнение с клиническими данными ВТТГ пациента расчетных кривых гликемии и инсулинемии модели углеводного обмена (3), идентифицированной по этим данным: а – для гликемии; б – для инсулинемии.

На рис. 1 изображены расчетные кривые временной зависимости гликемии и инсулинемии, и полученные значения по соответствующим клиническим данным ВТТГ, которые обозначены символом "+". Хорошее соответствие результатов модельных расчетов клиническим данным подтверждает физиологическую адекватность модели (3).

**Выводы.** В результате проделанной работы была построена математическая модель углеводного обмена, которая адекватно воспроизводит динамику гликемии и инсулинемии при выведении из

базального состояния посредством внутривенной инъекции глюкозы. Она может найти применение при проведении диагностики состояния инсуляторного аппарата пациента.

**Список литературы:** 1. Лапта С.С. Автоматизация регуляции динамики гликемии на основе ее математического моделирования // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2012. – № 4 (33). – С. 154-160. 2. Сокол Е.И. Расчет режимов инсулинотерапии на основе математического компьютерного моделирования / Е.И. Сокол, С.С. Лапта, Л.А. Постелов, О.И. Соловьёва // Вісник НТУ "ХПІ" – 2014. – № 36 (1079). – С. 61-66. 3. Биомедицинские математические модели и их идентификация / Под ред. В.И. Толокнова. – М.: ВИНИТИ, 1989. – 218 с. 4. Винер Н. Кибернетика или управление и связь в животном и машине / Н. Винер. – М.: Сов. Радио, 1968. – 326 с. 5. Физиология человека. В 3-х томах. Пер. с англ. / Под ред. Р. Шмидта и Г. Тевса. – М.: Мир, 1996. – Т. 2. – 688 с. 6. Балаболкин М.И. Диабетология / М.И. Балаболкин. – М.: Медицина, 2000. – 672 с. 7. Endocrinology and metabolism / Editors: P. Felig, J.D. Baxter, L.A. Frohman. – 3d ed. – McGraw-Hill, INC., 1995. – 1940 p. 8. De Gaetano A. Mathematical modelling of the intravenous glucose tolerance test / A. De Gaetano, O. Arino // J. Math. Biol. – 2000. – Vol. 40. – P. 136-168.

**Bibliography (transliterated):** 1. Laptja S.S. Avtomatizacija reguljacija dinamiki glikemii na osnove ee matematicheskogo modelirovaniija // Zbirnik naukovih prac' Harkiv'skogo universitetu Povitrijanij Sil. – 2012. – № 4 (33). – P. 154-160. 2. Sokol E.I. Raschet rezhimov insulinoterapii na osnove matematicheskogo kompjuternogo modelirovaniija / E.I. Sokol, S.S. Laptja, L.A. Postelov, O.I. Solov'jova // Visnik NTU "HPI" – 2014. – № 36 (1079). – P. 61-66. 3. Biomedicinskie matematicheskie modeli i ih identifikacija / Pod red. V.I. Toloknova. – M.: VINITI, 1989. – 218 p. 4. Viner N. Kibernetika ili upravlenie i svyaz' v zhivotnom i mashine / N. Viner. – M.: Sov. Radio, 1968. – 326 p. 5. Fiziologija cheloveka. V 3-h tomah. Per. s angl. / Pod red. R. Shmidta i G. Tevsja. – M.: Mir, 1996. – T. 2. – 688 p. 6. Balabolkin M.I. Diabetologija / M.I. Balabolkin. – M.: Medicina, 2000. – 672 s. 7. Endocrinology and metabolism / Editors: P. Felig, J.D. Baxter, L.A. Frohman. – 3d ed. – McGraw-Hill, INC., 1995. – 1940 p. 8. De Gaetano A. Mathematical modelling of the intravenous glucose tolerance test / A. De Gaetano, O. Arino // J. Math. Biol. – 2000. – Vol. 40. – P. 136-168.

Поступила (received) 10.08.2015

**Статью представил д.ф.-м.н. профессор кафедри "Проектування та експлуатації електронних апаратів" (ПЕЕА) Харківського національного університету радіоелектроніки Панченко О.Ю.**

Sokol Yevgen, PhD, Rector  
National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute"  
Str. Frunze, 21, 61002, Kharkiv, Ukraine  
tel./phone: (057) 700-15-64, e-mail: omsroot@kpi.kharkov.ua  
ORCID ID:0000-0001-5749-9242

Lapta Stanislav, PhD, doctorant  
National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute"  
Str. Frunze, 21, 61002, Kharkiv, Ukraine  
tel./phone: (095) 452-72-40, e-mail: stanislav69@ukr.net  
ORCID ID:0000-0001-5749-9543

**УДК 004.8+519.7**

**К.С. ТЕПЛИНСКИЙ**, асп., ДонНТУ, Красноармейск

## **ГИБРИДНАЯ ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕЛИНЕЙНЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Проведено исследование разработанного гибридного генетического алгоритма оптимизации параметров сложной нелинейной биологической модели трёхступенчатого биохимического метаболизма. Дополнительно описаны необходимые модификации генетического алгоритма, которые учитывают особенности биологических моделей. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** динамические системы, идентификация параметров, гибридный генетический алгоритм.

**Постановка проблемы.** Разработка эффективных подходов к моделированию является важной задачей в системной биологии, которая обеспечивает новые средства анализа получаемых данных и базируется на глубоком понимании языка клеток и организмов. Впоследствии эти подходы могут стать базой для систематических стратегий получения ключевых результатов в медицине, фармацевтической и биотехнологической индустриях. Например, подходы, основанные на построении моделей, могут предоставлять необходимую инфраструктуру, способствующую производству медикаментов, принимая во внимание влияние этих медикаментов на биохимический путь метаболизма и физиологии [1]. Общий подход к созданию динамических моделей, описывающих процессы внутри и снаружи клеток, как правило, основан на построении системы нелинейных дифференциальных уравнений. Однако в настоящее время отсутствуют эффективные методы идентификации биохимических моделей, содержащих десятки параметров, по экспериментальным данным. Классические методы идентификации здесь практически неприменимы. Эволюционные алгоритмы работают очень долго. В связи с этим актуальна разработка новых методов и алгоритмов идентификации таких систем.

**Анализ литературы.** Идентификация параметров нелинейных биологических моделей является более сложной задачей, чем оценка параметров линейных моделей, потому что здесь не существует общего аналитического решения [1]. Биологические модели, как правило, являются динамическими и нелинейными, поэтому необходимо

использовать нелинейные оптимизационные подходы, где оценки рассогласование между прогнозами модели и экспериментальными данными используется в качестве критерия оптимальности, который необходимо минимизировать [2]. В связи с тем, что модели системной динамики имеют нелинейную природу и целевая функция, как правило, мультимодальна и не выпукла, градиентные методы оптимизации не могут быть применены для поиска глобального решения. В последние годы значительно возросла важность использования глобальных методов оптимизации для оценки параметров в системной биологии [3]. Глобальные методы оптимизации делятся на детерминистические, стохастические и гибридные. Некоторые детерминистические методы могут гарантировать, учитывая особенности конкретных задач, успешный поиск глобального оптимума. Отметим, что не существует детерминированных методов, которые могут решить проблему глобальной оптимизации, которая рассматривается в этой работе, за допустимое время. Их вычислительные затраты значительно увеличиваются (часто экспоненциально) при увеличении размерности задачи оптимизации. Этот класс алгоритмов не может быть применен для решения задач с большим количеством параметров. Алгоритмы, которые относятся к классу стохастических методов, основаны на вероятностных подходах. Их сходимость описана исключительно обобщенно на базе статистических данных. Однако, многие из стохастических методов могут найти решение близкое к глобальному оптимуму при приемлемом объеме вычислений. Стохастические методы не требуют также трансформации исходной задачи и могут рассматривать задачу оптимизации как черный ящик.

В данной работе проведено детальное тестирование работы генетических алгоритмов при оптимизации различных по сложности и количеству параметров искусственных целевых функций, и предложен механизм адаптации начальных параметров алгоритма в зависимости от сложности задачи [4]. В результате разработан универсальный алгоритм, который способен решать задачи любой сложности. Дополнительно предложен комбинированный метод на базе полученного ГА и локального детерминированного метода. Этот комбинированный метод позволяет улучшить точность решения и уменьшить вычислительные затраты. Полученный метод был интегрирован в моделирующую среду DIANA [5], которая разработана в институте Макса-Планка, г. Магдебург (Германия). Известны работы с применением параллельных ГА для решения задачи идентификации [6 – 9].

Целью работы является разработка и исследование предложенного гибридного метода для оптимизации сложной нелинейной биологической модели трехступенчатого биохимического метаболизма. Эта модель является сложной за счет большого количества параметров оптимизации (36), диапазон значений которых очень широк, и достаточно большого количества экспериментов (16), на базе которых выполняется идентификация.

**Постановка задачи.** В этой работе рассматривается задача идентификации параметров динамической модели при условии, что ее структура уже определена. Идентификация используется для поиска параметров модели, которые наиболее соответствуют набору экспериментальных данных. Для решения этой задачи разработан гибридный генетический алгоритм идентификации сложных нелинейных систем, сочетающий преимущества эволюционных и классических методов идентификации. Задача рассматривается на примере модели трехступенчатого биохимического метаболизма (three-step biochemical pathway), рис. 1. Эта задача была предложена Моулсом и его коллегами [7] как сложная тестовая задача идентификации параметров модели биохимического метаболизма с тремя энзиматическими шагами, которые непосредственно включают энзимы и mRNA. Эта проблема оптимизации рассматривалась в трудах Родригез Фернандеза и его коллег [3].

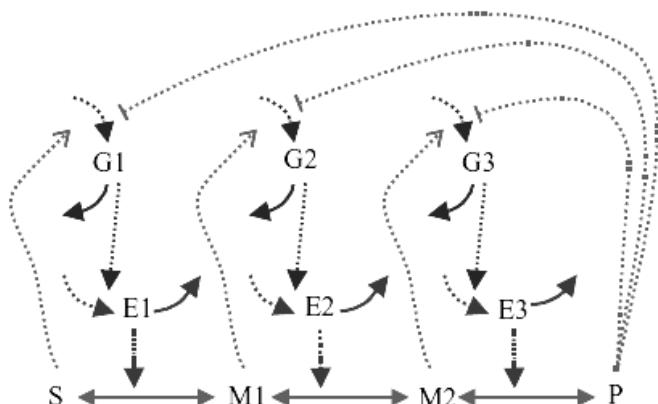


Рис. 1. Схема трехступенчатого биохимического метаболизма

Концентрации субстрата (S) и продукта (P) метаболизма остаются неизменными в течение всей реакции. M1 и M2 являются

промежуточными метаболитами; E1, E2 и E3 являются энзимами; G1, G2 и G3 являются видами mRNA для энзимов. Непрерывные линии показывают реакции трансфера массы и указывают положительное направление потока, но они являются химически обратимыми. Пунктирные стрелки показывают активации, а пунктирные кривые с тупым концом показывают ограничение [7].

Проблема идентификации заключается в определении 36 кинетических параметров нелинейной биохимической динамической модели (описывается системой из 8 обыкновенных дифференциальных уравнений), которая описывает изменение концентраций метаболитов во времени [4, 6].

Собственно идентификация сводится к проблеме оптимизации 36 параметров. Все параметры разделены на два разных класса: пиковые коэффициенты, которые изменяются в диапазоне ( $10^{-02}$ ,  $10^{+02}$ ), и все остальные, которые изменяются в диапазоне ( $10^{-12}$ ,  $10^{+06}$ ). Проблема глобальной оптимизации заключается в минимизации суммарного рассогласования  $J$  между экспериментальными и найденными значениями восьми переменных состояния, которые представлены вектором  $y$

$$J = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \{[(y_{pred}(i) - y_{exp}(i))_j]^2\},$$

где  $n$  – число данных для каждого эксперимента;  $m$  – число экспериментов;  $y_{exp}$  – экспериментальные данные;  $y_{pred}$  – вектор состояний, который был получен в результате моделирования с заданными значениями 36 параметров. Для лучшей оценки эффективности разработанного алгоритма были сгенерированы наборы псевдоэкспериментальных данных (в результате моделирования с номинальным набором параметров, поскольку этот оптимальный набор является известным). Итак, псевдозамеры концентраций метаболитов, протеинов и mRNA является результатом 16 различных экспериментов (моделирований), в которых значение субстрата  $S$  и продукта  $P$  были различными.

**Генетический алгоритм.** Для идентификации параметров указанной выше модели разработан гибридный генетический алгоритм оптимизации (ГА) на основе разработанного нами ранее ГА [4, 8]. Для этого алгоритма было проведено интенсивное исследование производительности при различных возможных параметрах ГА [4]. На базе этих исследований имплементирована автоматическая настройка параметров алгоритма в зависимости от сложности задачи. Параметры

выбираются таким образом, чтобы обеспечивать приемлемую точность решения при небольших (по сравнению с локальными и другими стохастическими методами) временных затратах на оптимизацию. Для повышения точности решения был разработан гибридный метод оптимизации, который сначала запускает ГА, а затем использует локальный детерминистический метод для улучшения результата [4]. Критерием остановки ГА было избрано формирование заданного процента схемы решения [9]. В большинстве случаев это не только приводит к повышению точности решения, но также уменьшает количество вычислений целевой функции. Проведена аналитическая и экспериментальная оценка эффективности гибридного метода на многих искусственных целевых функциях и на сложных динамических моделях, где он показал высокую эффективность [4].

Особенностью оптимизации таких моделей является их очень высокая сложность (36 параметров), мультимодальность, большое количество экспериментов (16), для которых выполняется идентификация параметров. Существенным также является то, что как указанной модели, так и многим другим биологическим моделям присуща высокая зависимость (чувствительность) параметров модели друг от друга [10]. В связи с этими особенностями были выполнены дополнительные модификации ГА. Используется логарифмическое кодирование (вместо обычного бинарного или кода Грэя, которые применялись ранее [4]). Этот вид кодирования распределяет возможные значения параметра по логарифмической шкале, и точность также задается в логарифмической шкале. При этом несколько уменьшается абсолютная точность ГА (через меньшее количество возможных дискретных значений), однако увеличивается скорость работы ГА (требуется меньшее количество вычислений целевой функции для поиска решения). Для достижения необходимой точности используется гибридный метод оптимизации, который после окончания основного цикла ГА запускает локальный метод.

Локальный метод DN2GB[11] был использован вместо предыдущего градиентного метода. Предыдущий метод не может справиться с задачей такой сложности, особенно с учетом чувствительности параметров модели. Поэтому был выбран один из лучших локальных методов, использование которого является очень распространенным, к тому же он успешно используется для идентификации параметров сложных биологических моделей [10, 2]. Метод DN2GB был разработан Денисом, Гайема и Уэлшем [11]. Этот алгоритм входит в библиотеку PORT [12], которая хорошо протестирована и эффективна, а также используется на практике для подобных типов задач. Этот алгоритм является вариацией

метода Ньютона и способен обрабатывать пределы параметров. Для эффективной работы ГА необходимо иметь полноценную начальную популяцию, поэтому был разработан специальный механизм формирования начальной популяции, при котором все элементы гарантированно будут находиться в области решений. Таким образом, ГА генерирует случайные значения для каждого элемента популяции, пока он не попадает в область решений. Элементы вне области решений, которые возникают (с достаточно высокой вероятностью) в процессе работы ГА, исключаются из популяции, при этом необходимый размер популяции будет восстановлен на этапе отбора. При решения задач оптимизации такой сложности присутствует достаточно высокая вероятность потери отдельных наиболее приспособленных элементов в результате отбора. В связи с этим в ГА был реализован механизм гарантированного перехода лучшего элемента в популяции в следующее поколение – элитизм [9].

**Результаты.** Разработанный гибридный алгоритм применен для оптимизации сложной биологической модели. Результаты исследований показали, что эффективность работы гибридного генетического алгоритма (GA + DN2GB) при решении той же задачи [13] выше эффективности как эволюционных стратегий со стохастическим подбором (SRES), так и гибридного метода на базе эволюционных стратегий и детерминированного метода DN2GB [10] (табл.).

Таблица

Сравнительные результаты применения методов оптимизации

Алгоритм	GA + DN2GB	SRES + DN2GB	SRES
Время работы	0.7	2.7	39.42
Количество вычислений	7.03E+4	1.89E+5	2.8E+6
Значение ЦФ	9.09E-09	1E-07	1.3E-03

За счет применения автоматической настройки параметров при инициализации ГА и модификаций разработанный алгоритм обеспечил точность решения задачи, сравнимую с точностью известных методов, которые используются для решения задачи оптимизации биологических моделей [13, 10]. При этом удалось сократить объем необходимых вычислений ЦФ, что уменьшает время работы алгоритма. Необходимо отметить, что алгоритм обеспечил решение задачи высокой сложности, и

при этом остался универсальным методом оптимизации. На рис. 2 представлен график изменения ЦФ в процессе работы гибридного ГА.

