

# ВЕСТНИК

## НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА "ХПИ"

*Сборник научных трудов*

*Тематический выпуск*

*"Информатика и моделирование", № 8*

**19'2007**

Издание основано Национальным техническим университетом "Харьковский политехнический институт" в 2001 году

**Государственное издание**

Свидетельство Госкомитета по  
информационной политике Украины  
КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

**КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

**Председатель**

Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, д-р техн. наук, проф.

**Зам. председателя**

А.П. МАРЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.

Е.И. СОКОЛ, д-р техн. наук, проф.

**Секретарь координационного совета**

К.А. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц.

Е.Е. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук, проф.;

А.В. БОЙКО, д-р техн. наук, проф.;

Т.С. ВОРОПАЙ, д-р фил. наук, проф.;

М.Д. ГОДЛЕВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

А.И. ГРАБЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.Г. ДАНЫКО, д-р техн. наук, проф.;

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.В. ЕПИФАНОВ, д-р техн. наук, проф.;

П.А. КАЧАНОВ, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. КЛЕПИКОВ, д-р техн. наук, проф.;

А.Ф. КИРИЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.И. КРАВЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.А. ЛОЗОВОЙ, д-р фил. наук, проф.;

О.К. МОРАЧКОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф.;

П.Г. ПЕРЕРВА, д-р экон. наук, проф.;

Н.И. ПОГОРЕЛОВ, д-р экон. наук, проф.;

М.И. РЫШЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.Б. САМОРОДОВ, д-р техн. наук, проф.;

В.П. СЕБКО, д-р техн. наук, проф.;

В.И. ТАРАН, д-р техн. наук, проф.;

Ю.В. ТИМОФЕЕВ, д-р техн. наук, проф.;

А.Ф. ШЕХОВЦОВ, д-р техн. наук, проф.

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

**Ответственный редактор:**

В.Д. ДМИТРИЕНКО, д-р техн. наук, проф.

**Ответственный секретарь:**

С.Ю. ЛЕОНОВ, канд. техн. наук, доц.

А.Г. ГУРИН, д-р техн. наук, проф.;

Л.В. ДЕРБУНОВИЧ, д-р техн. наук, проф.;

П.А. КАЧАНОВ, д-р техн. наук.;

Б.Г. НАБОКА, д-р техн. наук, проф.;

А.И. ОВЧАРЕНКО, д-р техн. наук, проф.;

В.П. СЕБКО, д-р техн. наук, проф.;

И.И. ОБОД, д-р техн. наук, проф.

**Адрес редколлегии:** 61002, Харьков,

ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ".

Каф. ВТП, тел. (0572)-707-61-65

**Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"**. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2007. – № 19. – 202 с.

В збірнику представлені теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками різних організацій та установ.

Для викладачів, наукових співробітників, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты исследований и разработок, выполненных преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками различных организаций и предприятий.

Для преподавателей, научных сотрудников, специалистов.

*Вісник Національного технічного університету "ХПІ" внесено до "Переліку № 9 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 14 листопада 2001 року, № 2 – 05/9. (Бюлетень ВАК України № 6, 2001 р., технічні науки, збірники наукових праць, № 2).*

**Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ "ХПІ"  
Протокол № 5 від 1 червня 2007 р.**

© Національний технічний університет "ХПІ"

*О.Г. АВРУНИН*, канд. техн. наук,  
*Т.В. НОСОВА*, канд. техн. наук (г. Харьков)

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ НЕЙРОХИРУРГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

В работе розглядаються принципи побудови сучасних автоматизованих нейрохірургічних комплексів. До складу цих комплексів входить складна апаратура для візуалізації операційного простору, спеціальні хірургічні маніпулятори для управління хірургічним інструментом та системи операційного планування. Виконаний аналіз основних можливостей систем інтраскопічної нейровізуалізації та хірургічної апаратури. Запропоновано перспективні методи операційного планування та віртуального моделювання хірургічних утручань, які засновані на алгоритмах цифрової обробки й аналізу зображень.

Principles of building of modern complicated computer-aided neurosurgical complex and base components of these complex (visualization systems, surgical devises, manipulators and methods of surgical planning) are considered. Capabilities of intrascopy devises and surgical manipulators are described. Principles of high-precision computer-aided guidance of surgical tool in these complex are described. Perspective methods of surgical planning (virtual surgical room) are proposed. This method based on complicated algorithms of digital image processing.

**Введение.** В настоящее время наблюдается активный рост в отрасли производства медицинской аппаратуры. Совершенствование существующих методов и приборов, а также разработка принципиально нового оборудования базируется на широком внедрении информационных и микроэлектронных технологий. Существующую номенклатуру медицинских приборов можно условно разделить на устройства для диагностики и лечения. При этом, если эффективность диагностических процедур можно повысить альтернативными методами, то для хирургических приборов точность выполнения требуемых манипуляций является определяющим фактором. Для обеспечения точности хирургического вмешательства в нейрохирургии используется стереотаксический принцип малотравматичного воздействия на структуры головного мозга человека [1, 2]. Реализация данного подхода предусматривает использование средств интраскопии, функционального контроля и специализированной хирургической техники. При этом основным критерием качества проведенной операции является достигнутый лечебный эффект при минимальной травматизации окружающих структур головного мозга.

**Актуальность темы.** В состав первых аппаратных нейрохирургических комплексов, разработанных более 50 лет назад, входили средства рентгенологической контрастной диагностики и стереотаксические устройства-направители хирургического инструмента. Операционное планирование заключалось в определении параметров наведения хирургического инструмента с помощью стереотаксических расчетов, связанных с косвенной визуализацией зоны оперативного вмешательства [1].

Дальнейшее совершенствование данных комплексов было основано на применении более информативных средств интракраниальной диагностики, обеспечивающих повышение точности визуализации внутримозговых структур, и применении автоматизированных стереотаксических аппаратов, позволяющих упростить процедуру наведения хирургического инструмента. Современный уровень развития медицинской аппаратуры позволяет существенно расширить возможности нейрохирургических комплексов за счет применения новейших технологий интраскопии, объемной визуализации диагностических данных, централизованного микропроцессорного управления хирургическими роботами по сценарию проведения операции, оптимизированному в центре операционного планирования. В этих, постоянно совершенствующихся комплексах, применяются новейшие достижения из области физики, физиологии, нейрохирургии, техники, математической обработки, телекоммуникационных технологий. Поэтому актуальными являются вопросы, связанные с обоснованием принципов построения и формированием медико-технических характеристик для нейрохирургических комплексов, обоснование параметров отдельных подсистем и их согласованности, позволяющие решить общую проблему повышения точности проведения хирургического вмешательства.

**Постановка задачи исследования.** На современном этапе развития хирургической аппаратуры понятие сложного автоматизированного нейрохирургического комплекса (рис. 1) включает в себя совокупность систем интраскопической визуализации, функционального мониторинга, операционного планирования, управления хирургическим инструментом (ХИ) и специализированной хирургической аппаратуры для воздействия на глубинные структуры головного мозга. При этом специфика операций на мозге, соответственно, предъявляет повышенные требования к точности и малой инвазивности хирургического воздействия, которые достигаются путем четкой согласованности характеристик систем, входящих в состав нейрохирургических комплексов. Поэтому **целью данной работы** является рассмотрение основ построения автоматизированных нейрохирургических комплексов, формирование медико-технических характеристик для их проектирования, а также обоснование параметров, принципов организации и оптимального взаимодействия отдельных функциональных подсистем.

Исследование принципов построения систем, входящих в состав автоматизированного нейрохирургического комплекса, целесообразно выполнить на основе модельных представлений на функционально-структурном и информационно-процедурном уровнях.

**Функционально-структурная модель автоматизированного нейрохирургического комплекса.** Как видно из рис. 1, функционирование автоматизированного нейрохирургического комплекса основано на интеграции диагностических средств, сосредоточенных в системах

интраскопической диагностики и функционального мониторинга, вычислительных алгоритмов, реализованных в системе операционного планирования, и системы управления хирургическим инструментом, основанной на применении специализированных роботов, манипуляторы которых обеспечивают оперативный доступ к внутримозговым образованиям с помощью широкого спектра специализированной хирургической аппаратуры. Рассмотрим особенности построения данных систем.

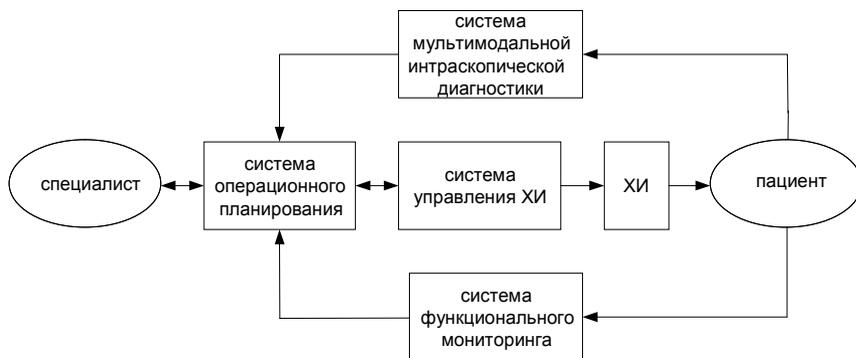


Рис. 1. Структурная схема автоматизированного нейрохирургического комплекса

Получение основной пространственной информации об операционной области обеспечивается системой мультимодальной интраскопической диагностики (см. рис. 2), в состав которой входят средства реконструктивной томографии: рентгеновский спиральный компьютерный томограф (СКТ), магнито-резонансный томограф (МРТ), позитронно-эмиссионный томограф (ПЭТ). Данные установки состоят из подсистем регистрации, реконструкции и первичной обработки полученных данных. В настоящее время наиболее информативным методом для получения геометрических данных о внутримозговых структурах является СКТ, обладающий высокой пространственной разрешающей способностью (до 0,1 мм) [2, 3]. Принцип работы СКТ заключается в том, что вращение рентгеновской трубки вокруг пациента происходит непрерывно, одновременно с поступательным движением стола томографа. При этом достигается существенное сокращение времени сканирования (до десятка секунд), по сравнению со стандартной компьютерной томографией. Данный метод позволяет на основе аксиальных томографических срезов (с толщиной до 0,5 мм) проводить анатомическое картирование головы, отображать с высоким пространственным разрешением костные структуры черепа, мозговые структуры, желудочки, а также патологические образования, отличающиеся по плотности от окружающих тканей, и определять геометрические параметры патологических очагов. Дополнительную информацию о конфигурации сосудистого русла можно

получить путем проведения сканирования при внутривенном введении контрастного вещества с помощью специализированных инъекторов [4]. Этот метод исследования называется контрастной СКТ. Расширенную информацию о внутримозговых образованиях можно получить с помощью методов МРТ и ПЭТ. Метод МРТ основан на определении в тканях плотности протонов, которые при вращательном движении создают магнитные поля [5].