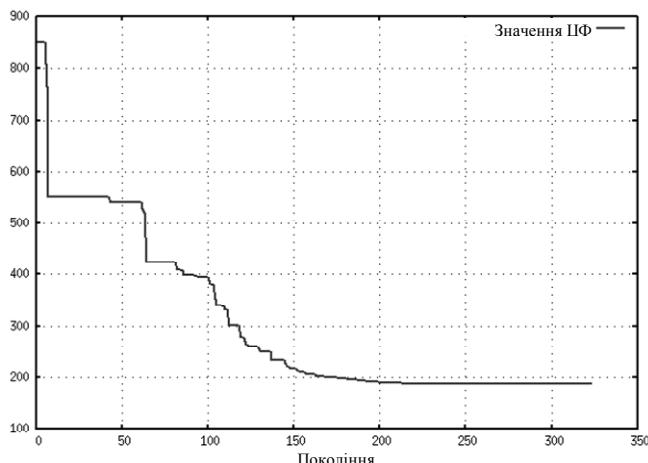


Рис. 2. Изменение значения ЦФ во время работы ГА в составе гибридного метода

**Выводы.** Проведено исследование разработанного метода для оптимизации сложной нелинейной биологической модели трехступенчатого биохимического пути метаболизма.

Результаты исследований показали, что эффективность работы разработанного гибридного генетического алгоритма выше, чем эффективность как эволюционных стратегий, которые используют стохастический отбор, так и гибридного метода на базе эволюционных стратегий и детерминированного метода. Необходимо отметить, что алгоритм обеспечил решение задачи высокой сложности и при этом остался универсальным методом оптимизации, который способен решать как простые задачи, так и оптимизировать мультимодальные нелинейные модели. Разработанный алгоритм интегрирован в моделирующую среду DIANA и используется для решения задач идентификации параметров сложных динамических систем, а именно химических и биологических моделей.

**Список литературы:** 1. Kell D.B. Metabolomics, modelling and machine learning in systems biology – towards an understanding of the languages of cells / D.B. Kell // FEBS Journal. – Prague. – 2006. – 273 (5). – P. 873-894. 2. Gennemark P. Efficient algorithms for ordinary differential equation model identification of biological systems / P. Gennemark, D. Wedelin // Systems Biology, IET. – 2007. – Vol. 1. – Issue 2. – P. 120-129. 3. Rodriguez-Fernandez M.

- A hybrid approach for efficient and robust parameter estimation in biochemical pathways / *M. Rodriguez-Fernandez, P. Mendes, J. Banga* // 5th International Conference on Systems Biology. – 2006. – Vol. 83. – Issues 2-3. – P. 248-265. 4. *Teplinskiy K.* Optimization Problems in the Technological-Oriented Parallel Simulation Environment / *K. Teplinskiy, V. Trubarov, V. Svatnyj* // 18-th ASIM-Symposium Simulationtechnique SCS: Publishing House, Erlangen. – 2005. – P. 582-587. 5. *Krasnyk M.* The ProMot / Diana Simulation Environmen / *M. Krasnyk, K. Bondareva, O. Milokhov, K. Teplinskiy, M. Ginkel, A. Kienle* // 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems. – Elsevier, Amsterdam, 2006. – P. 445-450. 6. Трубаров В.А. Применение параллельного генетического алгоритма для решения задач оптимизации сложных динамических систем / *В.А Трубаров, К.С. Теплинський, І.В. Бабенко* // Научные труды Донецкого национального технического университета. – Серия "Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем" (МАП-2007). – Донецк: ДонНТУ. – 2007. – Вип.: 6 (127). – С. 89-102. 7. *Moles C.* Parameter estimation in biochemical pathways: a comparison of global optimization methods / *C. Moles, P. Mendes, J. Banga* // Genome Research. – 2003. – Vol. 13. – P. 2467-2474. 8. Трубаров В.А. Подсистема оптимизации на базе эволюционных вычислений для параллельной моделирующей среды / *В.А.Трубаров, С.Ю. Гоголенко, К.С. Теплинский* // Региональная студеческая научно-техническая конференция "Компьютерный мониторинг и информационные технологии". – Донецк: ДонНТУ. – 2005. 9. Скобцов Ю.А. Эволюционные вычисления: учебное пособие // *Ю.А. Скобцов, Д.В. Сперанский*. – М.: Национальный открытый университет "ИНТУИТ", 2015. – 331 с. 10. *Rodriguez-Fernandez M.* Novel metaheuristic for parameter estimation in nonlinear dynamic biological systems / *M. Rodriguez-Fernandez, J.A. Egea, J.R. Banga* // BMC Bioinformatics. – 2006. – Vol. 7. – P. 483. 11. *Dennis J.* Algorithm 573, NL2SOL – An adaptive nonlinear least-squares algorithm / *J. Dennis, D. Gay, R. Welsch* // ACM Trans Math Software. – 1993. – Vol. 7. – P. 369-383. 12. PORT Mathematical Subroutine Library [Electronic resource]. – URL: <http://www.bell-labs.com/project/PORT/> 13. *Runarsson T.* Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization / *T. Runarsson, X. Yao* // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2000. – P. 284-294. 14. Фельдман Л.П. Численные методы в информатике / *Л.П. Фельдман, А.И. Петренко, О.А. Дмитриева*. – К.: ВНР, 2004. – 420 с.

**Bibliography (transliterated).** 1. *Kell D.B.* Metabolomics, modelling and machine learning in systems biology – towards an understanding of the languages of cells / *D.B. Kell* // FEBS Journal. – Prague. – 2006. – 273 (5). – P. 873-894. 2. *Gennemark P.* Efficient algorithms for ordinary differential equation model identification of biological systems / *P. Gennemark, D. Wedelin* // Systems Biology, IET. – 2007. – Vol. 1. – Issue 2. – P. 120-129. 3. *Rodriguez-Fernandez M.* A hybrid approach for efficient and robust parameter estimation in biochemical pathways / *M. Rodriguez-Fernandez, P. Mendes, J. Banga* // 5th International Conference on Systems Biology. – 2006. – Vol. 83. – Issues 2-3. – P. 248-265. 4. *Teplinskiy K.* Optimization Problems in the Technological-Oriented Parallel Simulation Environment / *K. Teplinskiy, V. Trubarov, V. Svatnyj* // 18 th ASIM Symposium Simulationtechnique SCS: Publishing House, Erlangen. – 2005. – P. 582-587. 5. *Krasnyk M.* The ProMot / Diana Simulation Environmen / *M. Krasnyk, K. Bondareva, O. Milokhov, K. Teplinskiy, M. Ginkel, A. Kienle* // 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems. – Elsevier, Amsterdam, 2006. – P. 445-450. 6. Трубаров В.А. Применение параллельного генетического алгоритма для решения задач оптимизации сложных динамических систем / *В.А Трубаров, К.С. Теплинський, І.В. Бабенко* // Научные труды Донецкого национального технического университета. – Серия "Проблемы моделирования и автоматизации проектирования динамических систем" (МАП-2007). – Донецк: ДонНТУ. – 2007. – Вип.: 6 (127). – С. 89-102. 7. *Moles C.* Parameter estimation in biochemical pathways: a comparison of global optimization methods / *C. Moles, P. Mendes, J. Banga* // Genome Research. – 2003. – Vol. 13. – P. 2467-2474.

- 8.** Trubarov V.A. Podistema optimizacii na baze evoljuchionnyh vychislenij dlja parallel'noj modelirujushhej sredy / V.A.Trubarov, S.Ju. Gogolenko, K.S. Teplinskiy // Regional'naja studecheskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija "Komp'yuternyj monitoring i informacionnye tehnologii". – Doneck: DonNTU. – 2005. **9.** Skobcov Ju.A. Jevoljucionnye vychislenija: uchebnoe posobie // Ju.A. Skobcov, D.V. Speranskij. – M.: Nacional'nyj otkrytyj universitet "INTUIT", 2015. – 331 s. **10.** Rodriguez-Fernandez M. Novel metaheuristic for parameter estimation in nonlinear dynamic biological systems / M. Rodriguez-Fernandez, J.A. Egea, J.R. Banga // BMC Bioinformatics. – 2006. – Vol. 7. – P. 483. **11.** Dennis J. Algorithm 573, NL2SOL – An adaptive nonlinear least-squares algorithm / J. Dennis, D. Gay, R. Welsch // ACM Trans Math Software. – 1993. – Vol. 7. – P. 369-383. **12.** PORT Mathematical Subroutine Library [Electronic resource]. – URL: <http://www.bell-labs.com/project/PORT/> **13.** Runarsson T. Stochastic ranking for constrained evolutionary optimization / T. Runarsson, X. Yao // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2000. – P. 284-294. **14.** Fel'dman L.P. Chislennye metody v informatike / L.P. Fel'dman, A.I. Petrenko, O.A. Dmitrieva. – K.: VNR, 2004. – 420 p.

*Поступила (received) 10.08.2015*

*Статью представил д.т.н., проф. ДоnHTУ Скобцов Ю.А.*

Teplinskiy Konstantin, master  
postgraduate student  
Donetsk National Technical University  
Sq. Shybunkova, Krasnoarmiysk, Donetsk region, Ukraine, 85300  
tel./phone: +49 (172) 4599424, e-mail: konstantin.teplinskiy@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0003-4204-7547

**A.E. ФИЛАТОВА**, канд. техн. наук, доц., докторант, НТУ "ХПИ"

## КОМПЕНСАЦИЯ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ В МЕТОДЕ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕНТГЕНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В работе рассмотрены проблемы реализации разработанного метода повышения качества визуализации маммограмм, связанные с краевыми эффектами при цифровой обработке изображений. Предложены способы компенсации краевых эффектов, позволяющие уменьшить искажения на краях изображения, а также на границе "молочная железа – фон". Проверена работоспособность метода на нескольких сотнях реальных цифровых маммограмм. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** метод повышения качества визуализации, маммограмма, краевой эффект, цифровая обработка изображений.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** С появлением отечественных цифровых маммографов задача повышения качества визуализации маммограмм за счет цифровой обработки изображений является актуальной научно-практической задачей [1]. В [2 – 4] предложен метод повышения качества визуализации маммограмм (IMRI-MAM), основная идея которого состоит в следующем. Математическая модель изображения молочной железы (МЖ)  $\mathbf{I} = (I_{x,y})$ , которое регистрируется в результате маммографического обследования, описывается следующим выражением:

$$\mathbf{I} = \mathbf{D} + \mathbf{F} + \mathbf{R}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{D} = (D_{x,y})$  – составляющая изображения, содержащая структуру тканей;  $\mathbf{F} = (F_{x,y})$  – фоновая составляющая изображения, которая отражает среднюю плотность анатомических структур;  $\mathbf{R} = (R_{x,y})$  – шумовая составляющая;  $I_{x,y}$ ,  $D_{x,y}$ ,  $F_{x,y}$ ,  $R_{x,y}$  – яркости пикселей с координатами  $(x, y) \in M$  изображений  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{R}$ , соответственно;  $M = M_1 \cap M_2$  – множество пикселей, принадлежащих изображению снимка;  $M_1$ ,  $M_2$  – подмножества пикселей, принадлежащих изображению молочной железы и фону снимка, соответственно.

Так как характеристики шума неизвестны, а полезный сигнал

является нестационарным, то для устранения шумовой составляющей предлагаются использовать аддитивную винеровскую фильтрацию (ВФ) с квадратным окном размером  $p_1 \times p_1$ :

$$\mathbf{A} = \text{wiener}(\mathbf{I}, p_1), \quad (2)$$

где  $\mathbf{A} = (A_{x,y})$  – изображение после фильтрации;  $A_{x,y}$  – яркость пикселя с координатами  $(x, y) \in M$ ;  $\text{wiener}()$  – функция, реализующая ВФ [4 – 7];  $p_1$  – линейный размер апертуры (например,  $p_1 = 5$ ).

Оценка изображения  $\tilde{\mathbf{D}} = (\tilde{D}_{x,y})$  модели (1) определяется для каждого пикселя с координатами  $(x, y)$  согласно выражению

$$\tilde{D}_{x,y} = \begin{cases} \left( \frac{A_{x,y}}{B_{x,y}} mxI \right)^{\gamma} & \forall (x, y) \in M_1; \\ mxI & \forall (x, y) \in M_2, \end{cases} \quad (3)$$

где  $B_{x,y}$  – яркость пикселя с координатами  $(x, y)$  изображения  $\mathbf{B} = (B_{x,y})$ ;  $\mathbf{B} = \text{wiener}(\mathbf{I}, p_2)$  – модель фона МЖ, полученная путем ВФ с большим размером апертуры  $p_2$ ;  $mxI$  – максимальное значение яркости выходного изображения  $\tilde{\mathbf{D}}$ ;  $\gamma > 1$  – параметр для  $\gamma$ -коррекции.

Оценка изображения  $\tilde{\mathbf{F}} = (\tilde{F}_{x,y})$  модели (1) определяется для каждого пикселя с координатами  $(x, y)$  по выражению

$$\tilde{F}_{x,y} = \begin{cases} mxI - \frac{mxI - A_{x,y}}{B_{x,y}} mxI & \forall (x, y) \in M_1; \\ mxI & \forall (x, y) \in M_2. \end{cases} \quad (4)$$

Тогда с учетом предлагаемой математической модели (1) оценка изображения МЖ  $\tilde{\mathbf{I}} = (\tilde{I}_{x,y})$  вычисляется для каждого пикселя с координатами  $(x, y)$  по выражению

$$\tilde{I}_{x,y} = \begin{cases} \frac{\tilde{D}_{x,y} + \tilde{F}_{x,y}}{2} & \forall (x, y) \in M_1; \\ mxI & \forall (x, y) \in M_2. \end{cases} \quad (5)$$

С целью коррекции динамического диапазона изображения  $\tilde{I}$  предлагается выполнить для каждого пикселя с координатами  $(x, y)$  нелинейное контрастирование с использованием сигмоидальной функции следующего вида:

$$S_{x,y} = \begin{cases} \frac{mxI}{1+e^{-(J_{x,y}-a)b}} & \forall (x, y) \in M_1; \\ mxI & \forall (x, y) \in M_2 \end{cases}$$

или

$$S_{x,y} = \begin{cases} mxI \frac{\tanh[(J_{x,y}-a)b]+1}{2} & \forall (x, y) \in M_1; \\ mxI & \forall (x, y) \in M_2, \end{cases}$$

где  $S_{x,y}$  – яркость пикселя с координатами  $(x, y)$  выходного

изображения  $\mathbf{S} = (S_{x,y})$ ;  $J_{x,y} = \frac{\tilde{I}_{x,y} - \min_{(x,y) \in M_1}(\tilde{I}_{x,y})}{\max_{(x,y) \in M_1}(\tilde{I}_{x,y}) - \min_{(x,y) \in M_1}(\tilde{I}_{x,y})}$  – яркость

пикселя с координатами  $(x, y)$  нормированного изображения, при этом  $J_{x,y} \in [0, 1] \quad \forall (x, y) \in M_1$ ;  $a, b$  – константы, определяемые по статистическим характеристикам изображения  $\tilde{I}$ .

Так как в методе IMRI-MAM используется цифровая фильтрация изображений, то при обработке маммограмм возникают краевые эффекты (КЭ) как на краях снимка, так и на границе "МЖ – фон". Для компенсации КЭ используются различные эвристические алгоритмы, наиболее распространенные из которых перечислены ниже [8 – 11]:

- 1) обрезка изображения на величину искажений;
- 2) дополнение краями с нулевой яркостью;
- 3) дополнение краями с экстраполированной яркостью;
- 4) четное продолжение изображения.

Для обработки краев обрабатываемых маммограмм наилучший результат показал алгоритм четного продолжения изображения. Однако ни один из рассмотренных алгоритмов не применим к компенсации КЭ на границе "МЖ – фон", так как эта граница находится в произвольном месте внутри маммографического снимка.

**Цель данной статьи** – разработка алгоритма компенсации КЭ на границе "МЖ – фон" для метода повышения качества визуализации

цифровых маммограмм и проверка работоспособности разработанного алгоритма на реальных маммограммах.

**Алгоритм компенсации краевых эффектов на границе "молочная железа – фон".** Особенностью маммографических снимков является то, что изображение имеет резкое изменение яркости на границе "МЖ – фон" (рис. 1). В разработанном методе IMRI-MAM в (3) для расчета модели фона МЖ В используется ВФ с большим размером апертуры. Поскольку в окно фильтра попадают точки, принадлежащие фону снимка, которые по статистическим характеристикам резко отличаются от точек, принадлежащих изображению МЖ, то на границе "МЖ – фон" генерируются артефакты (см. рис. 1). Поэтому необходимо изменить статистические характеристики точек фона снимка, которые учитываются при расчете модели В.

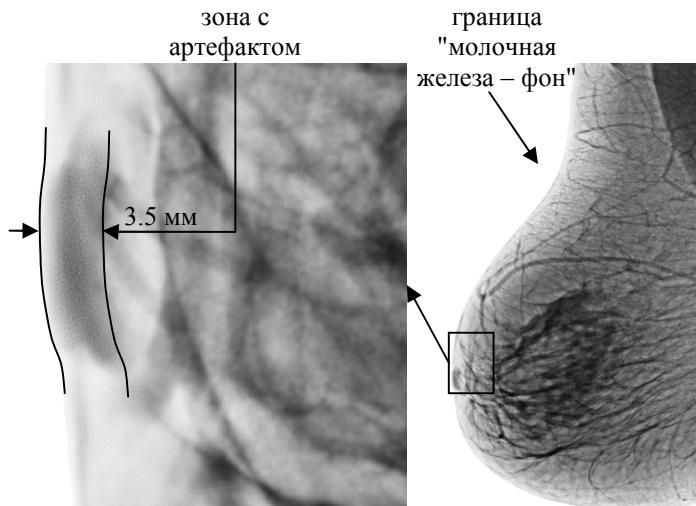


Рис. 1. Пример маммограммы после обработки методом IMRI-MAM без компенсации краевого эффекта на границе "молочная железа – фон"  
( $p_2 = 101$ , размеры изображения 3072x4032 пикселей)

Так как граница "МЖ – фон" на маммографическом снимке может находиться в произвольном месте, то указанные выше эвристические методы компенсации КЭ использовать невозможно. Однако можно учесть тот факт, что если найти способ уменьшить линейные размеры апертуры фильтра Винера, то меньшее число точек фона снимка будет

учитываться при фильтрации, следовательно, уменьшится ширина зоны с артефактами, обусловленными КЭ. Для достижения поставленной цели предлагается итеративное применение ВФ с уменьшенными в несколько раз размерами апертуры [5, 8, 9]. Кроме того, с целью минимизации КЭ при итеративном применении ВФ необходим предварительный этап, целью которого является замена фона снимка пикселями, статистические характеристики которых не отличаются от соответствующих характеристик пикселей МЖ. В качестве такой предобработки можно использовать обычное линейное сглаживание с большим размером апертуры фильтра [1, 5, 8].

Таким образом, в работе предлагается следующий алгоритм расчете модели фона молочной железы  $\mathbf{B}$ .

1) Выполняется линейное сглаживание исходного изображения:

$$\mathbf{T} = \mathbf{I}^{**} \mathbf{H},$$

где  $\mathbf{T} = (T_{x,y})$  – изображение после низкочастотной фильтрации;  $\mathbf{H} = (H_{x,y})$  – маска фильтра с линейными размерами апертуры  $p$  ( $H_{x,y} = 1/p^2$ );  $**$  – операция двумерной свертки.

2) Для каждого пикселя с координатами  $(x, y)$  формируется новое изображение  $\mathbf{I}^{(1)} = (I_{x,y}^{(1)})$  по следующему выражению:

$$I_{x,y}^{(1)} = \begin{cases} T_{x,y} & \forall (x, y) \in M_2; \\ I_{x,y} & \forall (x, y) \in M_1. \end{cases}$$

3) Выполняется итерационная процедура фильтрации с использование фильтра Винера:

$$\mathbf{I}^{(k+1)} = wiener(\mathbf{I}^{(k)}, p'_2), \quad \forall k = \overline{1, ni},$$

где  $ni$  – количество итераций;  $p'_2 < p_2$  – линейные размеры апертуры фильтра.

Тогда модель фона молочной железы в (3) будет вычислена на последнем шаге итераций, т.е.  $\mathbf{B} = \mathbf{I}^{(ni+1)}$ .

На рис. 2 приведены результаты работы метода IMRI-MAM с использованием предложенного алгоритма коррекции КЭ на границе "МЖ – фон". При этом линейные размеры апертуры ВФ были уменьшены в 2 раза, а фильтр итерационно был применен дважды, что позволило значительно уменьшить зону с артефактами. Максимальная

ширина зоны с артефактами после применения метода IMRI-MAM без коррекции КЭ на границе "МЖ – фон" равна 3.5 мм (рис. 1), а после применения метода IMRI-MAM с коррекцией КЭ – 1.5 мм (рис. 2).

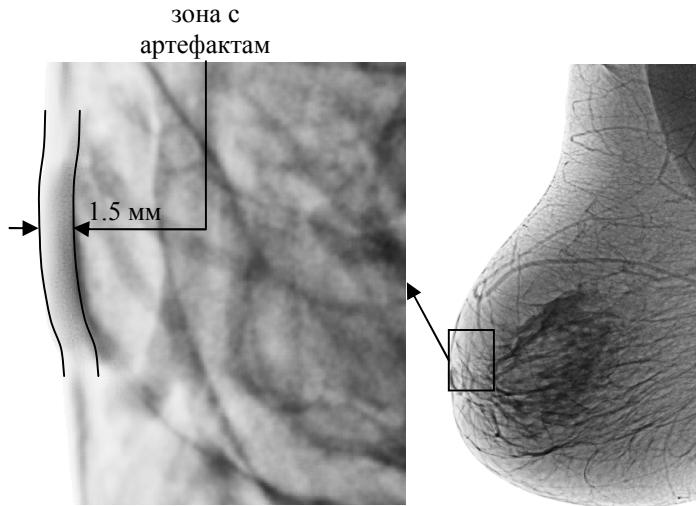


Рис. 2. Пример маммограммы после обработки методом IMRI-MAM с компенсацией краевого эффекта на границе "молочная железа – фон"  
( $p'_2 = 51$ ,  $ni = 2$ , размеры изображения 3072x4032 пикселей)

**Выводы.** Для проверки работоспособности предложенного алгоритма компенсации КЭ на границе "МЖ – фон" в методе IMRI-MAM был проведен ряд экспериментов по обработке цифровых маммограмм (300 снимков), полученных с помощью цифрового рентгеновского маммографического комплекса SYMA (фирма "Радмир", Харьков, Украина). Эксперименты показали, что после обработки цифровых маммограмм методом IMRI-MAM с компенсацией КЭ ширина зоны, содержащей артефакты, значительно уменьшилась, а четкость и контрастность изображения увеличилась.

Дальнейшие исследования направлены на адаптацию разработанного метода повышения качества визуализации маммограмм IMRI-MAM для обработки других видов рентгенологических изображений.

**Список литературы:** 1. Bankman I. Handbook of Medical Image Processing and Analysis / I. Bankman. – London: Academic Press, 2008. – 978 p. 2. Бойко Д.А. Метод визуализации патологических структур на маммограммах с использованием послойного наложения

- / **Д.А. Бойко, А.Е. Филатова.** – Вісник НТУ "ХПІ". – Харків.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 6 (1049). – С. 29-34. **3. Boyko D.** The Imaging Method of Pathologic Structures on Mammograms Using Layerwise Overlay / *D. Boyko, A. Filatova, A. Povoroznjuk* // International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science": Lviv Polytechnic National University, 2014. – Р. 745-747. **4. Филатова А.Е.** Метод повышения качества визуализации рентгенологических изображений / *А.Е. Филатова, Д.А. Бойко.* – Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2015. – № 32 (1141). – С. 19-26. **5. Jayaraman S.** Digital Image Processing / *S. Jayaraman, S. Esakkirajan, T. Veerakumar.* – Tata McGraw-Hill Education, 2011. – 723 р. **6. Солонина А.И.** Цифровая обработка сигналов и MATLAB / *А.И. Солонина, Д.М. Клионский, Т.В. Меркучева, С.Н. Перов.* – СПб: БХВ-Петербург, 2013. – 512 с. **7. Eddins S.** Image deblurring – Wiener filter (02.10.2007) [Электронный ресурс] / *S. Eddins.* – Режим доступа: <http://blogs.mathworks.com/steve/2007/11/02/image-deblurring-wiener-filter/>, свободный (29.09.2015) – Название с экрана. **8. Грузман И.С.** Цифровая обработка изображений в информационных системах / *И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин и др.* – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с. **9. Гонсалес Р.** Цифровая обработка изображений / *R. Гонсалес, R. Вудс.* – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. **10. Кокошкин А.В.** Компенсация краевых эффектов при восстановлении искаженных изображений с помощью модификации аппаратной функции (24.01.2015). [Электронный журнал "Журнал радиоэлектроники", 2015. – № 2] / *А.В. Кокошкин, В.А. Коротков, К.В. Коротков, Е.П. Новичихин* – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/alt/feb15/5/text.html>, свободный (29.09.2015) – Название с экрана. **11. Ежова К.В.** Моделирование и обработка изображений. Учебное пособие / *К.В. Ежова.* – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 93 с.

- Bibliography (transliterated):** **1. Bankman I.** Handbook of Medical Image Processing and Analysis / *I. Bankman.* – London: Academic Press, 2008. – 978 p. **2. Boyko D.A.** Metod vizualizacii patologicheskikh struktur na mammogrammakh s ispol'zovaniem poslojnogo nalozhenija / *D.A. Boyko, A.E. Filatova.* – Visnik NTU "HPI". – Harkiv.: NTU "HPI", 2014. – № 6 (1049). – P. 29-34. **3. Boyko D.** The Imaging Method of Pathologic Structures on Mammograms Using Layerwise Overlay / *D. Boyko, A. Filatova, A. Povoroznjuk* // International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science": Lviv Polytechnic National University, 2014. – Р. 745-747. **4. Filatova A.E.** Metod povysheniya kachestva vizualizacii rentgenologicheskikh izobrazhenij / *A.E. Filatova, D.A. Boyko.* – Visnik NTU "HPI". – Harkiv: NTU "HPI", 2015. – № 32 (1141). – P. 19-26. **5. Jayaraman S.** Digital Image Processing / *S. Jayaraman, S. Esakkirajan, T. Veerakumar.* – Tata McGraw-Hill Education, 2011. – 723 p. **6. Solonina A.I.** Cifrovaja obrabotka signalov i MATLAB / *A.I. Solonina, D.M. Klionskij, T.V. Merkucheva, S.N. Perov.* – SPb: BHV-Peterburg, 2-13. – 512 p. **7. Eddins S.** Image deblurring – Wiener filter (02.10.2007) [Jelektronnyj resurs] / *S. Eddins* – Rezhim dostupa: <http://blogs.mathworks.com/steve/2007/11/02/image-deblurring-wiener-filter/>, svobodnyj (29.09.2015) – Nazvanie s jekrana. **8. Gruzman I.S.** Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v informacionnyh sistemah / *I.S. Gruzman, V.S. Kirichuk, V.P. Kosyh, G.I. Peretjagin i dr.* – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002. – 352 p. **9. Gonsales R.** Cifrovaja obrabotka izobrazhenij / *R. Gonsales, R. Vuds.* – M.: Tehnosfera, 2005. – 1072 p. **10. Kokoshkin A.V.** Kompensovaniye kraevykh jeffektov pri vosstanovlenii ikazhennyh izobrazhenij s pomoshchju modifikacii apparatnoj funkciij (24.01.2015) [Jelektronnyj zhurnal "Zhurnal radioelektroniki", 2015. – № 2] / *A.V. Kokoshkin, V.A. Korotkov, K.V. Korotkov, E.P. Novichihin* – Rezhim dostupa: <http://jre.cplire.ru/alt/feb15/5/text.html>, svobodnyj (29.09.2015) – Nazvanie s jekrana. **11. Ezhova K.V.** Modelirovaniye i obrabotka izobrazhenij. Uchebnoe posobie / *K.V. Ezhova.* – SPb: NIU ITMO, 2011. – 93 p.

*Поступила (received) 30.09.2015*

*Статью представил д-р техн. наук, проф. НТУ "ХПИ"  
Поворознюк А.И.*

Filatova Anna, Cand.Tech.Sci., Docent, Doctoral Candidate  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
Str. Frunze, 21, Kharkov, Ukraine, 61002  
tel./phone: (057) 707-60-19, e-mail: filatova@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0003-1982-232

УДК 621.38

**Н.А.ФИЛИНЮК**, д-р техн. наук, проф., зав. каф., ВНТУ, Винница,  
**С.Е. ФУРСА**, канд. техн. наук, доц., ВНТУ, Винница,  
**В.П. СТАХОВ**, асп., ВНТУ, Винница

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОИММИТАНСНОГО ЛОГИЧЕСКОГО R-ЭЛЕМЕНТА "ИЛИ"**

Приведено обоснование схемы моноиммитансного логического *R*-элемента "ИЛИ". С помощью компьютерного моделирования исследовано влияние на характеристики логического элемента таких дестабилизирующих факторов, как нестабильность волнового сопротивления отрезка линии передачи, нестабильность фазовой постоянной и появление во входном иммитансе паразитной реактивной составляющей. Ил.: 4. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** моноиммитансный логический *R*-элемент, компьютерное моделирование, дестабилизирующие факторы.

**Постановка проблемы.** Развитие вычислительной техники достигло значительного уровня. Основное место в реализации ее технических средств занимают видеоимпульсные логические элементы. Также постоянно ведутся поиски новых принципов построения логических элементов, соответствующих определенным специфическим требованиям. Примером результатов таких исследований могут служить оптические [1], магнитные [2], а также иммитансные логические элементы [3], использующие в качестве информационного параметра характер или величину иммитанса. Благодаря использованию иммитанса становится возможным повысить помехозащищенность и энергетическую эффективность логического элемента [4]. Однако данное направление находится на начальной стадии развития, и поэтому требует дальнейших исследований.

**Анализ литературы.** Иммитансные логические элементы относятся к радиочастотным логическим элементам, способным осуществлять логические операции на несущей частоте сигнала [5 – 7]. В случае, когда в качестве информационного параметра в иммитансных логических элементах используются комбинации резистивного, индуктивного и емкостного иммитанса, их можно рассматривать как мультииммитансные логические элементы [8]. Для практического использования более целесообразны логические элементы, которые используют один информационный параметр, например, только активное сопротивление – (*R*-элемент), емкостной иммитанс – (*C*-элемент) или индуктивный иммитанс – (*L*-элемент). Такие логические элементы называют моноиммитансными логическими элементами [9]. Моноиммитансные

логические элементы имеют высокое быстродействие и энергетическую эффективность, но меньшую помехозащищенность, чем мультииммитансные логические элементы. Оценка их помехозащищенности и методы ее повышения требуют дополнительных исследований.

**Цель работы** – исследование моноиммитансного логического  $R$ -элемента "ИЛИ", использующего в качестве информационного параметра активное сопротивление, в диапазоне изменения дестабилизирующих факторов. Для достижения этой цели решается задача исследования влияния дестабилизирующих факторов на характеристики логического элемента.

### Обоснование схемы моноиммитансного логического $R$ -элемента "ИЛИ"

Для моноиммитансного логического  $R$ -элемента (рис. 1, *a*) информационным параметром является активный иммитанс " $R$ ", а логическое состояние элемента характеризуется диапазоном значений этого параметра. Таким образом, логической единице "1" соответствует диапазон изменения  $R^{(1)} > R_0$ , а логическому нулю – "0" соответствует диапазон изменения  $R^{(0)} < R_0$ , где  $R_0$  – резистивная граница логического уровня. Работу моноиммитансного логического  $R$ -элемента "ИЛИ" можно описать таблицей истинности, которая представлена на рис. 1, *б*.

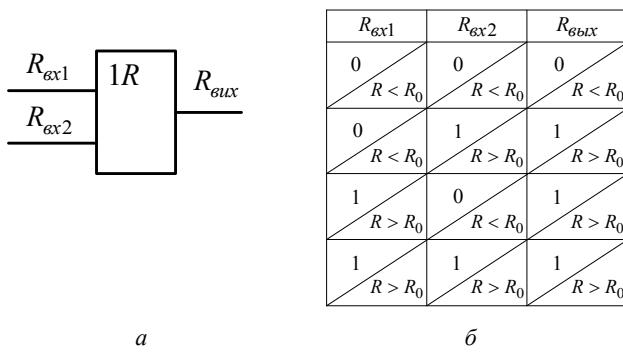


Рис. 1. Схематическое обозначение *а* и таблица истинности *б* моноиммитансного логического  $R$ -элемента "ИЛИ"

Электрическая схема возможного варианта реализации моноиммитансного логического  $R$ -элемента "ИЛИ" представлена на рис. 2. Логический элемент состоит из четвертьвольновых отрезков  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  линии передачи, с волновыми сопротивлениями соответственно  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$ ,  $Z_{03}$ . К входам логического элемента подключены активные сопротивления  $R_{bx1}$  и  $R_{bx2}$ .

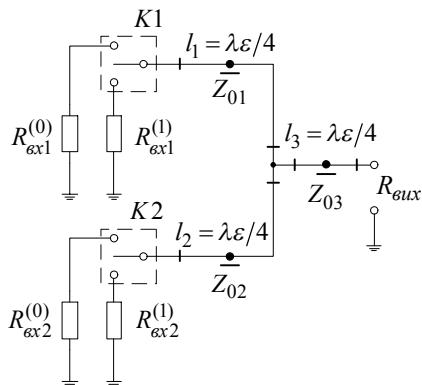


Рис. 2. Електрическая схема моноиммитансного логического  $R$ -элемента "ИЛИ"  
(на схеме  $K1$  и  $K2$  – условные переключатели)

Иммитансная передаточная характеристика этого элемента, учитывая трансформирующие свойства четвертьвольновых отрезков линии передачи  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ , описывается выражением

$$R_{\text{вых}} = \frac{Z_{03}^2 (Z_{03}^2 R_{bx2} + Z_{02}^2 R_{bx1})}{Z_{01}^2 Z_{02}^2}. \quad (1)$$

Если считать, что входные каналы логического элемента одинаковы, то есть  $Z_{01} = Z_{02}$ , тогда из (1) находим

$$R_{\text{вых}} = \frac{Z_{03}^2 (R_{bx2} + R_{bx1})}{Z_{01}^2}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что иммитансная передаточная характеристика логического элемента на плоскости в координатах  $R_{bx1}$  и  $R_{bx2}$  имеет вид прямой линии (рис. 3), положение которой может регулироваться путем

выбора значений волновых сопротивлений  $Z_{01}$ ,  $Z_{02}$ ,  $Z_{03}$  отрезков линий передачи  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ .