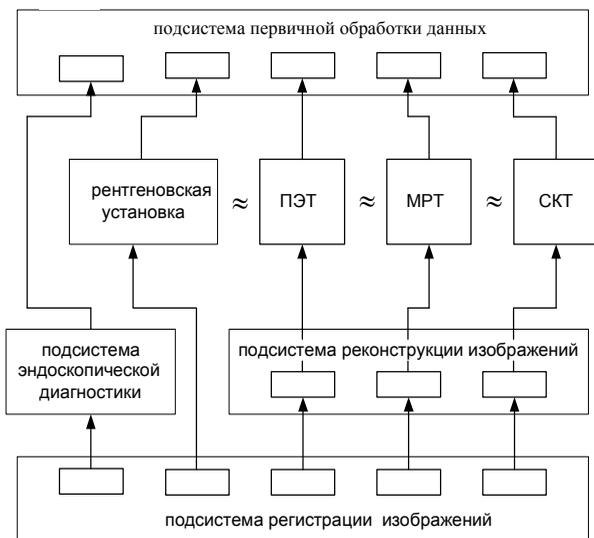


Рис. 2. Структурная схема системы интраскопической диагностики

После регистрации и реконструкции измеренных характеристик результирующего магнитного поля с помощью ЭВМ возможно послыное отображение внутримозговых структур. При этом возможно оценить данные об анатомических структурах и уровнях энергетических, ферментативных и метаболических процессов в них. Метод высоко информативен при диагностике функциональных нарушений мозговых структур, однако обладает меньшей точностью по сравнению с СКТ (погрешность визуализации анатомических объектов составляет порядка 3 мм).

Метод ПЭТ позволяет выполнять функциональное картирование мозга путем отображения распределения радиофармпрепарата во внутримозговых образованиях. При этом появляется возможность выявления патологий до появления структурных изменений в тканях (выявляемых с помощью КТ и МРТ), что существенно улучшает возможности прогнозирования. Сравнительно низкое пространственное разрешение (около 5 мм) и отсутствие привязки к анатомическим образованиям в настоящее время не позволяет использовать данный метод как самостоятельный для планирования оперативных вмешательств. Поэтому на современном этапе применяются

совмещенные установки ПЭТ-СКТ [6], позволяющие в рамках одной системы выполнить привязку функциональной информации к анатомическим структурам. Средства томографии могут использоваться как интраоперационно, так и до проведения оперативного вмешательства. В последнем случае для интраоперационной визуализации могут применяться специализированные навигационные системы, основанные на преоперативных данных, либо традиционные двухпроекционные системы рентгеновских трубок.

Для визуализации внутренних структур по ходу движения хирургического инструмента во время операции применяются средства цифровой эндоскопической диагностики. На современном этапе целесообразно использовать мультимодальный принцип визуализации, который позволяет выполнить объединение анатомической и функциональной информации, полученной с помощью различных методов интраскопии.

В состав системы управления хирургическим инструментом входят следующие основные структурные модули: интерфейсный блок, связывающий блоки управления и обратной связи с системой операционного планирования; блок управления, формирующий управляющие сигналы на приводы транспортного модуля и манипулятора, управляющего хирургическим инструментом (ХИ). Транспортный модуль должен обеспечивать линейные перемещения в 3-х степенях свободы базового блока робота, содержащего манипулятор. Для обеспечения доступа к произвольной структуре мозга манипулятор должен обладать тремя степенями свободы: двумя угловыми (ориентирующими хирургический инструмент в пространстве) и поступательной, позволяющей выполнить введение хирургического инструмента вглубь мозга. Система функционального мониторинга предназначена для контроля функционального статуса пациента во время проведения оперативного вмешательства. В ее состав входит аппаратура для регистрации данных электроэнцефалографии (как общей, так и при введенных электродах в глубинные структуры мозга), кардиографии и электромиографии с соответствующими устройствами регистрации. Централизованное управление и постобработка данных выполняется в специализированном микропроцессорном блоке управления.

Координирующим центром автоматизированного нейрохирургического комплекса является система операционного планирования (рис. 3). В состав данной системы входят модули для 2-х мерной 2D и 3-х мерной пространственной 3D визуализации. При этом в режимах 2D визуализации (непосредственного отображения, мультипланарных реконструкций и 2,5D [7]), как правило выполняются измерительные процедуры, а в 3D-режимах – обеспечение реалистичного отображения виртуальной операционной среды на основе поверхностных или воксельных данных. Информационный интерфейсный модуль предназначен для организации взаимодействия с телемедицинскими сервисами и базами данных. Работа модуля оптимизации хирургического доступа основана на данных объемной воксельной

визуализации. При этом в современных системах должна быть возможность проведения виртуального оперативного вмешательства по данным модуля моделирования объектов операционной среды. На основе полученных данных виртуального моделирования хода оперативного вмешательства возможно проведение коррекции управляющих воздействий на хирургический робот.

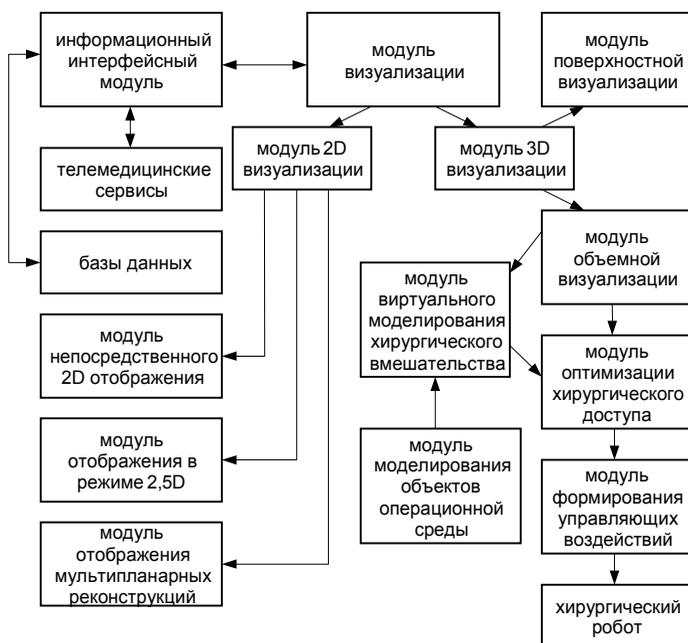


Рис. 3. Структурная схема системы операционного планирования

**Информационно-процедурная модель автоматизированного нейрохирургического комплекса.** Данная модель описывает алгоритмы функционирования комплекса и определяет основные параметры (содержание, формат и скорость) потоков обрабатываемой информации. Первым этапом работы комплекса является получение исходных анатомических и функциональных диагностических данных с помощью системы интраскопической диагностики и передача их в систему операционного планирования. При этом необходимо выполнить анатомическое СКТ-картирование операционной зоны, границы которой составляют сферу диаметром порядка 30 см, с шагом 1 мм. Учитывая, что данные одного изображения СКТ-среза размером  $512 \times 512$  элементов раstra с 16-битовым представлением интенсивности занимают в памяти приблизительно 500 кбайт, объем информации СКТ-исследования составляет порядка 150 МБт. Дополнительные данные функционального картирования, обладающие

меньшей разрешающей способностью, расширяют объем передаваемой информации до 200÷250 Мбайт. С учетом быстродействия современных высокоскоростных интерфейсов передачи данных [8], общая задержка получения информации системой операционного планирования будет определяться, прежде всего, инерционностью подсистем регистрации и постобработки данных томографическими установками. Полученные данные через информационный интерфейсный модуль передаются в модули 2D и 3D визуализации. В первом из них обеспечивается анализ изображений плоских срезов, выполнение произвольно-ориентированных мультипланарных реконструкций и отображение структур данных, содержащих дополнительную информацию об изображении в режиме 2,5D [7]. В модуле поверхностной визуализации реализуются алгоритмы для реалистичного отображения операционной среды. При этом одним из главных критериев реалистичности изображения является тип используемых моделей для представления объектов. Для качественного отображения объектов полигональная модель операционной области должна содержать не менее 500 000 треугольников со средним объемом выделяемой памяти в 200 байт на каждый из них. При скорости анимации не менее 15 кадров в секунду скорость передаваемых данных (без учета передачи дополнительных параметров визуализации) составит не менее 1,5 Гбайт/с, что может быть обеспечено исключительно предельными характеристиками графических интерфейсов AGP 8x и PCI-Express [8]. Модуль объемной визуализации обеспечивает отображение модели операционной области, построенной на основе композиции элементарных объемов (вокселей) [9]. Точность такого представления увеличивается с уменьшением размеров вокселей. При кодировании интенсивности вокселя 256 уровнями объем памяти, занимаемой воксельной моделью с параметрами операционной области, приведенными в предыдущем абзаце, составляет порядка 80 МБт.

Для обеспечения работы алгоритмов операционного планирования необходимо выполнить декомпозицию полутоновой воксельной модели по критерию однородности областей и представить объемное множество данных в виде обобщенной воксельной модели:

$$W(i, n, k) = l, \text{ при } (i, n, k) \in D_l,$$

где  $i, n, k$  – координаты вокселя,  $D_l$  – объемные области, однородные по пространственно-плотностным критериям.

Алгоритм оптимизации хирургического доступа основан на минимизации целевой функции  $F$ , определяющей качество траектории наведения хирургического инструмента, как сумму квадратов разностей между требуемыми значениями координат ХИ  $Y_i$  и фактически полученными  $\hat{Y}_i$  с помощью виртуального моделирования хода оперативного вмешательства. Данная функция в обобщенном виде представляется как:

$$F = \sum_{i=1}^n \varphi_i \cdot (\widehat{Y}_i - Y_i)^2,$$

где  $\varphi_i$  – весовые коэффициенты, показывающие степень точности обеспечения необходимых координат в  $i$ -м узле траектории и определяющие общий уровень инвазивности данного участка траектории. Кроме того, в модель должны быть введены жесткие ограничения, показывающие недоступность определенных жизненно-важных областей мозга. Алгоритм виртуального моделирования хода оперативного вмешательства основан на использовании геометрической модели операционной области, данных картирования мозга пациента и динамической виртуальной модели нейрохирургического робота с набором ХИ. Основной целью виртуального моделирования является выбор и отработка методики проведения операции для выбора хирургического доступа и возможной коррекции управляющих воздействий на ХИ. Для управления ХИ рассматривается модель механической системы хирургического робота-манипулятора, которая описывается системой из 2-х уравнений (кинematики и динамики):

$$\begin{cases} y = f(q); \\ z = A_m(Q_d, Q_n), \end{cases}$$

где  $y, q$  – абсолютные и относительные координаты звеньев манипулятора;  $Q_d, Q_n$  – действующие и противодействующие силы по соответствующим координатам звеньев манипулятора;  $A_m$  – оператор механической системы манипулятора.