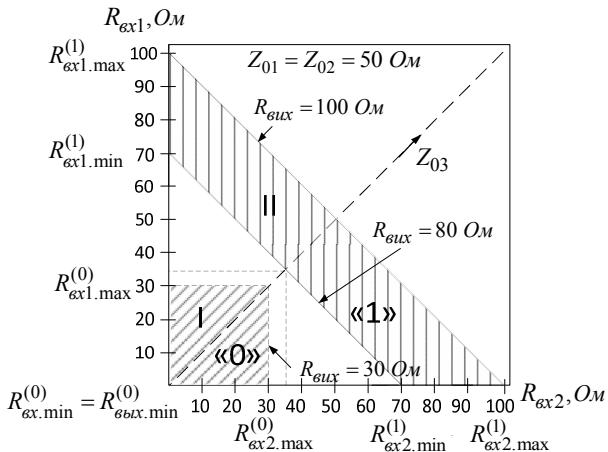


Рис. 3. Иммитансная передаточная характеристика моноиммитансного логического  $R$ -элемента "ИЛИ"

На практике параметры реального моноиммитансного логического  $R$ -элемента "ИЛИ" будут отличаться от параметров вышерассматриваемого "идеального" элемента из-за влияния дестабилизирующих факторов.

Для обеспечения помехоустойчивости в реальном элементе граница между логическим нулем и единицей определяется не  $Z_0$ , а диапазоном значений  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{вых}}$  (рис. 3):

$$R_{\text{вх},\text{max.}}^{(0)} < R_{\text{вх}} < R_{\text{вх},\text{min.}}^{(1)} ; \quad (3)$$

$$R_{\text{вых},\text{max.}}^{(0)} < R_{\text{вых}} < R_{\text{вых},\text{min.}}^{(1)} . \quad (4)$$

Таким образом, диапазон возможных значений активного импеданса, соответствующий логическому "0" и "1", равен:

– для входного иммитанса

$$0 < R_{\text{вх}}^{(0)} < R_{\text{вх},\text{max.}}^{(0)} ; \quad R_{\text{вх},\text{min.}}^{(1)} < R_{\text{вх}}^{(1)} < \infty ; \quad (5)$$

– для выходного иммитанса

$$0 < R_{\text{вых}}^{(0)} < R_{\text{вых}, \text{max}}^{(0)}; R_{\text{вых}, \text{min}}^{(1)} < R_{\text{вых}}^{(1)} < \infty. \quad (6)$$

### Аналитическое обоснование иммитансной функции преобразования реального $R$ -элемента "ИЛИ"

В реальном моноиммитансном логическом элементе выходной иммитанс  $Z_{\text{вых}}$  связан с иммитансами отрезков  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  линии передачи, причем, в общем виде приведенный выходный иммитанс отрезка линии передачи имеет вид [10]

$$\bar{Z}_{\text{вых}} = \frac{\bar{Z}_{\text{bx}} + j \cdot \operatorname{tg}\beta}{1 + j \cdot \bar{Z}_{\text{bx}} \cdot \operatorname{tg}\beta} = \operatorname{Re} \bar{Z}_{\text{вых}} + j \cdot \operatorname{Im} \bar{Z}_{\text{вых}}, \quad (7)$$

где

$$\operatorname{Re} \bar{Z}_{\text{вых}} = \bar{R}_{\text{вых}} = \frac{\bar{R}_{\text{bx}} \cdot (1 - \bar{X}_{\text{bx}} \cdot \operatorname{tg}\beta) + \bar{R}_{\text{bx}} \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot (\bar{X}_{\text{bx}} + \operatorname{tg}\beta)}{(1 - \bar{X}_{\text{bx}} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2 + (\bar{R}_{\text{bx}} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2}, \quad (8)$$

$$\operatorname{Im} \bar{Z}_{\text{вых}} = \bar{X}_{\text{вых}} = \frac{(1 - \bar{X}_{\text{bx}} \cdot \operatorname{tg}\beta) \cdot (\bar{X}_{\text{bx}} + \operatorname{tg}\beta) - \bar{R}_{\text{bx}}^2 \cdot \operatorname{tg}\beta}{(1 - \bar{X}_{\text{bx}} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2 + (\bar{R}_{\text{bx}} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2}, \quad (9)$$

где  $\beta = 2\pi \cdot l / \lambda$  – фазовая постоянная,  $l$  – длина отрезка линии передачи,  $\lambda$  – длина волны сигнала,

$$\bar{R}_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых}}}{Z_0}, \quad \bar{X}_{\text{вых}} = \frac{X_{\text{вых}}}{Z_0}, \quad \bar{R}_{\text{bx}} = \frac{R_{\text{bx}}}{Z_0}, \quad \bar{X}_{\text{bx}} = \frac{X_{\text{bx}}}{Z_0}.$$

Так как информационным параметром данного логического элемента является активное сопротивление, следующие вычисления проводятся для активной составляющей иммитанса. Приведенные выходные активные сопротивления  $R_{\text{вых}1}$  и  $R_{\text{вых}2}$  отрезков  $l_1$ ,  $l_2$  линии передачи описываются соответственно выражениями:

$$\bar{R}_{\text{вых}1} = \frac{\bar{R}_{\text{bx}1} \cdot (1 - \bar{X}_{\text{bx}1} \cdot \operatorname{tg}\beta) + \bar{R}_{\text{bx}1} \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot (\bar{X}_{\text{bx}1} + \operatorname{tg}\beta)}{(1 - \bar{X}_{\text{bx}1} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2 + (\bar{R}_{\text{bx}1} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2}, \quad (10)$$

$$\bar{R}_{\text{вых}2} = \frac{\bar{R}_{\text{bx}2} \cdot (1 - \bar{X}_{\text{bx}2} \cdot \operatorname{tg}\beta) + \bar{R}_{\text{bx}2} \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot (\bar{X}_{\text{bx}2} + \operatorname{tg}\beta)}{(1 - \bar{X}_{\text{bx}2} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2 + (\bar{R}_{\text{bx}2} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2}. \quad (11)$$

Входное активное сопротивление нагрузки  $\bar{R}_{\text{вх}3}$  и выходное активное сопротивление  $\bar{R}_{\text{вых}3}$  отрезка  $l_3$  линии передачи описываются выражениями:

$$\bar{R}_{\text{вх}3} = \frac{\bar{R}_{\text{вых}1} \cdot \bar{R}_{\text{вых}2}}{\bar{R}_{\text{вых}1} + \bar{R}_{\text{вых}2}} ; \quad (12)$$

$$\bar{R}_{\text{вых}3} = \frac{\bar{R}_{\text{вх}3} \cdot (1 - \bar{X}_{\text{вх}3} \cdot \operatorname{tg}\beta) + \bar{R}_{\text{вх}3} \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot (\bar{X}_{\text{вх}3} + \operatorname{tg}\beta)}{(1 - \bar{X}_{\text{вх}3} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2 + (\bar{R}_{\text{вх}3} \cdot \operatorname{tg}\beta)^2}. \quad (13)$$

Так как выход отрезка  $l_3$  линии передачи является выходом схемы, выходное сопротивление реального моноиммитансного логического  $R$ -элемента "ИЛИ" описывается выражением:

$$R_{\text{вых}} = \bar{R}_{\text{вых}3} \cdot Z_{03}. \quad (14)$$

Аналогичным образом рассчитывается и выходное реактивное сопротивление схемы.

### **Влияние дестабилизирующих факторов на характеристики логического элемента**

Из анализа выражений (10) – (14) можно сделать вывод, что основными дестабилизирующими факторами, которые влияют на выполнение неравенств (5) и (6), являются:

1. Нестабильность волнового сопротивления  $Z_0$  отрезка линии передачи.
2. Нестабильность фазовой постоянной  $\beta$ .
3. Появление в входном иммитансе паразитной реактивной составляющей  $X_{\text{вх}}$ .

Задачей исследования является оценка влияния данных дестабилизирующих факторов и поиск путей для их минимизации.

Оценим влияние нестабильности волнового сопротивления  $Z_0$  линии передачи на чувствительность выходного активного сопротивления логического элемента при условии, что все другие дестабилизирующие факторы отсутствуют. Чувствительность выходного активного сопротивления схемы от влияния волнового сопротивления отрезков линии передачи описывается выражением

$$S_{Z_0}^{R_{\text{вых}}} = \frac{dR_{\text{вых}}}{dZ_0} \Bigg/ \frac{R_{\text{вых}}}{Z_0}. \quad (15)$$

На основе (7) и с учетом (15) с помощью компьютерного моделирования получены расчетные зависимости чувствительности  $S_{Z_0}^{R_{\text{вых}}}$  от волнового сопротивления  $Z_0$  при разных значениях приведенного входного активного сопротивления  $\bar{R}_{\text{вх}}$  (рис. 4, а).

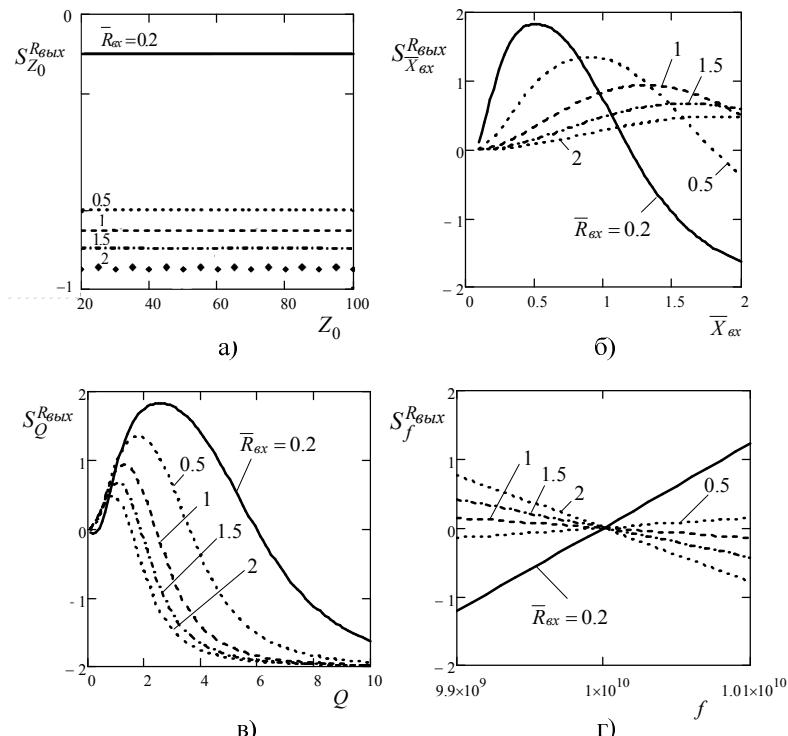


Рис. 4. Расчетные зависимости чувствительности  $S_{Z_0}^{R_{\text{вых}}}$  от волнового сопротивления линии передачи (а), чувствительности  $S_{X_{\text{вх}}}^{R_{\text{вых}}}$  от входного реактивного сопротивления (б), чувствительности  $S_Q^{R_{\text{вых}}}$  от добротности (в), чувствительности  $S_f^{R_{\text{вых}}}$  от частоты сигнала (г) при разных значениях приведенного входного активного сопротивления  $\bar{R}_{\text{вх}}$

Из рис. 4 видно, что чувствительность выходного активного сопротивления  $R_{\text{вых}}$  от изменения волнового сопротивления отрезков линии передач  $Z_0$  является постоянной величиной, причем величина чувствительности увеличивается при увеличении значения входного сопротивления  $\bar{R}_{\text{вх}}$ .

Для оценки чувствительности выходного активного сопротивления  $R_{\text{вых}}$  логического элемента от воздействия паразитного реактивного сопротивления  $X_{\text{вх}}$  будем считать, что  $Z_0$ ,  $f$  и  $l_0$  соответствуют идеальному логическому элементу. Чувствительность выходного активного сопротивления  $R_{\text{вых}}$  от влияния паразитного реактивного сопротивления  $X_{\text{вх}}$  описывается выражением:

$$S_{\bar{X}_{\text{вх}}}^{R_{\text{вых}}} = \frac{dR_{\text{вых}}}{d\bar{X}_{\text{вх}}} \Bigg/ \frac{R_{\text{вых}}}{\bar{X}_{\text{вх}}}. \quad (16)$$

На основе (16) получена зависимость чувствительности  $S_{\bar{X}_{\text{вх}}}^{R_{\text{вых}}}$  при разных значениях приведенного входного активного сопротивления  $\bar{R}_{\text{вх}}$  (рис. 4, б), откуда следует, что чем больше значения  $\bar{R}_{\text{вх}}$ , тем меньше экстремальная величина  $S_{\bar{X}_{\text{вх}}}^{R_{\text{вых}}}$ . В таком случае возможным путем уменьшения нестабильности является использование линии передачи с большим волновым сопротивлением  $Z_0$ .

Исследована зависимость работы схемы от добротности  $Q = X_{\text{вх}}/R_{\text{вх}}$ . Зависимость чувствительности выходного сопротивления от добротности приведена на рис. 4, в, из которой видно, что для получения чувствительности  $S_Q^{R_{\text{вых}}} < \pm 1$  нужно уменьшать значение добротности  $Q < 1$ . В этом случае паразитное реактивное входное сопротивление  $X_{\text{вх}}$  практически не влияет на работу схемы.

Фазовая постоянная  $\beta$  зависит от опорной частоты сигнала  $f_0$ . На рис. 4, г дана зависимость чувствительности  $S_f^{R_{\text{вых}}}$  от изменения несущей частоты сигнала  $f$  при разных значениях приведенного входного сопротивления  $\bar{R}_{\text{вх}}$ . Из графика видно, что при изменении несущей частоты в диапазоне  $\pm 1\%$  величина  $S_f^{R_{\text{вых}}}$  не превышает  $\pm 1$  при

условии  $\bar{R}_{\text{вх}} > 0,2$ . Наибольшая стабильность выходного сопротивления  $R_{\text{вых}}$  достигается при условии  $0,5 < \bar{R}_{\text{вх}} < 1,5$ .

**Выводы.** Проведенные исследования влияния паразитных факторов (изменения волнового сопротивления  $Z_0$  линии передачи и опорной частоты  $f_0$  сигнала, а также наличие паразитного входного иммитанса  $X_{\text{вх}}$ ) на передаточную характеристику логического элемента показали, что изменение величины волнового сопротивления  $Z_0$  линейно влияет на выходное активное сопротивление схемы  $R_{\text{вых}}$ , причем при увеличении значения входного сопротивления  $R_{\text{вх}}$  увеличивается чувствительность  $S_{Z_0}^{R_{\text{вых}}}$ . Для уменьшение влияния  $f$  и  $\bar{X}_{\text{вх}}$  рекомендуется использовать отрезок линии передачи с высоким значением  $Z_0$ , а значение  $R_{\text{вх}}$  выбирать в диапазоне  $0,5 < \bar{R}_{\text{вх}} < 1,5$ .

**Список литературы:** 1. Arsenault H. Optical processing and computing / H. Arsenault. – Elsevier, 2012. – 509 p. 2. Sakhbetdinov M.A. Schemes of effective magnetic and and xor logic elements / M.A. Sakhbetdinov, P.F. Kartsev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2007. – Vol. 71. – №. 8. – P. 1115-1117. 3. Ліщинська Л.Б. Імітансна логіка / Л.Б. Ліщинська, М.А. Філінюк // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2010. – №. 2. – С. 25-31. 4. Ліщинська Л.Б. Оцінка основних параметрів імітансних логічних елементів / Л.Б. Ліщинська // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 3. – С. 45-52. 5. Электронные радиоимпульсные вычислительные системы дискретного действия / Под ред. Неймана М.С. // Труды московского авиационного института. – Том 149. – М.: Оборонгиз, 1962. – 186 с. 6. Кичак В.М. Синтез частотно-импульсных элементов цифровой техники: монография. / В.М. Кичак. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. – 266 с. 7. Кичак В.М. Радіочастотні та широтно-імпульсні елементи цифрової техніки: монографія / В.М. Кичак, О.О. Семенова. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. – 163 с. 8. Філінюк Н.А. Мономімітансні логіческие RLC-елементы / Н.А. Філінюк, Л.Б. Ліщинська, Е.В. Войцеховская, В.П. Стаков // Вістник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 3.– С. 117-121. 9. Filinuk N.A. Monoimmittance logic R-elements / N.A. Filinuk, L.B. Lishchynskaya, O.V. Voycekhovska, V.P. Stakov // П'ята міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія". – Івано-Франківськ – Вінниця, 2015 р. 10. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ: учебное пособие. Том 1 / И.В. Лебедев. – М.: Высшая школа, 1970. – 439 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Arsenault H. Optical processing and computing / H. Arsenault. – Elsevier, 2012. – 509 p. 2. Sakhbetdinov M.A. Schemes of effective magnetic and and xor logic elements / M.A. Sakhbetdinov, P.F. Kartsev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2007. – Vol. 71. – №. 8. – P. 1115-1117. 3. Lishhins'ka L.B. Imitansna logika / L.B. Lishhins'ka, M.A. Filinjuk // Informacijni tehnologii ta kompjuterna inzhenerija. – 2010. – № 2. – S. 25-31. 4. Lishhins'ka L.B. Ocinka osnovnih parametrv imitansnih logichnih elementiv / L.B. Lishhins'ka // Informacijni tehnologii ta kompjuterna inzhenerija. – 2011. – № 3. – P. 45-52. 5. Elektronnye radioimpul'snye vychislitel'nye sistemy diskretnogo dejstvia / Pod red.

*Nejmana M.S. // Trudy moskovskogo aviacionnogo instituta. Tom 149. – M.: Oborongiz, 1962. – 186 p.* **6.** *Kichak V.M. Sintez chastotno-impul'snih elementiv cifrovoi tehniki. monografija / V.M. Kichak. – Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2005. – 266 p.* **7.** *Kichak V.M. Radiochastotni ta shirotno-impul'sni elementi cifrovoi tehniki: monografija / V.M. Kichak, O.O. Semenova. – Vinnicja: UNIVERSUM-Vinnicja, 2008. – 163 p.* **8.** *Filinyuk N.A. Monoimmitansnye logicheskie RLC-jelementy / N.A. Filinyuk, L.B. Lishhinskaja, E.V. Vocehovskaja, V.P. Stahov // Vistnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. – 2015. – № 3. – P.117-121.* **9.** *Filinyuk N.A. Monoimmitance logic R-elements / Filinyuk N.A., Lishchynskaya L.B., Voycehovska O.V., Stakhov V.P. // P'jata mizhnarodna naukovo-praktichna konferencija "Informacijni tehnologii ta kompjuternya inzhenerija". – Ivano-Frankivs'k – Vinnicja, 2015.* **10.** *Lebedev I.V. Tehnika i pribory SVCh: uchebnoe posobie. Tom 1 / Lebedev I.V. – M.: Vysshaja shkola, 1970. – 439 p.*

*Поступила (received) 13.09.2015*

*Статью представил д.т.н., проф. ВНТУ Перевозников С.И.*

Filinyuk Nikolaj, Dr.Sci.Tech, Professor  
Vinnytsia National Technical University  
95 Khmelnitske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021  
tel./phone: (067) 171-22-97, e-mail: N\_Fil\_45@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0001-9600-9082

Fursa Svitlana, PhD Tech.  
Vinnytsia National Technical University  
95 Khmelnitske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021  
tel./phone: 063 880 41 32, e-mail: pip\_1@mail.ru  
ORCID ID: 0000-0003-4678-1423

Stakhov Volodymyr, PhD-student  
Vinnytsia National Technical University  
95 Khmelnitske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021  
tel./phone: (097) 840-29-97, e-mail: vladstakhov@mail.ru

**С.О. ЦОЛОЛО**, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ "ДонНТУ",  
Красноармійськ

## ЗМЕНШЕННЯ ВИТРАТ АПАРАТУРИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ СХЕМИ АВТОМАТА МУРА НА ГІБРИДНИХ FPGA

У роботі пропонується метод зменшення витрат апаратури у схемі мікропроцесорного автомата (МПА) Мура при реалізації в базисі гібридних FPGA. Метод використовує особливості МПА Мура і елементного базису FPGA та заснований на використанні двох джерел класів псевдоеквівалентних станів завдяки великій кількості входів вбудованих елементів PLA в сучасних гібридних FPGA. Іл.: 3. Бібліогр.: 17 назв.

**Ключові слова:** зменшення витрат апаратури, МПА Мура, гібридні FPGA, псевдоеквівалентні стани, вбудовані елементи PLA.

**Постановка проблеми та аналіз досліджень.** Одним з сучасних напрямків у технології FPGA є так називані гібридні FPGA [1, 2]. До складу подібних ПЛІС входять табличні елементи типу LUT (look-up table) і вбудовані програмувальні логічні матриці (PLA, programmable logic array). У літературі практично відсутні методи синтезу пристройів керування, що орієнтовані на гібридні FPGA. Модель мікропрограмного автомата (МПА) Мура часто використовується при реалізації схем пристройів керування [3, 4], які є важливою частиною цифрових схем [5]. У наш час програмувальні логічні інтегральні схеми (ПЛІС) типу FPGA (field programmable gate arrays) є популярним базисом для реалізації складних цифрових систем [6, 7]. При цьому велике значення має зменшення площи кристала, яку займає схема будь-якого блоку системи, у тому числі й МПА [8].

В якості одного із способів організації пристройів керування часто використовуються автомати Мура і Мілі. У [9, 10] детально розглянуті алгоритми побудови керуючих та операційних автоматів, що об'єднуються для реалізації цифрових пристройів. У цих роботах авторами пропонуються такі оригінальні підходи до синтезу логічних схем керуючих автоматів, як багаторівневі структури, принцип перетворення кодів об'єктів, можливості модифікації вихідних граф-схем алгоритмів, реалізації на лічильниках, використання блоків пам'яті.

Важливим для рівня витрат апаратури логічної схеми автомата Мура є етап кодування станів. В [11, 12] наведені ефективні алгоритми кодування станів автоматів і пристройів керування на їх основі.

На даний момент ключовим моментом рішення задачі зменшення

витрат апаратури у схемі керуючого автомата є врахування особливостей елементного базису, в якому буде виконана логічна схема пристрою. Так, в роботах [13, 14] пропонуються способи оптимізації логічної схеми автомата Мура в базисах CPLD і FPGA, в основі яких лежить використання поняття псевдоеквівалентних станів, особливостей цільового базису, специфічні засоби кодування внутрішніх станів. В роботі [15] були запропоновані метод кодування наборів мікрооперацій і принцип розширення кодів станів переходу для ефективної реалізації автоматів Мура на схемах, що замовляються (ASICs).

Таким чином, можна зробити висновок, що тематика розробки методів зменшення апаратурних завтра в логічних схемах автомата Мура для різних елементних базисів є актуальною. Так, в даній роботі розглядається базис гібридних FPGA.

**Мета та завдання досліджень.** Мета – розробка методу зменшення витрат апаратури для схеми автомата Мура при її реалізації у базисі. Для досягнення мети були сформульовані і вирішені такі завдання:

- аналіз особливостей автомата (наявність класів псевдоеквівалентних станів) та елементного базису для їх ефективного врахування в методі, що розробляється;
- розробка способу зменшення схеми формування функцій збудження пам'яті автомата;
- вибір структурної схеми автомата Мура, що дозволяє зменшити витрати апаратури при збереженні рівня швидкодії пристрою.

**Результати розробки і досліджень.** Нехай алгоритм керування цифрової системи представлений ГСА (граф-схемою алгоритму)  $\Gamma = \Gamma(B, E)$ , де  $B = \{b_0, b_E\} \cup E_1 \cup E_2$  – множина вершин;  $b_0$  – початкова вершина ГСА;  $b_E$  – кінцева вершина ГСА;  $E_1$  – множина операторних вершин;  $E_2$  – множина умовних вершин,  $E = \{< b_q, b_t > | b_q, b_t \in B\}$  – множина дуг. У вершинах  $b_q \in E_1$  записуються набори мікрооперацій  $Y(b_q) \subseteq Y$ , де  $Y = \{y_1, \dots, y_N\}$  – множина мікрооперацій операційного автомата цифрової системи [1]. У вершинах  $b_q \in E_2$  записуються елементи множини логічних умов  $X = \{x_1, \dots, x_L\}$ . Початкова і кінцева вершини ГСА відповідають стану  $a_1 \in A = \{a_1, \dots, a_M\}$ , де  $A$  – множина станів автомата Мура, а кожна вершина  $b_q \in E_1$  відповідає одному з елементів множини  $A$  [3]. Логічна схема МПА Мура задається системою рівнянь

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

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

де  $\Phi = \{D_1, \dots, D_R\}$  – множина функцій порушення тригерів пам'яті станів;  $T = \{T_1, \dots, T_R\}$  – множина внутрішніх змінних, що кодують стани  $a_m \in A$ ,  $R = \lceil \log_2 M \rceil$ ;  $M$  – кількість станів. Система (1), (2) формується на основі прямої структурної таблиці (ПСТ) зі стовпцями:  $\Pi_A = \{B_1, \dots, B_I\}$  – поточний стан;  $K(a_m)$  – код стану  $a_m \in A$ ;  $a_s$  – стан переходу;  $K(a_s)$  – код стану  $a_s \in A$ ;  $X_h$  – кон'юнкція деяких елементів множини  $X$  (або їхніх заперечень), що визначає переход  $$ ;  $\Phi_h$  – набір функцій збудження пам'яті МПА, що приймають одиничне значення для перемикання пам'яті з  $K(a_m)$  в  $K(a_s)$ ;  $h = 1, \dots, H_1(\Gamma)$  – номер рядка таблиці. У стовпці  $a_m$  записується набір мікрооперацій  $Y(a_m) \subseteq Y$ , що сформовані у стані  $a_m \in A$ . Відмітимо, що  $Y(a_m) = Y(b_q)$ , де вершина  $b_q \in E_1$  відзначена станом  $a_m \in A$ .

Система (1), (2) визначає модель  $U_1$  автомата Мура (рис. 1), що включає блок переходів (БП), блок мікрооперацій (БМО) і реєстр станів Рг.

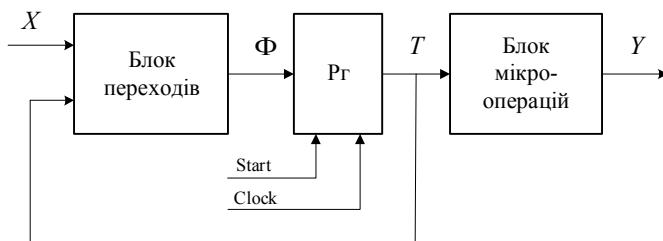


Рис. 1. Структурна схема МПА Мура  $U_1$

У схемі на рис. 1 блок БП реалізує функції (1), а блок БМО – функції (2). Коди станів  $a_m \in A$  зберігаються в реєстрі, що скидається сигналом Start і перемикається за сигналом Clock.

Як правило, число переходів  $H_1(\Gamma)$  більше числа переходів  $H_0(\Gamma)$  еквівалентного автомата Мілі [1]. Це призводить до збільшення апаратурних витрат у схемі МПА Мура в порівнянні із цим показником

еквівалентного автомата Мілі. Параметр  $H_1(\Gamma)$  можна зменшити, завдяки наявності псевдоеквівалентних станів (ПЕС) МПА Мура [16]. Стани  $a_m, a_s \in A$  називаються ПЕС, якщо виходи відповідних їм вершин з'єднані із входом однієї тієї ж вершини ГСА  $\Gamma$ . Нехай  $\Pi_A = \{B_1, \dots, B_I\}$  – розбивка множини  $A$  на класи ПЕС ( $I \leq M$ ). Побудуємо систему функцій

$$B_i = \bigvee_{i=1}^I C_{mi} A_m, \quad (i = 1, \dots, I), \quad (3)$$

де  $C_{mi}$  – булева змінна, що дорівнює одиниці якщо і тільки якщо  $a_m \in B_i$ ;  $A_m$  – кон'юнкція внутрішніх змінних  $T_r \in T$ , що відповідають коду  $K(a_m)$  стану  $a_m \in A$ . Закодуємо стан  $a_m \in A$  так, щоб будь-яка функція системи (3) представлялася одним кон'юнктивним термом. Назовемо таке кодування оптимальним кодуванням станів.

Такий підхід веде до моделі  $U_2$ , структура якої збігається зі структурою моделі  $U_1$ , але число термів відповідає  $H_0(\Gamma)$ . Однак таке кодування не завжди можливо [4] через особливості ГСА. Наприклад, для  $R = 2$ ,  $B_1 = \{a_1\}$ ,  $B_2 = \{a_2, a_3, a_4\}$  оптимальне кодування станів, що скорочує параметр  $H_2(\Gamma)$  до  $H_0(\Gamma)$ , неможливо. Тут ми вводимо позначення  $H_i(\Gamma_j)$ , що визначає число рядків у моделі  $U_i$  при інтерпретації ГСА  $\Gamma_j$ .

Число рядків ПСТ гарантоване дорівнює  $H_0(\Gamma)$ , якщо використати наступний підхід. Поставимо у відповідність класу  $B_i \in \Pi_A$  двійковий код  $K(B_i)$  розрядності  $R_B = \lceil \log_2 I \rceil$  і використаємо змінні  $\tau_r \in \tau$  для такого кодування, де  $|\tau| = R_B$ . У цьому випадку МПА Мура представляється у вигляді структури  $U_3$  (рис. 2).

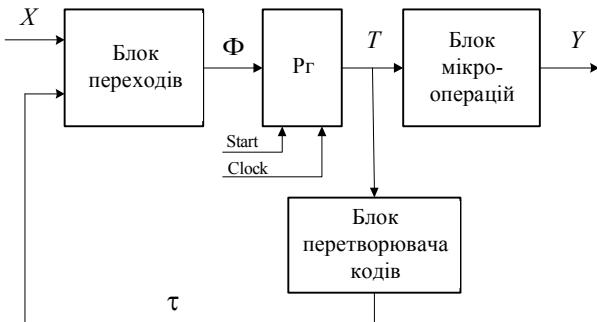
У МПА  $U_3$  блок БП формує функції

$$\Phi = \Phi(\tau, X), \quad (4)$$

а блок перетворювача кодів (БПК) реалізує систему функцій

$$\tau = \tau(T). \quad (5)$$

При цьому код  $K(B_i)$  класу  $B_i \in \Pi_A$  формується на основі кодів станів  $a_m \in B_i$ . Блок БМО реалізує систему (2).

Рис. 2. Структурна схема МПА Мура  $U_3$ 

У роботі [16] показано, що  $H_3(\Gamma) = H_0(\Gamma)$ . Недоліком моделі  $U_3$  є наявність блоку БПК, що споживає деякі ресурси ПЛИС. У роботі пропонується метод синтезу МПА Мура, що дозволяє зберегти позитивні та усунути негативні якості моделі  $U_3$ .

Як вже було відзначено, метод орієнтований на технологію гібридних FPGA. У цьому випадку пропонується реалізувати схему БП на вбудованих PLA, а схеми РГ, БМО і БПК – на LUT-елементах. При цьому необхідно зменшувати число термів у функції (4). Число LUT елементів можна зменшити, якщо використати кілька джерел кодів класів ПЕС.

Закодуємо стани  $a_m \in A$  оптимальним чином. Нехай  $T(B_i)$  – число термів у функції  $B_i \in \Pi_A$ . Представимо множину  $\Pi_A$  у вигляді об'єднання множин  $\Pi_B$  і  $\Pi_C$ . При цьому розподіл класів виконується в такий спосіб:

$$\begin{aligned} (T(B_i) = 1) &\rightarrow B_i \in \Pi_B, \\ (T(B_i) > 1) &\rightarrow B_i \in \Pi_C. \end{aligned} \quad (6)$$

В цьому випадку перетворенню підлягають тільки коди станів  $a_m \in B_i$  для блоків  $B_i \in \Pi_C$ . Поставимо у відповідність кожному класу  $B_i \in \Pi_C$  двійковий код  $K(B_i)$  розрядності

$$R_c = \lceil \log_2(I_c + 1) \rceil, \quad (7)$$

де  $I_C = |\Pi_C|$ . Призначення одиниці у формулі (7) пояснимо пізніше.

Нехай наступні умови виконуються для PLA, що виходить до складу гібридної FPGA:

$$L + R + R_C \leq S, \quad (8)$$

$$H_0(\Gamma) \leq q. \quad (9)$$

В вирази (8), (9) входить число входів  $S$  і термів  $q$  блоку PLA. При виконанні (8), (9) блок БП реалізується у вигляді лише одного блоку PLA.

У роботі пропонується наступна модель  $U_4$  автомата Мура (рис. 3).

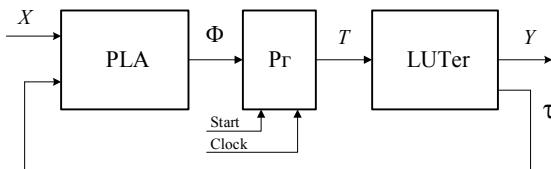


Рис. 3. Структурна схема МПА Мура  $U_4$

У МПА  $U_4$  блок PLA формує функції (8). Блок LUTer складається з LUT елементів і формує вихідні сигнали (2) і функції (5). У МПА  $U_4$  є два джерела кодів класів ПЕС. Коди класів  $B_i \in \Pi_B$  зберігаються в регистрі  $\Gamma$ , а коди класів  $B_i \in \Pi_C$  формуються блоком LUTer.

Для ідентифікації джерела коду ПЕС необхідний спеціальний код. Умовимося, що цей код визначається виразом

$$\tau_r = 0 \left( r = 1, R_C \right).$$

Наявністю цього коду й визначається необхідність додавання одиниці у виразі (7).

Таким чином, у роботі пропонується метод синтезу МПА Мура  $U_4$  за відзначеною ГСА, що включає наступні етапи:

1. Формування розбитки  $\Pi_A = \{B_1, \dots, B_J\}$ .
2. Оптимальне кодування станів  $a_m \in A$ .
3. Формування множин  $\Pi_B$  і  $\Pi_C$ .
4. Кодування класів  $B_i \in \Pi_C$ .
5. Формування вмісту блоку PLA.

6. Формування таблиці блоку LUTer.
7. Формування системи функцій, що задають схему МПА.
8. Реалізація схеми в заданому елементному базисі.