Уравнение кинематики манипулятора определяет абсолютные координаты  $y$  звеньев через относительные координаты  $q$ . Уравнение динамики манипулятора показывает зависимость относительных координат звеньев с возмущающими и противодействующими усилиями. При этом входными переменными механической системы манипулятора являются силовые воздействия  $Q_d$  от двигателей, действующих по всем степеням подвижности, а выходные – координаты ХИ и результирующая сила, с которой он воздействует на объекты операционной области. По показаниям системы функционального контроля специалист имеет возможность скорректировать ход оперативного вмешательства и выполнить необходимые дополнительные манипуляции.

**Выводы.** На основании рассмотренных модельных представлений можно сформировать основные принципы построения автоматизированных нейрохирургических комплексов. Нейрохирургические комплексы должны обеспечивать получение исчерпывающих диагностических показателей, выполнять их обработку по заданным алгоритмам операционного планирования и формировать управляющие воздействия на ХИ. В соответствии с принципом мультимодальности система интраскопической

диагностики должна обеспечивать анатомическое и функциональное картирование мозга с максимальной адекватностью отображения внутримозговых ориентиров. При использовании для картирования мозга до операционной диагностической информации необходимо предусмотреть моделирование интраоперационного смещения внутримозговых структур. Методы визуализации должны обеспечивать максимальную точность и наглядность отображения информации, а также проведение измерительных процедур для определения параметров внутримозговых объектов.

Алгоритмы операционного планирования помимо традиционных нейрохирургических методик должны обеспечивать проведение виртуального моделирования хода оперативного вмешательства. Виртуальное моделирование позволяет использовать для выбора оптимальной траектории ХИ данные модели наведения хирургического инструмента, а не сам процесс наведения, связанный с риском повреждения жизненно-важных внутримозговых структур. Хирургический робот-манипулятор должен моделировать систему координат таким образом, чтобы обеспечить оптимальную траекторию (по критерию безопасности) для хирургического доступа к заданной структуре.

Перспективой работы является разработка системы операционного планирования, позволяющей выполнять виртуальное моделирование оперативного вмешательства с учетом физических свойств агентов и на основе многокритериального подхода формировать управляющие воздействия на ХИ для малотравматичного нейрохирургического доступа.

**Список литературы:** 1. Аничков А.Д., Полонский Ю.З., Камбарова Д.К. Стереотаксическое наведение. – Л.: Наука, 1985. – 160 с. 2. Grunert P., Darabi K., Espinosa J., Filippi R. Computer-aided navigation in neurosurgery // *Neurosurg Rev.* – 2003. – Vol. 26. – № 2. – P. 73–99. 3. Shin H., Falck C., Galanski M. Low-contrast detectability in volume rendering: a phantom study on multidetector-row spiral CT data // *Eur Radiol.* – 2004. – Т. 14. – № 2. – P. 341–349. 4. Leclerc X., Taschner C., Vidal A. The role of spiral CT for the assessment of the intracranial circulation in suspected brain-death // *J. Neuroradiol.* – 2006. – Т. 33. – № 2. – P. 90–95. 5. Iacopino D.G., Conti A., Angileri F.F. Different methods for anatomical targeting // *J. Neurosurg. Sci.* – 2003. – Vol. 47. – № 1. – P. 18–25. 6. Труфанов Г.Е., Рязанов В.В., Дергунова Н.И., Дмитриценко А.А., Михайловская Е.М. Совмещенная позитронно-эмиссионная и компьютерная томография (ПЭТ-КТ) в онкологии. – СПб.: “ЭЛБИ-СПб”, 2005. – 124 с. 7. Строзотт Т., Шлехтвег Ш. Нефотореалистичная компьютерная графика: моделирование, рендеринг, анимация. – М.: КУДИЦ-Образ, 2005. – 416 с. 8. Петров С. Шины РС1, РС1 Express. Архитектура, дизайн, принципы функционирования. – СПб.: Питер, 2001. – 370 с. 9. Хилл Ф. OpenGL. Программирование компьютерной графики. Для профессионалов. – СПб.: Питер, 2002. – 1088 с.

*Поступила в редакцию 16.04.2007*

*А.С. БАБИЙ*, ХНУВС (м. Харків)

## ПРОГРАМНА СИСТЕМА ДЛЯ АНАЛІЗУ ЗЛОЧИННОСТІ

Запропонована робота присвячена застосуванню інформаційних технологій для аналізу кримінологічних даних. Розглянуті переваги, які надає використання інформаційних технологій в роботі правоохоронних органів.

The given work reviews using information technologies in crime analysis. Attention is devoted to the role that crime analysis currently and potentially plays in reducing crime and improving the efficiency of police activity.

**Постановка задачі.** На думку кримінологів, правоохоронну діяльність можна умовно класифікувати за спрямуванням на два типи [1]:

- 1) спрямовану на подолання наслідків скоєних злочинів;
- 2) спрямовану на усунення передумов, що сприяють скоєнню злочинів.

На сьогоднішній день існує потреба в програмному забезпеченні, що дозволить автоматизувати процес аналізу інформації про скоєні злочини.

**Аналіз літератури.** Профілактична діяльність, здійснювана правоохоронними органами, повинна носити комплексний характер, а отже вимагає великої кількості інформації, яка міститься в різних джерелах [2]. Ця інформація повинна відповідним чином подаватися, опрацьовуватися, аналізуватися, використовуватися для вироблення та прийняття певних рішень і контролю виконання цих рішень.

В роботі [3] розглянутий досвід застосування різних методів профілактики злочинності, а також місце інформаційних технологій в розв'язанні цієї проблеми. Один з підходів до розгляду злочинності з точки зору аналізу систем розглядається в роботі [4]. В літературі достатньо широко розглянуті класичні математичні та статистичні моделі, які можуть застосовуватись для побудови програмного забезпечення [5]. Використання інформаційних систем для розв'язку задач державної політики щодо злочинності як соціально-патологічного явища, розглянуті в роботі [6]. Успішне розв'язування вказаних задач можливе лише при використанні нових інформаційних технологій на основі засобів обчислювальної і телекомунікаційної техніки. Також існують роботи, які присвячені окремим аспектам проблеми [7].

**Мета статті.** Дана робота присвячена розробці програмної системи для аналізу злочинності з використанням методик обробки інформації про скоєні злочини [7, 8], які враховують особливості предметної області.

**Програмна система для аналізу злочинності.** Функціональна схема розробленої автоматизованої інформаційної системи для підтримки прийняття рішень у справі боротьби зі злочинністю представлена на рис. 1. Кожна задача

аналітика-кримінолога є окремою підзадачею вказаної системи, тобто структура програмної системи побудована за принципом одна задача – один модуль. При цьому передбачена можливість в разі потреби додавання до системи додаткових модулів. У пропонованому програмному продукті, враховуючи діяльність штабних аналітичних підрозділів системи МВС України, передбачено виконання таких робіт:

- збирання потрібної інформації;
- перевірка введення даних;
- аналіз даних, включаючи побудову відповідних моделей;
- побудову прогнозу;
- створення звітів.

Програмна система побудована за технологією клієнт-сервер. Ця технологія дозволяє користувачу на конкретному робочому місці діставати потрібні відомості, що зберігаються в різних інформаційних системах, на різних серверах та комп'ютерах, об'єднаних мережею. Це край важливо для аналізу як самої злочинності, так і передумов, які їй сприяють. Адже на злочинність суттєво впливають чинники різної природи: економічні, політичні, ідеологічні, демографічні тощо. Тому при формуванні початкових даних у вигляді динамічних рядів передбачено:

- введення даних у комірки табличного процесора;
- завантаження даних із локальних файлів;
- одержання інформації з мережевих банків даних.

Для доступу до баз даних використовується технологія доступу ODBC. Ця технологія є стандартним інтерфейсом програмування, який дозволяє доступ до баз даних, які працюють під управлінням різних СУБД і на різних апаратних платформах. При цьому запити до баз даних подаються мовою SQL. Схеми функціонування системи з використанням ODBC зображена на рис. 2.

Програмна частина формування динамічного ряду використовує технологію збережених запитів, що дозволяє користувачу робити запити до бази даних, не вдаючись в подробиці функціонування СУБД та моделей даних.

Збережені запити можуть зберігатися на сервері у випадку, коли це дозволяють права доступу і особливості конкретної СУБД, або в програмі користувача. Збережені запити створюються заздалегідь адміністраторами системи, а користувач в подальшому може змінювати окремі параметри цього запиту.

Користувач може вибрати:

- період, за який проводиться вибірка;
- номер статті кримінального кодексу чи вид злочинів;
- місце реєстрації;
- вік злочинців;
- період групування;
- спосіб групування даних.

Для групи може вибиратися середнє значення елемента в групі, або найчастіше повторюване значення групи.

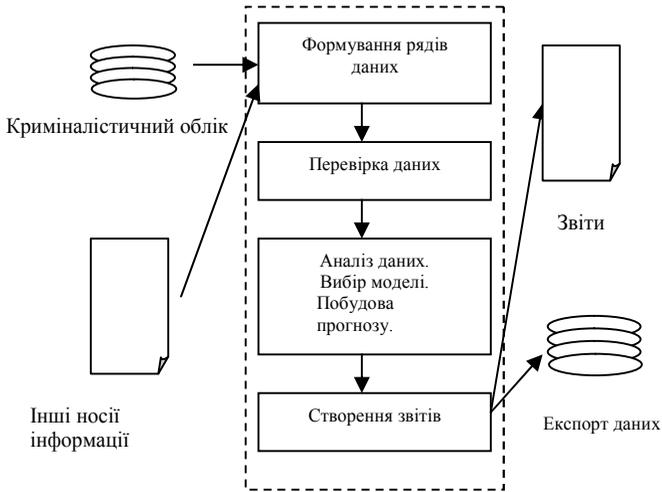


Рис. 1. Схема функціонування програмного продукту

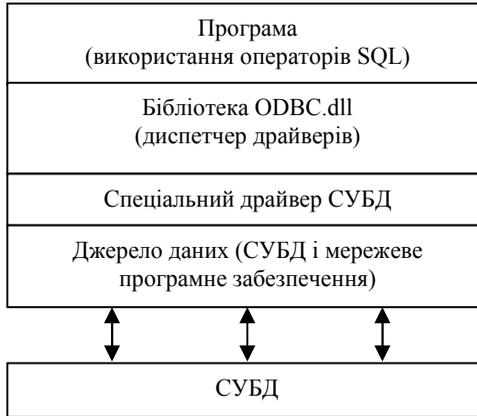


Рис. 2. Використання технології ODBC

Імпортування даних відбувається з використанням технології ODBC. Сумісність СУБД з розробленою системою визначається наявністю драйвера в операційній системі. Більшість реляційних СУБД, що використовуються в автоматизованих криміналістичних та інших обліках, забезпечені вбудованими драйверами в операційну систему.