**Висновок.** Технологія гібридних FPGA вимагає адаптації методів синтезу МПА, орієнтованих на базис FPGA. Відсутність вбудованих блоків пам'яті викликає необхідність реалізації системи мікрооперацій на табличних елементах типу LUT. При виконанні умови (8) для реалізації кожної мікрооперації досить використати тільки один LUT. Система функцій збудження пам'яті реалізується на вбудованих блоках PLA. У роботі пропонується метод зменшення апаратурних витрат у схемі МПА Мура. Метод базується на використанні двох джерел класів псевдоеквівалентних станів. Це можливо, завдяки великій кількості входів PLA. Наприклад, у гібридних FPGA APEX20K фірми Altera цей параметр дорівнює 32. Застосування запропонованого методу доцільно при виконанні умов (8), (9), при цьому схема формування функцій збудження пам'яті реалізується на одному блоці PLA. Аналіз стандартних ГСА з бібліотеки [17] показав, що умови (8), (9) виконуються для 87% прикладів (для FPGA APEX 20K).

Наукова новизна запропонованого методу полягає в урахуванні особливостей автомата Мура і елементного базису гібридних FPGA для зменшення апаратурних витрат у схемі автомата. Практична значимість методу полягає в зменшенні вартості схеми автомата Мура на гібридних FPGA у порівнянні з відомими з літератури аналогами.

**Список літератури:** 1. *Kabiani A. The Hybrid Field Programmable Architecture / A. Kabiani, S. Brown. – IEEE Design & Test of Computers. – 1999. – Vol. 16. – № 4. – P. 74-83.* 2. Altera Corporation APEX20K PLD Family Data Sheet (2004) [електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.altera.com](http://www.altera.com). 3. *Baranov S. Logic Synthesis for Control Automata / S. Baranov. – Kluwer Academic Publishers, 1994. – 312 p.* 4. *DeMicheli G. Synthesis and Optimization of Digital Circuits / G. DeMicheli. – McGraw-Hill, 1994. – 636 p.* 5. *Соловьев В.В. Проектирование цифровых схем на основе программируемых логических интегральных схем / В.В. Соловьев. – М.: Горячая линия-ТЕЛЕКОМ, 2001. – 636 с.* 6. *Грушницкий Р.И. Проектирование систем с использованием микросхем программируемой логики / Р.И. Грушницкий, А.Х. Мурсаев, Е.П. Угрюмов. – СПб: БХВ. – Петербург, 2002. – 608 с.* 7. *Skliarova I. Design of FPGA-based circuits using Hierachical Finite State Machines / I. Skliarova, U. Sklyarov, A. Sudnitson. – Tallinn: TUT Press, 2012. – 240 p.* 8. *Czerwinski R. Finite State Machine Logic Synthesis for complex programmable Logic Devices / R. Czerwinski, D. Kania. – Berlin: Springer, 2013. – 172 p.* 9. *Barkalov A.A. Synthesis of operational and control automata / A.A. Barkalov, L.A. Titarenko. – Donetsk: DonNTU, TechPark DonNTU UNITECH, 2009. – 256 p.* 10. *Баркалов А.А. Синтез микропрограммных автоматов на заказных и программируемых СБИС / А.А. Баркалов, Л.А. Титаренко. – Донецк: ДонНТУ, Технопарк ДонНТУ УНИТЕХ, 2009. – 336 с.* 11. *El-Maleh A. Finite state machine state assignment for area and power minimization / A. El-Maleh, S.M. Sait, F.N. Khan // Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 2006. – P. 5303-5306.* 12. *Kubatova H. FEL-Code: FSM internal state encoding method / H. Kubatova, M. Becvar // Proceedings of 5th International Workshop on*

Boolean Problems. – Freiberg, 2002. – Р. 109-114. **13.** Баркалов А.А. Оптимизация схемы МПА Мура на CPLD / А.А. Баркалов, С.А. Ковалев, С.А. Цололо // Материалы Восьмого международного научно-практического семинара "Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы". – Донецк – Таганрог, 2007. – Том 3. – С. 26-36. **14.** Баркалов А.А. Оптимизация логической схемы автомата Мура на FPGA / А.А. Баркалов, А.А. Красичков, С.А. Цололо // Наукові праці ДонНТУ (Серія "Проблеми моделювання та автоматизації проектування динамічних систем"). – Донецьк. – 2006. – № 5 (116). – С. 162-168. **15.** Мальчева Р.В. Матричная реализация автомата Мура с расширением кодов состояний перехода / Р.В. Мальчева, К.А. Солдатов // Наукові праці ДонНТУ. (Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"). – Донецьк. – 2010. – № 11 (164). – С. 79-83. **16.** Баркалов А.А. Принципы оптимизации логической схемы микропрограммного автомата Мура // Кибернетика и системный анализ. – 1998. – № 1. – С. 65-72. **17.** Yang S. Logic Synthesis and optimization bench-marks user guide / S. Yan. // Microelectronics Center of North Carolina, 1991. – 43 p.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Kabiani A. The Hybrid Field Programmable Architecture / A. Kabiani, S. Brown. – IEEE Design & Test of Computers. – 1999. – Vol. 16. – № 4. – P. 74-83. **2.** Altera Corporation APEX20K PLD Family Data Sheet (2004) [elektronniy resurs]. – Rezhim dostupu: www.altera.com. **3.** Baranov S. Logic Synthesis for Control Automata / S.Baranov. – Kluwer Academic Publishers, 1994. – 312 p. **4.** DeMicheli G. Synthesis and Optimization of Digital Circuits / G. DeMicheli. – McGraw-Hill, 1994. – 636 p. **5.** Solov'ev V.V. Proektirovaniye cifrovyykh shem na osnove programmirovemykh logicheskikh integral'nykh shem / V.V. Solov'ev. – M.: Gorjachaya linija-TELEKOM, 2001. – 636 p. **6.** Grushnickij R.I. Proektirovaniye sistem s ispol'zovaniem mikroshem programmiroemoj logiki / R.I. Grushnickij, A.H. Mursaev, E.P. Ugrjumov. – SPb: BHV. – Peterburg, 2002. – 608 p. **7.** Skliarova I. Design of FPGA-based circuits using Hierarchical Finite State Machines / I. Skliarova, U. Sklyarov, A. Sudnitson. – Tallinn: TUT Press, 2012. – 240 p. **8.** Czerwinski R. Finite State Machine Logic Synthesis for complex programmable Logic Devices / R. Czerwinski, D. Kania. – Berlin: Springer, 2013. – 172 p. **9.** Barkalov A.A. Synthesis of operational and control automata / A.A. Barkalov, L.A. Titarenko. – Donetsk: DonNTU, TechPark DonNTU UNITECH, 2009. – 256 p. **10.** Barkalov A.A. Sintez mikroprogrammnykh avtomatov na zakaznykh i programmirovemykh SBIS / A.A. Barkalov, L.A. Titarenko. – Doneck: DonNTU, Tehnopark DonNTU UNITEH, 2009. – 336 s. **11.** El-Maleh A. Finite state machine state assignment for area and power minimization / A. El-Maleh, S.M. Sait, F.N. Khan // Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. – 2006. – P. 5303-5306. **12.** Kubatova H. FEL-Code: FSM internal state encoding method / H. Kubatova, M. Becvar // Proceedings of 5th International Workshop on Boolean Problems. – Freiberg, 2002. – P. 109-114. **13.** Barkalov A.A. Optimizacija shemy MPA Mura na CPLD / A.A. Barkalov, S.A. Kovalev, S.A. Cololo // Materialy Vos'mogo mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminara "Praktika i perspektivy razvitiya partnerstva v sfere vysshej shkoly". – Doneck – Taganrog, 2007. – Tom 3. – P. 26-36. **14.** Barkalov A.A. Optimizacija logicheskoy shemy avtomata Mura na FPGA / A.A. Barkalov, A.A. Krasichkov, S.A. Cololo // Naukovi praci DonNTU. (Serija "Problemi modeljuvannia ta avtomatizacii proektuвання динамічних систем"). – Doneck, 2006. – № 5 (116). – P. 162-168. **15.** Mal'cheva R.V. Matrichnaja realizacija avtomata Mura s rasshireniem kodov sostojanij perehoda / R.V. Mal'cheva, K.A. Soldatov // Naukovi praci DonNTU. (Serija "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка"). – Doneck. – 2010. – № 11 (164). – P. 79-83. **16.** Barkalov A.A. Principy optimizacii logicheskoy shemy mikroprogrammnykh avtomatov Mura // Kibernetika i sistemnyj analiz. – 1998. – № 1. – P. 65-72. **17.** Yang S. Logic Synthesis and optimization bench-marks user guide / S. Yan // Microelectronics Center of North Carolina. – 1991. – 43 p.

Наочності (received) 25.08.2015

*Статтю представив д.т.н., проф. ДонНТУ Святний В.А.*

Tsololo Sergii, PhD Tech  
Donetsk National Technical University  
Sq. Shibankova, 2, Krasnoarmiysk, Ukraine, 85300  
tel./phone: 093 883 21 28, e-mail: s.solos@gmail.com  
ORCID ID: 0000-0002-6425-4769

**РЕФЕРАТИ**

**РЕФЕРАТЫ**

**ABSTRACTS**

УДК 004.4'242

**Використання проміжної мови для трансляції графічних схем алгоритмів у виконуваний код / Алещенко О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 5 – 12.**

Описані функціональні вимоги до системи імітації для отримання оцінок ефективності трансляції графічних схем алгоритмів у виконуваний код з використанням проміжної мови трансляції. Наведено приклад процесу тестування. Описана можливість вказівки точок вимірю чasu виконання програм з метою врахування або ігнорування певних частин алгоритму. Іл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** система імітації, оцінка ефективності трансляції, виконуваний код, проміжна мова трансляції, тестування, час виконання програми, алгоритм.

УДК 004.4'242

**Использование промежуточного языка для трансляции графических схем алгоритмов в исполняемый код / Алещенко А.В. // Вестник НТУ "ХПІ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 5 – 12.**

Описаны функциональные требования к системе имитации для получения оценок эффективности трансляции графических схем алгоритмов в исполняемый код с использованием промежуточного языка трансляции. Приведен пример процесса тестирования. Описана возможность указания точек замера времени выполнения программ с целью учета или игнорирования определенных частей алгоритма. Ил.: 2. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** система имитации, оценка эффективности трансляции, исполняемый код, промежуточный язык трансляции, тестирование, время выполнения программы, алгоритм.

UDC 004.4'242

**The use of intermediate language for translation of flowcharts into executable code / Aleshchenko O.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – P. 5 – 12.**

The functional requirements of the system simulation to obtain estimates the effectiveness of translation a graphic diagram to executable code with intermediate language of translation usage are described. An example of the testing process is given. The ability to specify the measurement points of runtime programs to take account or ignore certain parts of the algorithm is described. Figs.: 2. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** system simulation, estimates of the effectiveness of translation, executable code, intermediate language of translation, test, runtime programs, algorithm.

УДК 681.58

**Необхідна умова стійкості дискретного спостерігаючого пристрою / Волянський Р.С., Садовой О.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 13 – 19.**

Складено матричне рівняння руху безперервного і дискретного спостерігаючих пристрій, які відновлюють першу похідну від сигналу завдання. Отримано їх характеристичні рівняння, і визначено максимально можливе значення періоду дискретизації, при якому замкнута цифрова система залишається стійкою. Іл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** рівняння руху, спостерігаючий пристрій, характеристичне рівняння, період дискретизації, стійкість.

УДК 681.58

**Необходимое условие устойчивости дискретного наблюдывающего устройства / Волянский Р.С., Садовой А.В. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 13 – 19.**

Составлено матричное уравнение движения непрерывного и дискретного наблюдающих устройств, восстанавливающих первую производную от сигнала задания. Получены их характеристические уравнения, и определено максимально возможное значение периода дискретизации, при котором замкнутая цифровая система остается устойчивой. Ил.: 1. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** уравнение движения, наблюдающее устройство, характеристическое уравнение, период дискретизации, устойчивость.

UDC 681.58

**Necessary condition for stability discrete-time observer / Volianskyi R.S., Sadovoy A.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modeling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – P. 13 – 19.**

We show the matrix equations of motion of continuous and discrete observers, reducing the first derivative of the reference signal. We get their characteristic polynomials and determine the maximum possible value of the sampling period at which a closed digital system remains stable. Figs.: 1. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** equations of motion, observers, characteristic equation, sampling period, stable.

УДК 006.91

**Метрологічні аспекти спектрального аналізу напівтонових зображень / Глухова Н.В.** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 20 – 27.

Розглянуто існуючі проблеми розробки метрологічного забезпечення при використанні методів вимірювань, що засновані на реєстрації та спектральному аналізі зображень. Розроблено методику оцінки точності відтворення просторової частоти у процедурі спектрального аналізу цифрових напівтонових зображень, отриманих шляхом сканування. Іл.: 1. Бібліогр.: 23 назв.

**Ключові слова:** метрологічне забезпечення, спектральний аналіз, просторова частота, цифрові напівтонові зображення.

УДК 006.91

**Метрологические аспекты спектрального анализа полутоновых изображений / Глухова Н.В.** // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 20 – 27.

Рассмотрены существующие проблемы разработки метрологического обеспечения при использовании методов измерений, которые основаны на регистрации и спектральном анализе изображений. Разработана методика оценки точности воспроизведения пространственной частоты в процедуре спектрального анализа цифровых полутоновых изображений, полученных путем сканирования. Ил.: 1. Библиогр.: 23 назв.

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, спектральный анализ, пространственная частота, цифровые полутоновые изображения.

UDC 006.91

**Metrological aspects of spectrum analysis of halftone images / Glukhova N.V.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33 (1142). – P. 20 – 27.

The existing problems of development of metrological support by using the measurement methods that based on the detection and analysis of spectral images were considered. The method for evaluating the accuracy of spatial frequency reproduction using the procedure of spectrum analysis of digital halftone images obtained by scanning was developed. Figs.: 1. Refs.: 23 titles.

**Keywords:** metrological support, spectrum analysis, spatial frequency, digital halftone image.

УДК 656.7.022

**Моделі оцінки діяльності авіадиспетчерів в реагуванні на проблемні ситуації на диспетчерських тренажерах / Григорецький В.О., Неділько В.М., Палєонний А.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 28 – 37.**

Розглянуто принципи побудови моделей оцінки дій авіадиспетчерів, що базуються на причинно-наслідковій моделі ризику для повітряного транспорту. Подано класифікацію типових помилок та приклади застосування дерев помилок авіадиспетчерів за критеріями безпомилковості і своєчасності реагування на проблемні (конфліктні) ситуації. Іл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

**Ключові слова:** авіадиспетчер, моделі оцінки дій авіадиспетчерів, причинно-наслідкова модель ризику, повітряний транспорт, тренажер.

УДК 656.7.022

**Модели оценки деятельности авиадиспетчеров в реагировании на проблемные ситуации на диспетчерских тренажерах / Григорецкий В.А., Неделько В.Н., Паленый А.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серия: Информатика и моделирование. – Харков: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 28 – 37.**

Рассмотрены принципы построения моделей оценки действий авиадиспетчеров, основанные на причинно-следственной модели риска для воздушного транспорта. Представлена классификация типичных ошибок и примеры применения деревьев ошибок авиадиспетчеров по критериям безошибочности и своевременности реагирования на проблемные (конфликтные) ситуации. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** авиадиспетчер, модели оценки действий авиадиспетчеров, причинно-следственная модель риска, воздушный транспорт, тренажер.

УДК 656.7.022

**Assessment models of air traffic controller performance in response to problem situation used in simulator / Grigorezky V.A., Nedelko V.N., Palenny A.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – P. 28 – 37. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.**

The principles of construction evaluation models the air traffic actions of controllers based on a causal model of risk for air transport. The classification of typical mistakes and errors examples of the application of the trees the air traffic controllers on the criteria of correctness and timeliness of response to the problem (conflict) situation. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

**Keywords:** air traffic controller, a model for evaluating actions of air traffic controllers, causal risk model, air transport, trainer.

УДК 004.032.26

**Метод діагностики шахтного обладнання на основі мережі зі змішаними функціями активації / Дікова Ю.Л., Федоров Є.Є., Іванов Д.Є. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 38 – 47.**

У статті розглядається метод комплексної діагностики гірничо-шахтного обладнання (ГШО) на основі нейронної мережі зі змішаними функціями активації. Критерієм ефективності запропонованої моделі є її адекватність станам об'єкта. Для чисельного дослідження запропонованого методу були використані дані, отримані з датчиків вимірювання температури і вібрації ГШО. Іл.: 3. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** комплексна діагностика, гірничо-шахтне обладнання, нейронна мережа, функції активації.

УДК 004.032.26

**Метод диагностики шахтного оборудования на основе сети со смешанными функциями активации / Дикова Ю.Л., Федоров Е.Е., Иванов Д.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. . 38 – 47.**

В статье рассматривается метод комплексной диагностики горно-шахтного оборудования (ГШО) на основе нейронной сети со смешанными функциями активации. Критерием эффективности предложенной модели является ее адекватность состоянию объекта. Для численного исследования предложенного метода были использованы данные, полученные с датчиков измерения температуры и вибрации ГШО. Ил.: 3. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** комплексная диагностика, горно-шахтное оборудование, нейронная сеть, функции активации.

UDC 004.032.26

**The diagnostic method of mining equipment based on a network with mixed function activation / Dikova Y. L., Fedorov E. E., Ivanov D. E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33 (1142). – P. 38 – 47.**

In the article described the method complex diagnostic of mining equipment, based on a neural network with mixed functions activation. The criterion for the effectiveness of the proposed model is the adequacy of the object. For the numerical study of the proposed method was used data from sensors measuring temperature and vibration mining equipment. Figs.: 3. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** complex diagnostics, mining equipment, neural network, activation function.