Для налаштування драйверів та формування збережених запитів задаються параметри ODBC з'єднання. Вони можуть бути різними в залежності від типу використовуваної СУБД. Як правило, це назва бази даних, відомості про протокол з'єднання, відомості про адресу сервера тощо. Налаштування збережених запитів відбувається у віконному режимі, після чого автоматично формується вікно запиту на потрібні дані. Для побудови вікна запропонована програмна система аналізує SQL-конструкцію, виділяючи елементи, які можуть бути змінені користувачем.

Одержані за допомогою збереженого запиту дані переносяться на окремий аркуш MS-Excel. В результаті цієї роботи формується динамічний ряд, який використовується для аналізу злочинності.

В першу чергу ряд перевіряється на явність аномальних рівнів, тобто рівнів, які не відповідають потенційним можливостям початкового динамічного ряду. Поява аномальних рівнів може бути зумовленою різними причинами:

- механічна похибка оператора, або колізія при передаванні даних мережею, особливо при використанні електронної пошти;
- вплив певних факторів, діючих епізодично.

Пошук аномальних рівнів здійснюється статистичними методами [7, 8]. У випадку декількох рядів даних, кожний із них перевіряється окремо. Рішення про роботу з аномальним рівнем приймає користувач: його вилучити, замінити середнім, залишити без змін.

Дані після перевірки на аномальність рівнів ряду передаються модулю аналізу. Основною задачею попереднього аналізу даних є виявлення тренду. При цьому користувачу надається можливість вибрати і порівняти результати роботи декількох методів виявлення тренду. В залежності від вибору елементів в цьому вікні формується склад майстра, який управляє процесом попереднього аналізу даних. Кожному з пунктів, відмічених у формі, співставляється окреме вікно майстра з відповідною інформацією. Користувач може також знайти потрібну інформацію – числові данні із коротким описом на сторінці MS-Excel.

У випадку, коли дані є зашумленими, а досліднику потрібно виявити загальну тенденцію, використовується згладжування рядів. При цьому дослідник завжди повинен пам'ятати про певну втрату інформативності ряду в результаті такого згладжування. Комбінуючи великі і малі періоди згладжування, можна відфільтрувати високочастотне і низькочастотне зашумлення. Згладжування рядів даних може проводитися за різними алгоритмами: просте ковзне середнє, експотенційне згладжування, зважене ковзне середнє.

У модулі "Основні характеристики", програмна система знаходить основні показники динамічного ряду: середнє, середню похибку, медіану, моду, середнє квадратичне відхилення, дисперсію, ексцес, асиметричність,

інтервал, мінімальне і максимальне значення, кількість, рівень надійності тощо.

Досить часто динамічні ряди злочинності мають виражену сезонну компоненту. Перевірка сезонності здійснюється за допомогою методики, яка описана в роботі [8]. Враховуючи ітеративний характер виявлення сезонності і досить значну обчислювальну складність у випадку великих рядів даних, програмна реалізація методу вилучення сезонної компоненти здійснена в окремому модулі, який в разі потреби завантажується у вигляді динамічної бібліотеки. При створенні програмного продукту враховувалося, що важливим моментом аналізу злочинності є побудова її статистичної моделі, яка відображає залежність між рівнем злочинності чи її окремого виду і визначальними чинниками. Подібні моделі можуть використовуватися як при прогнозуванні, так і для пошуку істотних факторів з метою впливу на них для зменшення чи стабілізації злочинності. Передбачено, що модель має вид поліноміальної або експонентної залежності. Виявлення істотних факторів здійснюється статистичними методами [9] з використанням теорії планування обчислювальних експериментів.

Завершальним етапом аналізу злочинності є її прогнозування. Точкове та інтервальне прогнозування здійснюється за допомогою методів, описаних у роботах [4, 5].

**Висновки.** Розглянуте в даній роботі програмне забезпечення є реалізацією методик обробки інформації про скоєні злочини. Використання методик на різних етапах дослідження, дозволяє підвищити ефективність роботи працівників аналітичних підрозділів. Особливістю даної програмної системи є формування набору властивостей динамічного ряду злочинності, які дозволяють з заданим рівнем ймовірності, визначати наявність лінійних та нелінійних зв'язків між злочинністю та факторами, які суттєво впливають на її стан. Використання методик перевірки початкових даних на наявність аномальних рівнів ряду, дозволяє досліднику виявляти, та після експертної оцінки результатів роботи програми використовувати такі відомості. В системі існують засоби оцінки адекватності побудованої моделі.

**Список літератури:** 1. *Инишаков С.М.* Криминология. Ученик. – М.: Юриспруденция, 2000. – 180 с. 2. *Быргеу М.М.* Опыт системного исследования профилактики преступности. Современное состояние проблемы. – М.: Юркнига, 2004 – 160 с. 3. *Фролова О.Г.* Основы логико-математических методов, що застосовуються у кримінальному праві і криминологічних дослідженнях злочинності і системи кримінальних покарань. – Донецьк: ДІВС, 1996. – 128 с. 4. Преступность как система. – Луганск: ЛГУВД, 2006. – 94 с. 5. *Франи Л.* Задачи уголовной политики. Преступление как социально-патологическое явление. – М.: ИНФРА-М., 2004. – 104 с. 6. *Боровков Л.А.* Теория вероятностей. – М.: Наука, 1986. – 432 с. 7. *Королюк В.С., Портенко Н.Н., Скороход А.В., Турбин А. Ф.* Справочник по теории вероятности и математической статистике. – К.: Наукова думка, 1978. – 584 с. 8. *Бабій А.С., Зацеркляний М.М.* Автоматизация аналізу сезонних коливань рівня злочинності // Право і безпека. – 2005. – № 3. – С. 25–29. 9. *Єріна А.М.* Статистичне моделювання та прогнозування. – К.: КНЕУ, 2001. – 170 с.

*Поступила до редакції 16.04.2007*

*И.Л. БУКАТОВА*, д-р физ.-мат. наук, ИРЭ РАН (г. Москва)

## **ТЕОРИЯ ЦЕЛОСТНО-ЭВОЛЮЦИОННОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ КАК ОСНОВА ЭФФЕКТИВНОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ СОЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Розглянуто основні моделі, методики та мета моделі теорії целосно-еволюційної інтелектуалізації, які описують процеси формування та застосування знань в сукупності вложений систем: "макросистема+(людина+І-технологія)+І-технологія". На основі їх аналізу встановлені конкретні засоби системної інтеграції знань, процесів, функцій і технологій, які забезпечують ефективне рішення актуальних задач соціальних систем.

Basic models, methods and metamodels of the Integrity-Evolutionary Theory of Intellectualization which describe the processes of the forming and deployment of knowledge in the totality of Enclosed Systems: Macrosystem+(Human+Intellectual Technology)+Intellectual Technology were considered during the research. Concrete instrumentality of the system's integration of knowledge, processes, functions and technologies are established on the basis of the analysis providing the effective solutions of hottest social system's issues.

**Постановка проблемы.** В настоящее время проблема создания интеллектуальных технологий и оснащение ими различных социальных систем (интеллектуализация) с целью эффективного решения широкого спектра задач человеческой деятельности приобрела актуальнейшее значение. При этом речь идет о системах различного уровня и вида: социальных, экономических, технических, информационных, гибридных (социотехнических, социо-природных, социо-экономико-природных, информационно-технических). Формирование и развитие этих систем на современном этапе, как показано в ряде наших работ [1 – 6], определяются в основном процессами глобализации и интенсивной информатизации, которая на ряду с прочими включает процессы интеллектуализации. В конечном счете, именно это обуславливает необходимость создания интеллектуальных технологий, ориентированных на решение глобальных социально-экономических задач, в том числе, связанных с использованием всевозможных ресурсов, сырья и энергий. Среди актуальных и широко распространенных в социальных системах практических задач отметим следующие:

- создание, научное обоснование и оценка концепций, проектов и программ развития (модернизации, автоматизации и т.п.) технических, производственных и социально-экономических систем;
- эффективный мониторинг глобальных социально-экономических процессов;
- высокоэффективная поддержка принятия решений в различных областях деятельности;
- интеллектуальное взаимодействие человека с информационными системами на уровне знаний в различных сферах социальной активности;

– эффективное накопление и использование интеллектуального ресурса в виде открытых хранилищ данных и знаний, а также различных электронных обучающих средств (справочников, пособий, учебников).

В то же время применение достаточно большого спектра современных интеллектуальных технологий (экспертных систем, средств имитационного и аналитического моделирования, включающего OLAP-анализ и data mining, нейросетевых, генетических и эволюционных средств моделирования, прогноза и оптимизации, геоинформационных систем), ориентированных на решение задач человеческой деятельности, не удовлетворяет практиков, поскольку не приводит к ожидаемому повышению эффективности.

В связи с этим **целью статьи является** концептуальный анализ целостно-эволюционной интеллектуализации и выявление механизмов, обеспечивающих эффективное решение указанных выше задач в отличие от перечисленных традиционных методов интеллектуализации.

**Концептуальные принципы, модели и метамодел** теории. Основные компоненты теории целостно-эволюционной интеллектуализации достаточно подробно описаны в ряде наших работ [2, 4 – 6] с позиций интенсивно развивающейся в последние годы социальной информатики [7] – новой научной парадигмы в области социальных систем.

*Исходную эмпирическую основу теории* целостно-эволюционной интеллектуализации составляют процессы разработки и использования интеллектуальных технологий (И-технологий далее), ориентированных на эффективное решение задач социальных систем.

Здесь социальная система – это эволюционирующее (развивающееся) целостное образование, основными элементами которого являются люди, а также их устойчивые связи, взаимодействия и отношения. Отметим, что при этом человек как лицо, принимающее решение (ЛПР), является не только активным элементом любой социальной системы, источником и двигателем социо-природных процессов, но и он ориентирован, прежде всего, на устойчивый социальный прогресс, на результативное управление в той или иной сфере деятельности: политической, экономической, культурологической, экологической, технологической, научно-технической.

В этих условиях И-технологии являются интегрированными саморазвивающимися и самоорганизующимися программно-техническими комплексами, включающими набор методических, программных и инструментальных средств, развитые средства доступа к базам данных и знаний, а также комфортный интерфейс. Проблемную ориентацию, диапазон приложений, эффективность, а также адаптацию И-технологии к изменяющимся условиям определяют методы, методики, компьютерные и программные средства, интегрированные в технологическую реализацию на основе единых представлений и концептуальных принципов интеллектуализации.

В наших работах проводится анализ двух кардинально отличающихся концепций интеллектуализации:

- оснащение системы и технологии процедурами искусственного интеллекта – традиционная концепция искусственного интеллекта [8 – 10];

- создание методов и средств, на основе которых интеллектуальные функции элементов (процедур, модулей, подсистем) информационной технологии интегрируются в ее интеллектуальные возможности – концепция системной интеграции.

Наш анализ роли субъекта (ЛПР) как элемента социальной системы (макросистемы) в И-технологии [4, 5] показывает, что в рамках традиционного системного подхода макросистема и И-технология – это лишь две взаимодействующие системы. Именно от макросистемы поступают цели и условия на требуемые решения. В строгой постановке информационная технология – это элемент макросистемы, адекватно "вписанный" в структуру ее информационных потоков [4]. В этом качестве технология объединяет другие элементы макросистемы (объекты интеллектуализации) и вступает с ними во взаимодействие при решении задач. Специфическим каналом связи между ними в социальной системе выступает человек (ЛПР).

Отметим следующее отличие: в первом случае интеллектуализация достигается путем максимальной активизации (в рамках технологии) интеллектуальных возможностей ЛПР как элемента макросистемы. Во втором – эффективная интеллектуализация достигается при эффективном взаимодействии макросистемы (объектов интеллектуализации), ЛПР и технологии деятельности за счет следующих процессов:

- структурируемости деятельностного (социального или социо-природного) процесса на этапы обучения, анализа, оценки результата, процедуры предметной деятельности и синтеза процедур в процесс;

- выделения общего и индивидуального в деятельностном процессе, динамику и структурную эволюцию которого определяют динамика изменений проблемной ситуации (объективная составляющая) и субъективное представление человеком решаемой задачи (методология);

- разработки соответствующей технологичной операционной среды интеллектуальных действий;

- использования мониторинга операционной среды, обеспечивающего постоянное обновление как собственно социальных знаний, так и механизмов их формирования.

В то же время из нашего анализа многоуровневой системы информационных потоков макросистемы [4 – 6] следует, что эффективность процессов интеллектуализации определяется в значительной мере *согласованностью и взаимодействием* макросистемы, ЛПР и И-технологии (а не только интеллектуальным взаимодействием ЛПР и И-технологии, которые составляют систему, называемую далее метасистемой). Поэтому более эффективна интеллектуализация в аспекте системной интеграции,

которая предполагает выполнение следующих основных методологических принципов:

- принципа согласованного формирования знаний ЛПР и интеллектуальной технологии (принцип когнитивной согласованности);
- принципа аналогии технологической среды процесса деятельности и операционной среды интеллектуального действия ЛПР (принцип технологических аналогий);
- принципа интеграции интеллектуальных возможностей (индивидуально-личностной адаптации) ЛПР и информационной технологии в процессе решения задач социальной деятельности (принцип интеллектуальной интеграции);
- принципа постоянного отслеживания интеллектуальной технологией динамики состояний макросистемы (принцип когнитивно-продуктивного мониторинга).

При этом речь идет не столько о поэтапном решении проблемы надления информационной технологии функциями интеллекта, сколько о системной интеграции в целостную социальную систему всех её интеллектуальных ресурсов: интеллектуальных функций компонент, их свойств, процессов, деятельностных технологий, всех процессов добывания, формирования и использования знаний. Иначе говоря, – об эволюционном, развивающемся адекватно меняющимся условиям, формировании в целостную систему всех интеллектуальных возможностей, обеспечивающих эффективное взаимодействие естественного (ЛПР) и искусственного интеллектов [4 – 6].

В наших работах показано, что при таких требованиях интеллектуализация на основе традиционного подхода (даже с использованием некоторых принципов системной интеграции) ведет к проблемам концептуального и методологического характера.

Преодоление последних демонстрируется нами на основе целостно-эволюционного подхода [4]: целостно-эволюционном представлении макросистемы, метасистемы и И-технологии как совокупности вложенных систем и обеспечения в них целостности процесса приобретения знаний за счет комплексной реализации известных принципов системного подхода (эмерджентности, структурируемости, согласованности, иерархии и вложенности, интегрированности). Это и определяет, в конечном счете, особенности и эффективность целостно-эволюционной интеллектуализации в сравнении с традиционной интеллектуализацией, в том числе, включающей некоторую интеграцию.

Таким образом, *исходную теоретическую основу* теории целостно-эволюционной интеллектуализации составляет система базовых понятий, описывающих идеализированный объект теории – процесс приобретения (формирования и использования) знаний в совокупности вложенных систем: "И-технология+метасистема+макросистема" [2, 4 – 6]. Перечислим здесь основные из них: *вложенная система, когнитивный канал, когнитивный*

*аттрактор, когнитивный процесс, внешние и внутренние потребности, когнитивные и продуктивные воздействия, процессы когнитивного и продуктивного взаимодействия, интеллектуальная интеграция (ЦЭ-интеграция), целостно-эволюционная интеллектуализация (ЦЭ-интеллектуализация), структур-стратегия, когнитивная и продуктивная технологии, метатехнология, ЦЭ-среда, ЦЭ-мониторинг.*

Здесь, в частности, элементарная ячейка приобретения знаний – когнитивный канал (К-канал). Это система, состоящая из интегрированной базы знаний, технологических и технических средств, которые обеспечивают формирование нового знания и продуктивные действия в соответствии с проблемной ситуацией.

Установлена структура «вложенных» когнитивных каналов и сформированы модели процессов приобретения знаний – когнитивных процессов, в них происходящих. Показано, что формирование нового знания (в пределах любого К-канала) осуществляется на основе процессов ЦЭ-интеграции и ЦЭ-интеллектуализации. ЦЭ-интеграция настраивает технологические и технические средства на выполнение того или иного когнитивного процесса, используя когнитивное и продуктивное взаимодействие в когнитивном канале под воздействием когнитивного канала более высокого уровня. ЦЭ-интеллектуализация выполняет конкретный когнитивный процесс и передает результат-аттрактор в интегрированную базу знаний данного когнитивного канала.

Теория включает анализ когнитивных процессов по спектру выполняемых ими интеллектуальных функций (И-функций), по месту и роли этих функций в когнитивных каналах и процессах приобретения знаний. В дальнейшем на основе этих результатов уточняются функциональные модели когнитивных процессов, И-функций, компонент процесса приобретения знаний, проводится формализация задач синтеза и мониторинга эффективных технологий.

Теория целостно-эволюционной интеллектуализации включает также:

- методики и аппарат визуализации ЦЭ-интеграции интеллектуальных функций, в совокупности обеспечивающих целостность процесса приобретения знаний;
- базовые парадигмы, модель их интеграции и метамодель процесса ЦЭ-интеллектуализации, обеспечивающего формирование знания при применении интеллектуальной технологии;
- метамодель метатехнологии, интегрирующей методики реализации И-функций, методики синтеза эффективных структур-стратегий, базовые парадигмы актуализации когнитивной и продуктивной технологий.

**Эффективность средств реализации.** В конечном счете, в наших работах [4, 6] на основе перечисленных компонент теории разработана концептуальная среда (платформа) интеллектуализации социальных систем, имеющая следующие компоненты:

– теоретико-методологическую среду, включающую универсальную методологию анализа глобальных процессов (МСИП) в соответствии с принципами целостно-эволюционного представления, базовые понятия, модели когнитивных процессов, методики и метамодели, описывающие целостный процесс приобретения знаний;

– технологическую среду, включающую модели процессов системной интеграции, модели и методики когнитивной и продуктивной технологий и И-технологии как метатехнологии, полученной путем их интеграции.

Отметим, что при создании интеллектуальной технологии в виде когнитивно-продуктивной метатехнологии интегрируются следующие средства технологической среды [4, 6]:

– программные модули, реализующие социальные процедуры, социальные процессы, технологии, решающие задачи социальной деятельности;

– средства мониторинга текущей ситуации (идентификация текущей ситуации, идентификация режима актуализации, идентификация базовых парадигм);

– средства реализации парадигм когнитивного ресурса;

– средства реализации парадигм продуктивного ресурса;

– средства формирования базовых, когнитивной и продуктивной, технологий;

– средства синтеза структур-стратегий базовых технологий (формирование структур-стратегий, формирование предысторий знаний и действий, оценка структур-стратегий);

– средства оптимизации структур-стратегий базовых технологий в различных режимах актуализации;

– средства реализации интеллектуальных функций (обучение, адаптация, самоорганизация), интегрированные в базовые технологии.

Также представляет интерес анализ процессов и механизмов, за счет которых происходит эффективная интеллектуализация в социальных системах при целостно-эволюционном подходе.

Структура процессов приобретения знаний в совокупности вложенных систем, составляющих социальную систему, представлена нами в работе [4] и включает следующие процессы (в соответствии с базовыми понятиями целостно-эволюционной теории [2, 4]):

– **когнитивного взаимодействия** – взаимодействия технологических средств и базы знаний в каждой компоненте социальной системы на основе информации, несущей знание, по обратным воздействиям от компонент более низкого уровня;

– **продуктивного взаимодействия** – взаимодействия технологических средств и базы знаний в каждой компоненте социальной системы на основе информации о функциональных и структурных изменениях данной компоненты;

– *ЦЭ-интеграции* – формирования конкретной конфигурации технологических средств (организационной структуры) каждой компоненты социальной системы на основе процессов продуктивного и когнитивного взаимодействия;

– *ЦЭ-интеллектуализации* – формирования и передачи знаний (метазнаний) в интегрированную базу знаний каждой компоненты социальной системы по прямым воздействиям в данной компоненте.

Целостный процесс интеллектуализации социальной системы составляет следующий комплекс интегрируемых в процессе ЦЭ-интеграции интеллектуальных функций: интеллектуальная коррекция, самообучение, адаптация, самоорганизация, реализуемые в каждой компоненте социальной системы, а также взаимоадаптация, обучение и самоорганизация, реализуемые между её смежными компонентами. Их схемы интеграции и конкретная реализация обсуждаются нами детально в работах [4 – 6].