УДК 004.89:519.71

**Багатошарова нейромережева пам'ять, що зберігає ланцюги асоціацій** / Дмитрінко В.Д., Мігущенко Р.П., Заковоротний О.Ю., Бречко В.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 48 – 58.

Вперше на основі двонаправленої асоціативної пам'яті запропонована архітектура та алгоритми функціонування двонаправленої багатошарової дискретної нейронної мережі, яка здатна відновлювати по вхідній інформації, що подається на будь-який з двох її вхідних шарів нейронів, ланцюги асоціацій. Іл.: 2. Бібліогр.: 14 назв.

**Ключові слова:** двонаправлена асоціативна пам'ять, багатошарова дискретна нейронна мережа, ланцюги асоціацій.

УДК 004.89:519.71

**Многослойная нейросетевая память, хранящая цепочки ассоциаций** / Дмитриенко В.Д., Мигущенко Р.П., Заковоротный А.Ю., Бречко В.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 48 – 58.

Впервые на основе двунаправленной ассоциативной памяти предложена архитектура и алгоритмы функционирования двунаправленной многослойной дискретной нейронной сети, которая способна восстанавливать по входной информации, подаваемой на любой из двух ее входных слоев нейронов, цепочки ассоциаций. Ил.: 2. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** двунаправленная ассоциативная память, многослойная дискретная нейронная сеть, цепочки ассоциаций.

UDC 004.89:519.71

**Multilayer neural network memory storing a chain of associations** / Dmitrienko V.D., Migushenko R.P., Zakovorotny A.Yu., Brechko V.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – P. 48 – 58.

The first time on the basis of bidirectional associative memory proposed architecture and algorithms bidirectional multilayer of discrete neural network that is capable of reducing the input of the information supplied on any of its two input layers of neurons, the chain of associations. Figs.: 2. Refs.: 14 titles.

**Keywords:** bidirectional associative memory, multilayer of discrete neural network, chain of associations.

УДК 681.5.013

**Синтез децентралізованого управління запасами в мережах поставок на основі робастності стабілізації підсистем / Дорофеєв Ю.І. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 59 – 74.**

Запропоновано підхід до вирішення задачі синтезу децентралізованого керування запасами в мережах поставок. Локальні регулятори будуються з використанням лінійного динамічного зворотного зв'язку за станом. Для подавлення впливу збурень, які моделюють зміни зовнішнього попиту, одночасно із забезпеченням робастності стійкості замкнутих локальних підсистем застосований метод інваріантних еліпсоїдів. Важливою властивістю отриманого рішення є стійкість за Ляпуновим керованої мережі поставок з децентралізованими регуляторами. Розглянуто чисельний приклад. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 15 назв.

**Ключові слова:** керування запасами, децентралізоване керування, робастна стійкість, метод інваріантних еліпсоїдів.

УДК 681.5.013

**Синтез децентрализованного управления запасами в сетях поставок на основе робастной стабилизации подсистем / Дорофеев Ю.И. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 59 – 74.**

Предложен подход к решению задачи синтеза децентрализованного управления запасами в сетях поставок. Локальные регуляторы строятся с использованием линейной динамической обратной связи по состоянию. Для подавления влияния возмущений, моделирующих изменения внешнего спроса, одновременно с обеспечением робастной устойчивости замкнутых локальных подсистем применен метод инвариантных эллипсоидов. Важнейшим свойством полученного решения является устойчивость по Ляпунову управляемой сети поставок с децентрализованными регуляторами. Рассмотрен численный пример. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 15 назв.

**Ключевые слова:** управление запасами, децентрализованное управление, робастная устойчивость, метод инвариантных эллипсоидов.

UDC 681.5.013

**Synthesis of the decentralized inventory control in supply networks based on the subsystems robust stabilization / Dorofieiev Yu.I. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – P. 59 – 74.**

An approach to solving of the decentralized inventory control synthesis problem in supply chains is proposed. Local controllers are constructed using a linear dynamic feedback with respect to states. In order to suppress the influence of disturbances, which simulating changes in external demand, while ensuring robust stability of closed local subsystems the invariant ellipsoids method is used. The important property of the solution is Lyapunov stability of the controlled supply network with decentralized controllers. The numerical example is considered. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 15 titles.

**Keywords:** inventory control, decentralized control, robust stability, invariant ellipsoids method.

УДК 004.94:519.6

**Алгоритм визначення сусідніх елементів множини рухомих клітинних автоматів за умов фіксованої кількості сусідів / Жихаревич В.В., Газдюк К.П.**  
// Вісник НТУ "ХПІ". Серія Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 75 – 82.

Розглянуто основні алгоритми пошуку найближчих сусідів для бесіткових методів моделювання фізичних процесів. На основі проведеної аналогії рухомих частинок із рухомими клітинними автоматами, запропоновано та досліджено новий алгоритм пошуку сусідів за умов їх фіксованої кількості. На прикладах рівномірного та довільного розподілу автоматів проілюстровано запропонований алгоритм. Іл.: 8. Бібліогр.: 9 назв.

**Ключові слова:** бесітковий метод, рухомі клітинні автомати, алгоритм пошуку сусідів.

УДК 004.94:519.6

**Алгоритм определения соседних элементов множества подвижных клеточных автоматов при условиях фиксированного количества соседей / Жихаревич В.В., Газдюк К.П.** // Вестник НТУ "ХПІ". Серия Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 75 – 82.

Рассмотрены основные алгоритмы поиска ближайших соседей для бесеточных методов моделирования физических процессов. На основе проведенной аналогии подвижных частиц с подвижными клеточными автоматами, предложен и исследован новый алгоритм поиска соседей при условиях их фиксированного количества. На примерах равномерного и произвольного распределения автоматов проиллюстрирован предложенный алгоритм. Ил.: 8. Библіогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** бессеточный метод, подвижные клеточные автоматы, алгоритм поиска соседей.

UDC 004.94:519.6

**Algorithm for determining the neighboring elements of movable cellular automata under the conditions fixed number of neighbors / Zhikharevich V.V., Hazdiuk K.P.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33 (1142). – С. 75 – 82.

The basic algorithms for finding nearest neighbors for brushless methods of modeling physical processes. Based on the analogy of moving particles with movable cellular automata, was proposed and investigated a new search algorithm neighbors under conditions of a fixed amount. For examples of uniform and random distribution of the proposed algorithm is illustrated machines. Figs.: 8. Bibl.: 9 titles.

**Keywords:** brushless method, movable cellular automata, search algorithm neighbors.

УДК 621.255.2001.24

**Апаратно-програмний комплекс оцінки теплового поля**  
/ Кулінченко Г.В., Мозок Е.М. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 83 – 91.

Досліджено можливості побудови аппаратно-програмного комплексу, що забезпечує візуалізацію полів термічних печей. Модернізація інструментарію по обробці первинних сигналів з давачів, прогресивні програмні засоби та алгоритми дозволяють отримувати розподіл теплового поля в режимі реального часу. Результати оцінки теплового поля використовуються для керування процесом термообробки в режимі реального часу. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 16 назв.

**Ключові слова:** розподіл теплового поля, візуалізація полів, аппаратно-програмний комплекс, режим реального часу.

УДК 621.255.2001.24

**Аппаратно-программный комплекс оценки теплового поля**  
/ Куллинченко Г.В., Мозок Е.Н. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 83 – 91.

Изучены возможности построения аппаратно-программного комплекса, обеспечивающего визуализацию полей термических печей. Модернизация инструментария по обработке первичных сигналов с датчиков, прогрессивные программные средства и алгоритмы позволяют получать распределения теплового поля в режиме реального времени. Результаты оценки теплового поля используют для управления процессом термообработки в режиме реального времени. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 16 назв.

**Ключевые слова:** распределение теплового поля, визуализация полей, аппаратно-программный комплекс, режим реального времени.

UDC 621.255.2001.24

**Hardware and software for estimations of the thermal field**  
/ Kulinchenko G.V., Mozok E.N. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – P. 83 – 91.

The possibilities of building hardware and software, provides visualization fields thermal furnaces. Modernization of the primary tools for processing signals from the sensors, advanced software and algorithms are used to obtain the distribution of thermal field in real time. The results of evaluation of the thermal field are used to control the heat treatment process in real time. Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 16 titles..

**Keywords:** distribution of thermal field, visualization fields, hardware and software, process in real time.

УДК 004.932.72'1

**Методика побудови функції принадлежності для класифікації зображень сірчаних відбитків на основі нечітких множин / Логунова О.С., Посохов І.А., Миков А.Ю. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 92 – 104.**

Запропоновано методику класифікації зображень сірчаних відбитків на основі нечітких множин та правил принадлежності з використанням експертних оцінок. При дослідженні причин неоднозначною класифікації введені області зміни форми функції принадлежності: однозначної класифікації, порожнього безлічі, повного поглинання і неоднозначної класифікації. Однозначно класифіковано 100% зображень. Іл.: 7. Бібліогр.: 20 назв.

**Ключові слова:** неоднозначна класифікація, класифікація зображень, нечіткі множини, правила принадлежності.

УДК 004.932.72'1

**Методика построения функции принадлежности для классификации изображений серных отпечатков на основе нечетких множеств / Логунова О.С., Посохов И.А., Миков А.Ю. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 92 – 104.**

Предложена методика классификации изображений серных отпечатков на основе нечетких множеств и правил принадлежности с использованием экспертных оценок. При исследовании причин неоднозначной классификации введены области изменения формы функции принадлежности: однозначной классификации, пустого множества, полного поглощения и неоднозначной классификации. Однозначно классифицировано 100% изображений. Ил.: 7. Библиогр.: 20 назв.

**Ключевые слова:** неоднозначная классификация, классификация изображений, нечеткие множества, правила принадлежности.

UDC 004.932.72'1

**Method of constructing membership functions for image classification sulfur prints based on fuzzy sets / Logunova O.S., Posohov I.A., Mikov A.Yu. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – С. 92 – 104.**

The method of image classification sulfur prints based on fuzzy sets and rules of accessories with expert assessments. In the study of the causes of ambiguous classification change introduced form of membership function: unambiguous classification, the empty set, complete absorption and ambiguous classification. Definitely classified 100% of the images. Figs.: 7. Refs.: 20 titles.

**Keywords:** ambiguous classification, classification of images, fuzzy sets, rule facilities.

УДК 004.93'11:681.5.015.52

**Інтелектуальна інформаційна технологія побудови систем діагностики з використанням моментів ядер Вольтерра / Павленко В.Д., Фомін О.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 105 – 118.**

В роботі представлено інтелектуальну інформаційну технологію підвищення ефективності діагностування станів нелінійних динамічних об'єктів різної фізичної природи з використанням математичних моделей у вигляді ядер Вольтерра. Результати досліджень на тестовому об'єкті контролю показують, що моменти ядер Вольтерра 2-го порядку характеризуються найбільшою стійкістю показника якості діагностування – ймовірності правильного розпізнавання – до похибок вимірювань відгуків об'єктів контролю порівняно з даними їхньої класифікації на основі відліків ядер з заданою дискретністю. Іл.: 5. Табл.: 2. Бібліогр.: 13.

**Ключові слова:** інтелектуальна інформаційна технологія, система діагностики, ядра Вольтерра, математичні моделі у вигляді ядер Вольтерра, якість діагностування.

УДК 004.93'11:681.5.015.52

**Интеллектуальная информационная технология построения систем диагностики с использованием моментов ядер Вольтерра / Павленко В.Д., Фомин А.А. // Вестник НТУ "ХПІ". Серия Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 105 – 118.**

В работе представлена интеллектуальная информационная технология повышения эффективности диагностирования состояний нелинейных динамических объектов различной физической природы с использованием математических моделей в виде ядер Вольтерра. Результаты исследований на тестовом объекте контроля показывают, что моменты ядер Вольтерра 2-го порядка характеризуются наибольшей устойчивостью показателя качества диагностирования (вероятности правильного распознавания) к погрешностям измерений откликов объектов контроля по сравнению с данными их классификации на основе отсчетов ядер с заданной дискретностью. Ил.: 5. Табл.: 2. Библиогр.: 13.

**Ключевые слова:** интеллектуальная информационная технология, система диагностики, ядра Вольтерра, математические модели в виде ядер Вольтерра, качество диагностирования.

UDC 004.93'11:681.5.015.52

**Intelligent information technology building systems diagnostics using nuclear moments Volterra / Pavlenko V.D., Fomin A.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33 (1142). – P. 105 – 118.**

The paper presents the intelligent information technology to increase the efficiency of diagnosing the state of nonlinear dynamical objects of different physical nature with the use of mathematical models in the form of Volterra kernels. Research results on the test object monitoring show that moments of nuclei Volterra 2nd order characterized by the highest stability of the quality of diagnosis (probability of correct recognition) errors in measuring the response of objects of control compared to the data of their classification on the basis of samples of nuclei with a given increment. Figs.: 5. Tabl.: 2. Refs.: 13 titles.

**Keywords:** intelligent information technology, systems diagnostics, Volterra kernels, mathematical models in the form of Volterra kernels, quality of diagnosis.

УДК 004.2: 004.3

**Онтології – засіб для формування змісту навчальних дисциплін / Поворознюк Н.І., Бобрівник К.Є. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. — № 33 (1142). – С. 119 – 124.**

Зміст навчальних дисциплін має відображати фундаментальну інформацію у своїй предметній області, а також основні тенденції розвитку. Для представлення знань у предметній області в останні десятиліття широко застосовується онтологічний підхід. Застосування онтологій для формування змісту навчальних дисциплін дає змогу підвищити якість навчання. Бібліогр.: 13 назв.

**Ключові слова:** навчальна дисципліна, предметна область, представлення знань, онтологія.

УДК 004.2: 004.3

**Онтологии – средство для формирования содержания учебных дисциплин / Поворознюк Н.И., Бобривык Е.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 119 – 124.**

Содержание учебных дисциплин должно отражать фундаментальную информацию в своей предметной области, а также основные тенденции развития. Для представления знаний в предметной области в последние десятилетия широко применяется онтологический подход. Применение онтологий для формирования содержания учебных дисциплин позволяет повысить качество обучения. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** учебная дисциплина, предметная область, представления знаний, онтология..

UDC 004.2: 004.3

**Ontology is means for generating the content of academic disciplines / Povorozniuk N.I., Bobrivnyk K.E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33 (1142). – P. 119 – 124.**

The content of training courses should reflect fundamental information in their subject area, and the main trends. To represent knowledge in the subject area in recent decades is widely used ontological approach. The use of ontologies for shaping the content of training courses enables to increase the quality of education. Refs.: 13 titles.

**Keywords:** subject area, academic disciplines, knowledge representation, ontology.

УДК 004.891.3+681.5

**Застосування нечіткої логіки в комп'ютерних системах медичної діагностики / Поворознюк А.І., Харченко Е.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 125 – 133.**

Розглянуто особливості медичної діагностики, що впливають на якість прийняття рішень в системах підтримки прийняття рішень. Формалізовано експертну інформацію щодо заданих множин діагнозів та їх симптомів. Розроблено метод формування діагностичного висновку при проведенні терапевтичних обстежень на основі нечіткої логіки. Іл.: 4. Табл.: 2. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** медична діагностика, нечітка логіка, система підтримки прийняття рішень.

УДК 004.891.3+681.5

**Применение нечеткой логики в компьютерных системах медицинской диагностики / Поворознюк А.И., Харченко Е.С. // Весник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 125 – 133.**

Рассмотрены особенности медицинской диагностики, влияющие на качество принятия решений в системах поддержки принятия решений. Формализована экспертную информацию по заданным множествам диагнозов и их симптомов. Разработан метод формирования диагностического заключения при проведении терапевтических обследований на основе нечеткой логики. Ил.: 4. Табл.: 2. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** медицинская диагностика, нечеткая логика, система поддержки принятия решений.

UDC 004.891.3+681.5

**The use of fuzzy logic in the computer systems of medical diagnostics / Povoroznuk A.I., Kharchenko E.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – P. 125 – 133.**

The features of medical diagnostics, affecting the quality of decision-making systems, decision support. Formalized expert information on a given set of diagnoses and symptoms. A method of forming a diagnostic conclusion during the internal examination on the basis of fuzzy logic. Figs.: 4. Tabl.: 2. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** medical diagnosis, fuzzy logic, decision-making system.

УДК 004.67:618.3

**Дослідження алгоритмів аналізу даних для прогнозування неонатальних гіпоксичних уражень центральної нервової системи / Скарга-Бандурова І.С., Білобородова Т.О. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – № 33 (1142). – С. 134 – 143.**

Обґрунтовано необхідність використання методів інтелектуального аналізу даних для розв'язання проблеми прогнозування уражень центральної нервової системи (ЦНС) у новонароджених. Визначено основні етапи отримання даних для підтримки прийняття рішень при прогнозуванні патології ЦНС. Запропоновано нові інформаційні моделі прогнозування гіпоксичного ураження ЦНС у новонароджених. Надано результати оцінки ефективності базових алгоритмів аналізу даних. Іл.: 3. Табл.: 3. Бібліогр.: 13 назв.