При этом ЛПР является активно действующим звеном целостно-эволюционной интеграции, являющейся основным механизмом эффективности целостно-эволюционной интеллектуализации в сравнении с традиционным подходом искусственного интеллекта. Действительно, широко практикуемая концепция системной интеграции сводится в основном к совместимости входных и выходных информационных потоков интегрируемых компонент. В то же время при целостно-эволюционной интеллектуализации осуществляется системная интеграция не только информационных потоков, но и теоретико-аналитических моделей, методик, процедур, механизмов обучения, адаптации, самоорганизации и других интеллектуальных функций и средств, в результате чего обеспечивается целостность процесса приобретения знаний в социальной системе и, в конечном счете, эффективность решения задач.

Наш анализ и применения данного подхода в различных социальных системах при решении конкретных практических задач [4 – 6, 11 – 13] позволяет отметить также следующие особенности целостно-эволюционной интеллектуализации, в которых отражается применение указанных механизмов эффективности:

– автоматизированная поддержка управления процессов И-технологии на основе ЦЭ-мониторинга;

– интеллектуальный интерфейс, основанный на ЦЭ-интеграции интеллектуальных функций;

– ЦЭ-среда, централизованная по знаниям и децентрализованная по технологиям принятия решений;

– состав и параметры моделей, формируемые на основе ЦЭ-методик и средств ЦЭ-среды;

– согласованная эволюция знаний, функций, процессов, средств за счет ЦЭ-мониторинга и средств ЦЭ-среды;

– когнитивно-продуктивные метатехнологии анализа, прогноза и принятия решений.

В результате при целостно-эволюционной интеллектуализации И-технология приобретает ряд отличий качественных свойств по сравнению с традиционной интеллектуальной технологией:

– она является интеллектуальным ядром (а не интеллектуализированным фрагментом) социальной системы;

– она не только решает информационно-расчетные задачи на основе формирования знаний в отдельных предметных областях, но и интегрирует когнитивные и продуктивные знания всех вложенных компонент объекта интеллектуализации, включая ЛПР;

– она интегрирует интеллектуальные возможности (комплекс функций) технологии, а не только автоматизирует её отдельные интеллектуальные функции;

– она характеризуется глобальной устойчивостью в достижении целей, которая обеспечивается устойчивым характером формирования и накопления знаний в рамках объекта интеллектуализации на основе целостно-эволюционной интеграции ЛПР и технологии социо-природного процесса.

**Выводы.** Рассмотрены основные компоненты теории целостно-эволюционной интеллектуализации и описаны модели, методики и метамодели, которые фактически создают эффективную теоретико-методологическую среду для решения задач анализа, прогноза, принятия решений и управления при глубокой интеграции и согласованной эволюции сформированных в ту или иную системную совокупность социо-природных процессов единой системы "макросистема+(человек+И-технология)+И-технология".

На основе анализа средств реализации И-технологии выявлены процессы и механизмы, обеспечивающие более высокую эффективность решения указанных выше актуальных и широко распространенных в социальных системах практических задач [3 – 6, 11 – 13].

Показано, что при этом в социальной системе по целостно-эволюционным схемам реализуется системная интеграция знаний и процессов их формирования в полном объеме в условиях развития системообразующих факторов.

По нашему мнению, целостно-эволюционная интеллектуализация, наряду с возможной реализацией концептуально близкого поисково-оптимизационного подхода [14], является единственной возможностью проектирования эффективных в условиях развития социальных факторов (природных, технических, технологических, экономических и др.) современных высоко интегрированных интеллектуальных информационных технологий и систем.

**Список литературы:** 1. Букатова И.Л., Макрусев В.В. и др. Эвоинформатика и проблемы моделирования социоприродных систем // Социальная информатика-99 / Под ред. Б.А. Сулакова. – М.: РАЕН, МАИ, 1999. – С. 56–64. 2. Букатова И.Л. Когнитивно-эволюционная теория интеллектуальных технологий // Социальная информатика-2001 / Под ред. Б.А. Сулакова. – М.: РАЕН, МАИ, 2001. – С. 131–141. 3. Букатова И.Л., Рогожников Е.А. Целостно-эволюционная концепция информационной системы, ориентированной на тематическую обработку данных дистанционного зондирования Земли // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов, 2002. – №4. – С. 31–43. 4. Букатова И.Л., Макрусев В.В. Теория целостно-эволюционной интеллектуализации социальных систем. – М.: МИГКУ, 2004. – 125 с. 5. Букатова И.Л., Макрусев В.В. Современные информационные технологии управления. – М.: РИО РТА, 2003. – 252 с. 6. Букатова И.Л., Роцупкин О.М. Интеллектуализация банковской деятельности: целостно-эволюционный подход. – М.: Альянс, 2005. – 242 с. 7. Колин К.К. На пути к информационной цивилизации // Проблемы информатизации. – 2001. – № 2. – С. 37–45. 8. Лорьер Ж.-Л. Системы искусственного интеллекта. – М.: Мир, 1991. – 568 с. 9. Новое в искусственном интеллекте. Методологические и теоретические вопросы / Под ред. Д.И. Дубровского и В.А. Лекторского. – М.: Интел, 2005. – 280 с. 10. Ильин В.П. Высокие информационно-вычислительные технологии // Вестник РАН. – 1996. – Т. 66. – № 6. – С. 552–557. 11. Букатова И.Л., Роцупкин О.М. Проблема интеллектуализации банковской деятельности: концептуальный анализ // Вестник НТУ "Харьковский политехнический институт". – Сборник научных трудов. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2003. – № 26. – С. 129–135. 12. Букатова И.Л., Боев Б.В., Роцупкин О.М. Когнитивно-эволюционные модели в интеллектуальных стратегиях маркетинга, продаж и сервиса. // Тезисы докладов и выступлений на II Всероссийском социологическом конгрессе "Всероссийское общество и социология в XXI веке: социальные вызовы и альтернативы": в 3 т. – М.: Альфа-М, 2003. – Т. 1. – С. 534–536. 13. Букатова И.Л., Матвеев М.А. Целостно-эволюционный идентификатор нейронных сетей для обработки изображений // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. Обзорная информация. – 2004. – № 7. – С. 32–40. 14. Гринченко С.Н. Интеллект и "поисково-оптимизационная" картина мира // Открытое образование. – 2005. – № 2 (49). – С. 39–42.

*Поступила в редакцию 20.04.2007*

*А.И. БЫХ*, д-р физ.-мат. наук, ХНУРЭ (г. Харьков),  
*Е.В. ВЫСОЦКАЯ*, канд. тех. наук, ХНУРЭ (г. Харьков),  
*О.А КОЗИНА*, канд. тех. наук, НТУ "ХПИ" (г. Харьков),  
*С.В. НУЖНОВА*, ХНУРЭ (г. Харьков),  
*К.В. ЧЕБАНОВ*, ХНУРЭ (г. Харьков),  
*М.С. КОНОВАЛОВ*, ХНУРЭ (г. Харьков)

## **БИОТЕХНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ВЫЯВЛЕНИЯ ФАТАЛЬНЫХ НАРУШЕНИЙ РИТМА, ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ПРОФИЛАКТИКИ ВНЕЗАПНОЙ КОРОНАРНОЙ СМЕРТИ**

Для вирішення актуальної медичної задачі дослідження, виявлення і діагностики захворювань серцево-судинної системи пропонується біотехнічна система виявлення фатальних порушень ритму, попередження і профілактики раптової коронарної смерті. Розроблена біотехнічна система дозволяє визначити загрозу смерті від інфаркту міокарду і тим самим надає можливість своєчасно провести необхідні лікувально-профілактичні заходи.

For the decision of actual medical task of research, discovery and diagnostics of diseases cordially-vascular system the biotechnical system of exposure of fatal violations of rhythm is offered, warning and prophylaxis of sudden coronal death. The developed biotechnical system allows to define the threat of death from the heart attack of myocardium and the same gives possibility in good time to conduct necessary medically-prophylactic measures.

**Введение.** Исследование, обнаружение и диагностика заболеваний сердечно-сосудистой системы является одной из важнейших задач в медицине. В Украине, по данным МОЗ на 1.01.2006 г., распространенность инфаркта миокарда и смертности от него достигли соответственно 118,4 и 19,3 случаев на 100 тысяч взрослого населения. По статистическим показателям заболеваемости и смертности от сердечно-сосудистых патологий Украина занимает одно из первых мест в мире. Одним из ведущих методов изучения активности сердца является электрокардиография (ЭКГ). Она на сегодняшний день незаменима при диагностике инфаркта миокарда, ишемической болезни сердца, гипертрофии предсердий и желудочков и других заболеваний сердца [1 – 4].

В последние десятилетия при анализе ЭКГ все чаще применяются математические методы. Наибольшую известность получило так называемое вейвлет-преобразование (Wavelet-transform) [5, 6]. Оно представляет собой разложение сигнала по набору базисных функций, которые определены на интервале, более коротком, чем длительность кардиосигнала. При этом все базисные функции из набора порождаются с помощью двухпараметрического преобразования (сдвига по оси времени и изменения масштаба) одной исходной функции, называемой “материнский вейвлет”. Большие значения параметра масштаба соответствуют применению к исходному сигналу фильтра низких частот, малые значения – фильтра высоких частот [7, 8].

Важной проблемой современной медицины остается предупреждение и профилактика внезапной коронарной смерти. Поэтому автоматизированный анализ ЭКГ, основанный на современных математических подходах, позволяющих не только оценить состояние сердечно-сосудистой системы, но и определить риск внезапной коронарной смерти является важным аспектом при разработке кардиологических систем.

**Анализ существующих систем.** Существует большое количество диагностических кардиосистем, позволяющих диагностировать инфаркт миокарда с учетом локализации процесса и степени поражения. Одной из таких систем является российская система “Валента®”, позволяющая проводить исследования по нескольким методикам с формированием электронной истории болезни. Она позволяет проследить любые качественные показатели ЭКГ (ЧСС, QT, PQ, смещение ST-сегмента и др.), но не дает оценки клинической картины в целом, не может соотносить между собой результаты различных исследований [9].

Комплекс для экспресс диагностики сердца “Кардиовизор-6С” использует уникальный метод неинвазивного экспресс контроля функционального состояния сердца, основанный на компьютерном расчете и 3D-визуализации “портретов сердца” электромагнитного излучения миокарда по низко амплитудным флуктуациям стандартной ЭКГ, регистрируемой по отведениям от конечностей. Она на ранних стадиях выявляет наличие патологических изменений при различных заболеваниях: ишемической болезни сердца (ИБС), гипертонической болезни (ГБ), кардиомиопатии, пороках, интоксикациях и т.д., но не позволяет прогнозировать течение острого инфаркта миокарда (ИМ).

Комплект кардиоритмографических исследований (КРГ) применяется для выявления и классификации нарушений сердечного ритма, оценки динамики развития ИБС и ГБ, анализа нарушений ритма, выявление типа и характера аритмий [10].