**Ключові слова:** аналіз даних, прогнозування, підтримка прийняття рішень, алгоритм, оцінка ефективності, модель.

УДК 004.67:618.3

**Исследование алгоритмов анализа данных для прогнозирования неонатальных поражений центральной нервной системы / Скарга-Бандурова И.С., Белобородова Т.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харков: НТУ "ХПИ". – № 33 (1142). – С. 134 – 143.**

Обоснована необходимость использования методов интеллектуального анализа данных для решения проблемы прогнозирования поражений центральной нервной системы (ЦНС) у новорожденных. Определены основные этапы получения данных для поддержки принятия решений при прогнозировании патологий ЦНС. Предложены новые информационные модели прогнозирования гипоксического поражения ЦНС у новорожденных. Представлены результаты оценки эффективности базовых алгоритмов анализа данных. Ил.: 3. Табл.: 3. Библиогр.: 13 назв.

**Ключевые слова:** анализ данных, прогнозирование, поддержка принятия решений, алгоритм, оценка эффективности, модель.

UDC 004.67:618.3

**Research data analysis algorithms for the prediction neonatal lesions of the central nervous system / Skarga-Bandurova I.S., Biloborodova T.O. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – № 33 (1142). – P. 134 – 143.**

The necessity of using data mining techniques to solve the problem of prediction lesions of the central nervous system (CNS) in newborns. The main stages of data for decision support in predicting CNS pathologies. The new information models forecasting hypoxic CNS lesions in infants. Results of evaluating the effectiveness of basic algorithms for data analysis. Figs.: 3. Tabl.: 3. Refs.: 13 titles.

**Keywords:** data analysis, prediction, decision support, algorithm performance evaluation model.

УДК 004.04

**Комп'ютерна система сегментації медичних зображень методом рою часток** / Скобцов Ю.О., Ель-Хатіб С.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 144 – 151.

Представлено програмну систему сегментації медичних зображень на основі алгоритму рою часток та алгоритму  $k$ -середніх. Реалізована програмна система для візуалізації та апробації розробленого алгоритма. Проведено тестування алгоритма, отримано вихідні зображення, виконано порівняння результатів з іншими алгоритмами сегментації. Іл.: 4. Табл.: 1. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** сегментація медичних зображень, алгоритм рою часток, алгоритм  $k$ -середніх.

УДК 004.04

**Компьютерная система сегментации медицинских изображений методом роя частиц** / Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 144 – 151.

Представлена программная система сегментации медицинских изображений на основе алгоритма роя частиц и алгоритма  $k$ -средних. Реализована программная система для визуализации и апробации разработанного алгоритма. Проведено тестирование алгоритма, получены выходные результирующие изображения, выполнено сравнение результатов с другими алгоритмами сегментации. Ил.: 4. Табл.: 1. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** сегментация медицинских изображений, алгоритм роя частиц, алгоритм  $k$ -средних.

UDC 004.04

**The computer system of medical image segmentation using particle swarm optimization** / Skobtcov Y.O., El-Khatib S.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33 (1142). – P. 144 – 151.

In the article presented programming system for medical image segmentation using swarm intelligence method and  $k$ -means algorithm. Implemented system for visualization and probation of developed algorithm. Done algorithm testing and obtained output data. Done results comparison with another segmentation algorithms. Figs.: 4. Tabl.: 1. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** medical image segmentation, particle swarm optimization,  $k$ -means algorithm.

УДК 519.95:612.018

**Математична модель регуляції вуглеводного обміну / Сокіл Е.І.,  
Лапта С.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків:  
НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 152 – 157.**

З використанням функціонально-структурного компартментного підходу, на основі сучасних фізіологічних уявлень про систему регуляції вуглеводного обміну проведена побудова її математичної моделі. Перевірка адекватності моделі й параметрична ідентифікація проведені у випадку внутрішньовенного тесту толерантності до глюкози за літературними клінічними даними. Іл.: 1. Бібліогр.: 8 назв.

**Ключові слова:** функціонально-структурний компартментний підхід, регуляція вуглеводного обміну, математична модель.

УДК 519.95:612.018

**Математическая модель регуляции углеводного обмена / Сокол Е.И.,  
Лапта С.С. // Вестник НТУ "ХПІ". Серия: Информатика и моделирование. –  
Харьков: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 152 – 157.**

Используя функционально-структурный компартментный подход, на основе современных физиологических представлений о системе регуляции углеводного обмена выполнено построение ее математической модели. Проверка адекватности модели и параметрическая идентификация проведены в случае внутривенного теста толерантности к глюкозе по литературным клиническим данным. Ил.: 1. Библиогр.: 8 назв.

**Ключевые слова:** функционально-структурный компартментный подход, регуляция углеводного обмена, математическая модель.

UDC 519.95:612.018

**The mathematical model of the carbohydrate metabolism regulation  
/ Sokol E.I., Lapta S.S// Herald of the National Technical University "KhPI". Subject  
issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33  
(1142). – P. 152 – 157.**

Using the functional-structural compartmental method of approach on the basis of the contemporary physiological ideas about the carbohydrate exchange regulation the construction of its mathematical model is conducted. Checking its adequacy and setting its parameters are realized for the case of intravenous glucose-tolerance test on the basis of literary clinical data. Figs.: 1. Refs.: 8 titles.

**Keywords:** functional-structural compartmental method of approach, carbohydrate exchange regulation, mathematical model.

УДК 004.8+519.7

**Гібридна генетична ідентифікація параметрів нелінійних біологічних динамічних систем / Теплинський К.С. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 158 – 166.**

Проведено дослідження розробленого гібридного генетичного алгоритму оптимізації параметрів складної нелінійної біологічної моделі триступеневого біохімічного метаболізму. Додатково описані необхідні модифікації ГА, які враховують особливості біологічних моделей. Іл.: 2. Табл.: 1. Бібліогр.: 14 назв.

**Ключові слова:** динамічні системи, ідентифікація параметрів, гібридний генетичний алгоритм.

УДК 004.8+519.7

**Гибридная генетическая идентификация параметров нелинейных биологических динамических систем / Теплинский К.С. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 158 – 166.**

Проведено исследование разработанного гибридного генетического алгоритма оптимизации параметров сложной нелинейной биологической модели трёхступенчатого биохимического метаболизма. Дополнительно описаны необходимые модификации генетического алгоритма, которые учитывают особенности биологических моделей. Ил.: 2. Табл.: 1. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** динамические системы, идентификация параметров, гибридный генетический алгоритм.

UDC004.8+519.7

**Hybrid genetic parameter identification of nonlinear biological dynamical systems / Teplinskij K.S. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33 (1142). – P. 158 – 166.**

The research was carried out into usage of implemented hybrid genetic algorithm for parameter estimation of complex nonlinear biological model of three-step biochemical pathway. Additionally, necessary modifications that take into account biological models features are described. . Figs.: 2. Tabl.: 1. Refs.: 14 titles.

**Keywords:** dynamical systems, parameter identification, hybrid genetic algorithm.

УДК 004.932:616-073.7

**Компенсація краївих ефектів в методі підвищення якості візуалізації рентгенівських зображень / Філатова Г.Є. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 167 – 174.**

В роботі розглянуті проблеми реалізації розробленого методу підвищення якості візуалізації мамограм, що пов'язані з краївими ефектами при цифрової обробці зображень. Запропоновано способи компенсації краївих ефектів, що дозволяють зменшити викривлення на краях зображення, а також на границі "молочна залоза – фон". Перевірена працевдатність методу на кількох сотнях реальних цифрових мамограм. Іл.: 2. Бібліогр.: 11 назв.

**Ключові слова:** метод підвищення якості візуалізації, мамограма, краївий ефект, цифрова обробка зображень.

УДК 004.932:616-073.7

**Компенсация краевых эффектов в методе повышения качества визуализации рентгенологических изображений / Филатова А.Е. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 167 – 174.**

В работе рассмотрены проблемы реализации разработанного метода повышения качества визуализации маммограмм, связанные с краевыми эффектами при цифровой обработке изображений. Предложены способы компенсации краевых эффектов, позволяющие уменьшить искажения на краях изображения, а также на границе "молочная железа – фон". Проверена работоспособность метода на нескольких сотнях реальных цифровых маммограмм. Ил.: 2. Библиогр.: 11 назв.

**Ключевые слова:** метод повышения качества визуализации, маммограмма, краевой эффект, цифровая обработка изображений.

UDC 004.932:616-073.7

**Compensation of edge effects in the method of improving the quality of radiographic image visualization / Filatova A.E. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – №. 33 (1142). – P. 167 – 174.**

In this paper the problem of implementation of the developed method to improve the quality of mammograms visualization associated with edge effects in digital image processing are discussed. Compensation methods of edge effects that reduce distortion at the edges of the image as well as at the edge "mammary gland-background" are offered. Efficiency of the method is verified on several hundreds of real digital mammograms. Figs.: 2. Refs.: 11 titles.

**Keywords:** the method to improve the quality of mammograms visualization, a mammogram, edge effect, digital image processing.

УДК 621.38

**Дослідження моноімітансного логічного R-елемента "АБО"**  
/ Філинюк М.А., Фурса С.Є., Стаков В.П. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – С. 175 – 184.

Наведено обґрутування схеми моноімітансного логічного *R*-елемента "АБО". За допомогою комп'ютерного моделювання досліджено вплив на характеристики логічного елемента таких дестабілізуючих факторів, як нестабільність хвильового опору відрізка лінії передачі, нестабільність фазової постійної і появи у вхідному імітансі паразитної реактивної складової. Іл.: 4. Бібліогр.: 10 назв.

**Ключові слова:** моноімітансний логічний *R*-елемент, комп'ютерне моделювання,, дестабілізуючі фактори.

УДК 621.38

**Исследование моноиммитансного логического R-элемента "ИЛИ"**  
/ Филиньюк Н.А., Фурса С.Е., Стаков В.П. // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – С. 175 – 184.

Приведено обоснование схемы моноиммитансного логического *R*-элемента "ИЛИ". С помощью компьютерного моделирования исследовано влияние на характеристики логического элемента таких дестабилизирующих факторов, как нестабильность волнового сопротивления отрезка линии передачи, нестабильность фазовой постоянной и появление во входном иммитансе паразитной реактивной составляющей. Ил.: 4. Библиогр.: 10 назв.

**Ключевые слова:** моноиммитансный логический *R*-элемент, компьютерное моделирование,, дестабилизирующие факторы.

UDC 621.38

**Research of monoimmittance logical R-element "OR" / Filinyuk N.A., Fursa S.E., Stakhov V.P. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – P. 175 – 184.**

The substantiation of the logical circuit monoimmittance *R*-element "OR". Using computer simulations to study the effect of destabilizing factors on the performance of the logic element such as the instability of the wave impedance of the transmission line , phase constant instability and the emergence of parasitic reactance in the input immittance . Figs.: 4. Refs.: 10 titles.

**Keywords:** monoimmittance logical *R*-element, computer modeling, destabilizing factors.

УДК 4.274

**Зменшення витрат апаратури при реалізації схеми автомата Мура на гібридних FPGA / Цололо С.О.** // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 185 – 193.

У роботі пропонується метод зменшення витрат апаратури у схемі мікропрограммного автомата (МПА) Мура при реалізації в базисі гібридних FPGA. Метод використовує особливості МПА Мура і елементного базису FPGA та заснований на використанні двох джерел класів псевдоеквівалентних станів завдяки великій кількості входів вбудованих елементів PLA в сучасних гібридних FPGA. Іл.: 3. Бібліогр.: 17 назв.

**Ключові слова:** зменшення витрат апаратури, МПА Мура, гібридні FPGA, псевдоеквівалентні стани, вбудовані елементи PLA.

УДК 4.274

**Уменьшение аппаратурных затрат при реализации схемы автомата Мура на гибридных FPGA / Цололо С.А.** // Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2015. – № 33 (1142). – С. 185 – 193.

В работе предлагается метод уменьшения аппаратурных затрат в схеме микропрограммного автомата (МПА) Мура при реализации в базисе современных гибридных FPGA. Метод использует особенности МПА Мура и элементного базиса FPGA, и основан на использовании двух источников классов псевдоэквивалентных состояний благодаря большому количеству входов встроенных элементов PLA в гибридных FPGA. Ил.: 3. Библиогр.: 17 назв.

**Ключевые слова:** уменьшение аппаратурных затрат, МПА Мура, гибридные FPGA, псевдоэквивалентные состояния, встроенные элементы PLA.

UDC 4.274

**Reduction of hardware costs in the implementation of a Moore FSM circuit on hybrid FPGA / Tsololo S.A.** // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2015. – № 33 (1142). – P. 185 – 193.

In this paper a method to reduce hardware costs in Moore FSM circuit in the implementation on hybrid FPGA is proposed. The method uses features of Moore FSM and elemental basis of FPGA, and it is based on the use of two sources of classes of pseudoequivalent states due to the large number of inputs of built-in PLA elements in modern hybrid FPGA. Figs.: 3. Refs.: 17 titles.

**Keywords:** reduction of hardware costs, Moore FSM, hybrid FPGA, pseudoequivalent states, PLA elements.

## Зміст

<i>Інформація про членів редколегії видання Вісник НТУ "ХПІ", серія "Інформатика та моделювання"</i> .....	3
<i>Розміщення Вісника НТУ "ХПІ" серії "Інформатика та моделювання" в міжнародних наукометрических базах, репозитаріях та пошукових системах</i> .....	4
<i>Алещенко А.В.</i> Использование промежуточного языка для трансляции графических схем алгоритмов в исполняемый код .....	5
<i>Волянский Р.С., Садовой А.В.</i> Необходимое условие устойчивости дискретного наблюдающего устройства .....	13
<i>Глухова Н.В.</i> Метрологичні аспекти спектрального аналізу напівтонових зображень .....	20
<i>Григорецький В.О., Неділько В.М., Пальоній А.С.</i> Моделі оцінки діяльності авіадиспетчерів в реагуванні на проблемні ситуації на диспетчерських тренажерах .....	28
<i>Дикова Ю.Л., Федоров Е.Е., Иванов Д.Е.</i> Метод диагностики шахтного оборудования на основе сети со смешанными функциями активации .....	38
<i>Дмитриенко В.Д., Мигущенко Р.П., Заковоротный А.Ю., Бречко В.А.</i> Многослойная нейросетевая память, хранящая цепочки ассоциаций .....	48
<i>Дорофеев Ю.И.</i> Синтез децентралізованого управління запасами в сетях поставок на основе робастной стабилизации подсистем .....	59
<i>Жихаревич В.В., Газдюк К.П.</i> Алгоритм визначення сусідніх елементів множини рухомих клітинних автоматів за умов фіксованої кількості сусідів .....	75
<i>Кулинченко Г.В., Мозок Е.Н.</i> Аппаратно-программный комплекс оценки теплового поля .....	83
<i>Логунова О.С., Посохов И.А., Миков А.Ю.</i> Методика построения функции принадлежности для классификации изображений серных отпечатков на основе нечетких множеств .....	92
<i>Pavlenko V.D., Fomin O.O.</i> The intelligent information technology of diagnostic systems building using volterra kernels moments .....	105

<i>Поворознюк Н.І., Бобрівник К.Є.</i> Онтології – засіб для формування змісту навчальних дисциплін .....	119
<i>Поворознюк А.І., Харченко Є.С.</i> Застосування нечіткої логіки в комп'ютерних системах медичної діагностики .....	125
<i>Скарга-Бандурова І.С., Білобородова Т.О.</i> Дослідження алгоритмів аналізу даних для прогнозування неонатальних гіпоксичних уражень центральної нервової системи .....	134
<i>Скобцов Ю.А., Эль-Хатиб С.А.</i> Компьютерная система сегментации медицинских изображений методом роя частиц .....	144
<i>Сокол Е.И., Лапта С.С.</i> Математическая модель регуляции углеводного обмена .....	152
<i>Теплинский К.С.</i> Гибридная генетическая идентификация параметров нелинейных биологических динамических систем .....	158
<i>Филатова А.Е.</i> Компенсация краевых эффектов в методе повышения качества визуализации рентгенологических изображений .....	167
<i>Филинюк Н.А., Фурса С.Е., Стаков В.П.</i> Исследованиеmonoиммитансного логического R-элемента "ИЛИ" .....	175
<i>Цололо С.О.</i> Зменшення витрат апаратури при реалізації схеми автомата Мура на гібридних FPGA .....	185
<i>Реферати, рефераты, abstracts</i> .....	194

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"Харківський політехнічний інститут"**

*Збірник наукових праць  
Серія  
Інформатика та моделювання  
№ 33 (1142) 2015*

Науковий редактор д.т.н. Дмитріенко В.Д.

Технічний редактор д.т.н. Леонов С.Ю.

Відповідальний за випуск к.т.н. Обухова І.Б.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ".

Кафедра обчислювальної техніки та програмування,

тел. (057) 7076198, E-mail: serleomail@gmail.com

Обл. вид. № 55 – 15

Підп. до друку 25.12.2015 р. Формат 60x84 1/16. Папір Copy Paper.

Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,8. Облік. вид. арк. 10,0.

Наклад 300 прим.

Ціна договірна

НТУ "ХПІ", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Видавничий центр НТУ "ХПІ"  
Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

---

Отпечатано в типографии ООО «Цифра Принт»  
на цифровом комплексе Xerox DocuTech 6135.

Свидетельство о Государственной регистрации А01 № 432705 от 3.08.2009 г.  
Адрес : г. Харьков, ул. Данилевского, 30. Телефон : (057) 7861860.