Система “Валента+” предназначена для определения амплитудно-временных параметров, кодов форм зубцов и других специфических морфологических признаков по ЭКГ [11].

Все известные системы не позволяют прогнозировать течение острого инфаркта миокарда, сравнивать результаты обследований в динамике, проводить поиск и анализ информативных признаков, характеризующих острый коронарный синдром и внезапную коронарную смерть.

**Целью работы** является разработка биотехнической системы (БТС) ранней диагностики внезапной коронарной смерти.

**Структура и возможности БТС.** Разработанная авторами БТС позволяет проводить раннюю диагностику острого коронарного синдрома, выявлять на ранних стадиях фатальные нарушения ритмов сердца, предупреждать внезапную коронарную смерть.

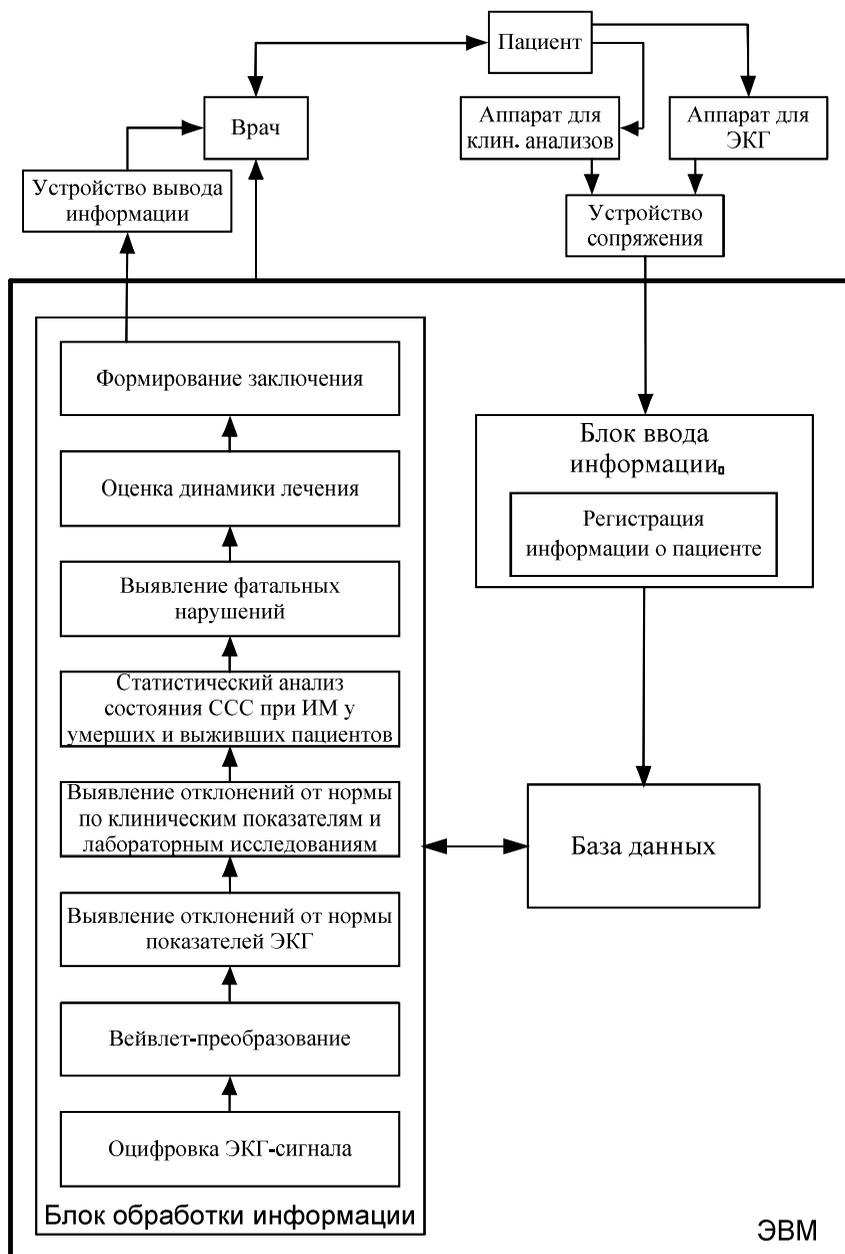


Рис. Структурная схема БТС выявления нарушений ритма, предупреждения и профилактики внезапной коронарной смерти

Данные о пациенте, полученные в результате обследования с помощью диагностической аппаратуры, осмотра и опроса, посредством устройства ввода информации, заносятся в базу данных. В базу данных включены 15 информативных показателей состояния сердечно-сосудистой системы, полученные из 183 имеющихся показателей.

Основным ядром созданной системы является блок обработки информации, в котором производится преобразование ЭКГ сигнала в цифровой вид, его вейвлет-преобразование, выявление отклонений от нормы по клиническим показателям и лабораторным исследованиям, и сигналу ЭКГ. Далее в этом блоке проводится статистический анализ состояния сердечно-сосудистой системы при инфаркте миокарда у умерших и выживших пациентов, выявление фатальных нарушений, оценивается динамика лечения и формируется заключение, которое, в свою очередь, выводится на устройство вывода (монитор, принтер и т.п.) и подается для анализа врачу.

Разработанная система позволяет не только установить наличие инфаркта миокарда и определить его местоположение, составить представление о величине инфаркта по протяжению, а также его "глубине", т.е. о большем или меньшем распространении некротического процесса в толщу стенки сердца, но и определить риск внезапной коронарной смерти. Кроме того, система дает возможность следить за динамикой процесса и доставляет ценный материал для прогноза.

**Выводы.** Таким образом, разработанная биотехническая система выявления фатальных нарушений ритма, предупреждения и профилактики внезапной коронарной смерти позволяет определить угрозу смерти от инфаркта миокарда и тем самым предоставляет возможность своевременно провести необходимые лечебно-профилактические мероприятия.

**Список литературы:** 1. Мурашко В.В., Струтынский А.В., Ардашев В.Н. Электрокардиография: Учеб. пособие. – М.: Медицина, 1987. – 255 с. 2. Смирнов И.П., Шнепс-Шнелле М.А. Медицинская системотехника. – М.: Медицина, 1995. – 208 с. 3. Ступелис И.Г., Струтынский А.В. Прогнозирование в кардиологии. – Вильнюс: Арисмос, 2004. – 163 с. 4. Амосов Н.М. Некоторые вопросы моделирования сложных систем. – М.: Атомиздат, 1995. – Т. 4. – 360 с. 5. Lenegry F. Significance of Positive, Tall and Peaked Electrocardiographic T Waves in Early Diagnosis of Ischemic Heart Disease // *Electrocardiography clinique*. – Paris: Masson and Cie, 1994. – P. 24–29. 6. Lewis T. The mechanism and graphic registration of the heart bear // *American Journal of Physiology*, 1996. – № 25. – P. 457 – 468. 7. Амосов Н.М., Сидаренко Л.Н., Зайцев Н.Г., и др. Информационные медицинские системы. – К.: Наукова думка, 2000. – 340 с. 8. Яковлев Г.М., Ардашев В.Н., Кац М.Д., Галкина Т.А. Метод мозаичного портрета в прогнозировании инфаркта миокарда // *Кардиология*. – 1981. – № 6. – С. 45–56. 9. Постнова Т.Б. Информационно-диагностические система в медицине. – М.: Наука, 2003. – 407 с. 10. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ: Учеб. пособие для ВУЗов / Под ред. А.Л. Барановского и А.П. Немирко. – М.: Радио и связь, 1993. – 248 с. 11. Доцицин В.Л. Практическая электрокардиография. – М.: Медицина, 1987. – 336 с.

*Поступила в редакцию 14.04.2007*

*А.М. БЫЧКОВ,*

*Г.А. КУЧУК,* канд. техн. наук,

*А.А. МОЖАЕВ,* канд. физ.-мат. наук

## **МЕТОД ПРОГНОЗА МАГИСТРАЛЬНОГО ТРАФИКА КРИТИЧЕСКОГО УЧАСТКА МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ**

Для критичної ділянки магістралі мультисервісної мережі запропонований метод прогнозу фрактального трафіка, який не потребує оперативного обчислення показника Херста.

For a critical site of a highway a multiservice network the method of the forecast fractal traffic, not demanding operative calculation of a parameter of Hurst is offered.

**Введение.** Теория фрактального трафика позволяет адекватно отображать сложные процессы, происходящие в мультисервисных сетях (МС) с коммутацией каналов [1]. В рамках этой теории появилось значительное число работ о методах прогнозирования интенсивности трафика, в частности, о практическом подходе к прогнозированию качества обслуживания [2], о прогнозировании трафика Интернет [3, 4], о новых подходах к прогнозированию самоподобного трафика [5 – 7]. В ряде работ рассматривается возможность использования различных методов исследования фрактального трафика для повышения качества обслуживания в сети [8 – 10]. Однако, необходимый для большинства из рассмотренных работ количественный расчет оценки границ изменения масштабных и частотных свойств анализируемого процесса требует дополнительной информации в режиме, близком к режиму реального времени, что на практике зачастую приводит к существенному превышению допустимых объемов передаваемой по магистральным линиям служебной информации. Поэтому задача нахождения как можно более точного предсказания магистрального трафика, особенно на критических участках сети, без перегрузки сети служебными пакетами, является **актуальной**. В связи с этим **целью данной статьи** является разработка и обоснование метода прогнозирования магистрального трафика в критическом участке магистрали с наибольшей возможной точностью без существенного увеличения объема служебной информации.

**Постановка задачи и предварительный анализ.** В настоящее время существующие и перспективные телекоммуникационные сети строятся на основе полной интеграции всех сетевых ресурсов. Важной особенностью таких сетей является полностью унифицированное представление информационных сообщений, создаваемое различными разнородными источниками. Одним из вариантов, используемым для анализа такой сложной многоуровневой иерархической системы, какой в настоящее время является

мультисервисная сеть [1], является ее моделирование на основе линейризуемой системы массового обслуживания [2].

В качестве объекта исследования рассмотрим модель сети, магистральный граф которой имеет критические участки, на которых между вершинами-маршрутизаторами существуют ребра-мосты, называемые «критическими участками» (КУ) магистрали (рис. 1, где  $s_1, s_2, \dots, s_N$  – источники информации,  $r_1, r_2, \dots, r_M$  – потребители информации,  $R$  – маршрутизаторы канала, являющегося критическим участком).

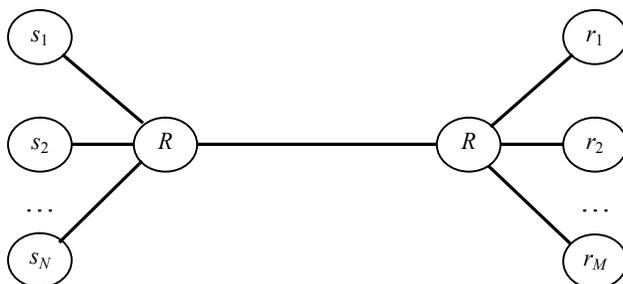


Рис. 1. Топология сети с одним КУ

Для рассматриваемой топологии МС с КУ присущи все характерные особенности телекоммуникационного трафика интегрированной сети с коммутацией пакетов, в том числе его самоподобность и масштабная инвариантность [10 – 12].

Для исследования данного участка магистрального трафика используем локальные пробные пакеты (ПрП), обязательно проходящие через критический участок. Пробный трафик формируем из ПрП объемом  $L$ , отправляемых в МС через малые промежутки времени параллельно с магистральным трафиком (рис. 2). Длительность интервала времени между прибытием последовательных ПрП в место назначения используется для определения характера магистрального трафика на КУ МС.

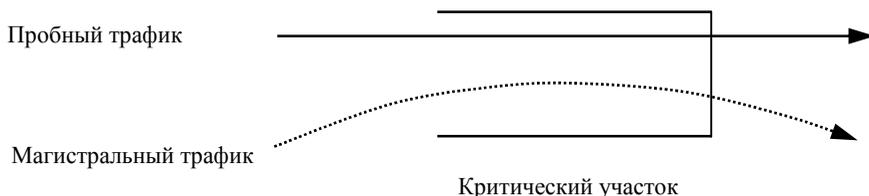


Рис. 2. Исследование характера трафика на критическом участке МС

Образец временной диаграммы при посылке двух пробных информационных пакетов представлен на рис. 3.

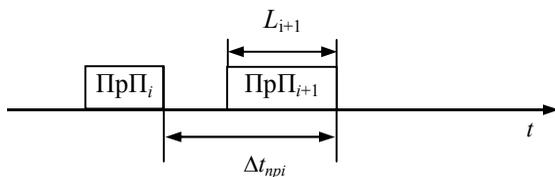


Рис. 3. Анализ двух последовательных ПрП

Для упрощения анализа критического участка МСТС с учетом предложенной топологии сети и модели пробных пакетов сделаем локализующие предположения:

- 1) в сети существует только один критический участок;
- 2) порядок прохождения пакетов не изменится как до, так и после критического участка;
- 3) ёмкость критического участка известна.

С учетом данных предположений можно точно сосчитать объем магистрального трафика между двумя ПрП. Исходя из предположения 2 интервал времени между двумя пробными пакетами не изменится после того, как они пройдут критический участок. Без предположения 2 (если два ПрП где-то, кроме критического участка, получают дополнительную задержку), интервал времени между прибытием двух служебных пакетов, возможно, будет искажен, что приведёт к недооценке или переоценке магистрального трафика.

Если в критическом участке сети отсутствует какой-либо магистральный трафик, а интервал времени между двумя соседними ПрП удовлетворяет неравенству

$$\Delta t_{npi} < L/C, \quad (1)$$

где  $C$  – ёмкость критического участка, то разность времен прибытия двух пакетов в пункт назначения рассчитывается как

$$t'_{npi} = L/C. \quad (2)$$

Выражение (2) означает, что при выполнении условия (1) и непревышении ёмкости  $C$  над  $L$ , трафик может обслуживаться за время  $L/C$ , прежде чем первый пакет покинет очередь, а второй пакет будет в очередь помещён, т.е. временной интервал между прибытием двух пакетов составляет  $L/C$ .

Магистральный трафик, поступающий к потребителю в интервале времени  $[t_0, t_0 + t]$  обозначим как  $f_i(t_0)$ , где  $t_0$  – момент времени, когда первый пакет пересекает критический участок сети. Тогда интервал времени между прибытием пробных пакетов в место назначения равен

$$\tau = \frac{L + f_i(t_0)}{C}, \quad (3)$$

т.е. зная  $C$  и  $L$ , можно сделать заключение об объеме магистрального трафика за интервал времени  $[t_0, t_0+t]$ .

Следовательно, если периодически передавать пары пробных пакетов и измерять временной интервал между их прибытием, то из выражения (3) можно получить значение магистрального трафика  $f_i(t_0)$ . Однако, значение  $C$  обычно велико, а значение  $L$  чаще всего несоизмеримо мало по сравнению с  $C$ , т.е. для определения магистрального трафика придётся отправить значительное количество пар пробных пакетов, что приведет к существенной нагрузке КУ МС.

**Дополнительные обозначения.** Для стационарного случайного процесса  $f_t, t = 0, 1, 2, \dots$  определим изоморфный агрегированный процесс как

$$f_k^m = \frac{1}{m} \sum_{i=(k-1)m+1}^{km} f_i, k = 1, 2, 3, \dots$$

Пусть  $r(k)$  и  $r^{(m)}(k)$  – автокорреляционные функции (АКФ) процессов  $f_t$  и  $f_k^{(m)}$  соответственно. Если

$$r(k) \sim k^{-\beta} L_1(k), k \rightarrow \infty, 0 < \beta < 1, \quad (4)$$

где  $L_1(k)$  – медленно изменяющаяся функция при  $k \rightarrow \infty$ , то  $f_t$  – процесс с долговременной зависимостью (ДВЗ), характеризующийся параметром Херста  $H = -\beta/2 + 1$ . Если  $r(k) = r^{(m)}(k)$ , то процесс  $f_t$  является самоподобным процессом второго рода. Поэтому, получив оценку структуры АКФ магистрального трафика на некотором временном интервале, можно с определенной погрешностью провести оценку структуры АКФ магистрального трафика в любой момент времени.

**Описание метода.** В предлагаемом методе прогнозирования телекоммуникационного трафика  $(n + 1)$  ПрП отправляются друг за другом через малый промежуток времени  $\Delta t$ . Времена между прибытиями ПрП составляют ряд  $\tau_i, i = 1, \dots, n$ , позволяющий определить ряд  $f_i(t_i)$  и, соответственно, агрегированный ряд  $f_a(i)$ , анализируя который, получаем

$$\hat{f}_a(n+1) = [a_1, \dots, a_n] \begin{bmatrix} f_a(1) \\ \dots \\ f_a(n) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – коэффициенты, полученные с помощью метода наименьших квадратов (МНК):

$$[a_1, \dots, a_n] = [R(n) \dots R(1)] \times \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(n-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(n-1) & R(n-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

а  $R(n)$  – ковариационная функция временных интервалов с оценкой

$$R(i) \cong R^{(m)}(i) = \frac{1}{n} \sum_{\ell=i+1}^n f_a(\ell) f_a(\ell-i). \quad (7)$$

Для определения качества прогнозирования трафика предлагаемым способом определим среднеквадратическую ошибку прогноза [5, 11]:

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 - [R(n) \dots R(1)] \cdot \begin{bmatrix} R(0) & R(1) & \dots & R(n-1) \\ R(1) & R(0) & \dots & R(n-2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R(n-1) & R(n-2) & \dots & R(0) \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} R(n) \\ R(n-1) \\ \dots \\ R(1) \end{bmatrix},$$

в которой можно использовать следующий асимптотический результат [7]:

$$R(\tau) \sim H(2H-1)\tau^{2H-2}.$$

После получения прогноза для  $\hat{f}_a(n+1)$  можно, расширив последовательность  $f_a(k)$ , получить прогноз значений  $\hat{f}_a(n+2)$  и т.д. Процесс будет продолжаться до тех пор, пока не будут сделаны требуемые  $N$  прогнозов.

**Оценка параметров метода.** Для оценки значений  $\tau_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , воспользуемся тем, что свойство ДВЗ сетевого трафика подразумевает относительно низкое уменьшение функции автокорреляции. Результаты моделирования показали, что предлагаемый интервал изменений значений  $\tau_i$ , при котором прогноз возможен, можно оценить в пределах от 0,02 до 0,1 секунды.

Определение величин параметров прогнозирования  $n$  и  $N$  предлагается проводить при помощи соответствующей имитационной модели для топологии, предложенной на рис. 1. В табл. 1 для различных величин  $n$  представлены средние значения относительной погрешности прогноза (число прогнозов модели – 200, число задействованных виртуальных соединений – от 20 до 50):

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{|\hat{f}(t) - f(t)|}{f(t)}.$$

Увеличение значения  $n$  приводит к уменьшению относительной ошибки прогнозирования, т.е. результат прогнозирования точнее. При  $n \geq 20$  точность прогнозирования изменяется незначительно, что позволяет определить значение параметра  $n = 20$ , как рационального для предложенного метода прогноза.

Таблица 1

Относительная погрешность прогноза

$n$	5	10	15	20	30	40	50
ошибка, %	15,1	11,6	9,3	7,7	7,5	7,5	7,4

Результаты моделирования для определения требуемого значения параметра  $N$  при выбранном параметре  $n$  приведены в табл. 2.

Таблица 2

Относительная погрешность предсказания для различных значений  $N$

$N$	$n$	$2n$	$3n$	$4n$	$5n$	$6n$	$7n$	$8n$
ошибка, %	7,8	8,5	9,1	9,8	10,6	11,8	15,4	19,8

При значительном превышении значения параметра  $n$ , относительная погрешность прогноза резко возрастает и достигает значений более 15 %, т.е. в данном случае желательно ограничиться значением  $N = 6n$ . Механизм такого прогнозирования заключается в том, что вначале отправляется  $n+1$  близко расположенных пробных пакетов и делается заключение о магистральном трафике в следующем  $6 \cdot n \cdot t$  периоде и так далее.

**Сравнение с прогнозами магистрального трафика, основанными на фрактальных методах.** Для предложенной топологии критического участка с магистральным трафиком, обладающим свойством ДВЗ, были рассмотрены следующие фрактальные модели, получившие наибольшее распространение: модель фрактального броуновского движения (ФБД) и фрактальная модель ARIMA (FARIMA). Сравнение прогнозов, основанных на использовании этих моделей, с прогнозом, полученным в соответствии с предложенным методом, проводилось по нижеперечисленным показателям.

1. **Точность.** На рис. 4 представлены зависимости относительных среднеквадратических погрешностей от величины показателя Херста  $H$ . Анализ предложенного графика показывает, что при значениях  $H \leq 0,85$  все рассматриваемые кривые расположены близко друг другу, а при  $H > 0,85$  кривая, соответствующая модели FARIMA, достаточно сильно отличается от остальных. Однако, анализ реального трафика указывает на то, что значение параметра Херста редко превышает 0,85, т.е. все три модели одинаково хорошо подходят для прогнозирования трафика на критическом участке [8].

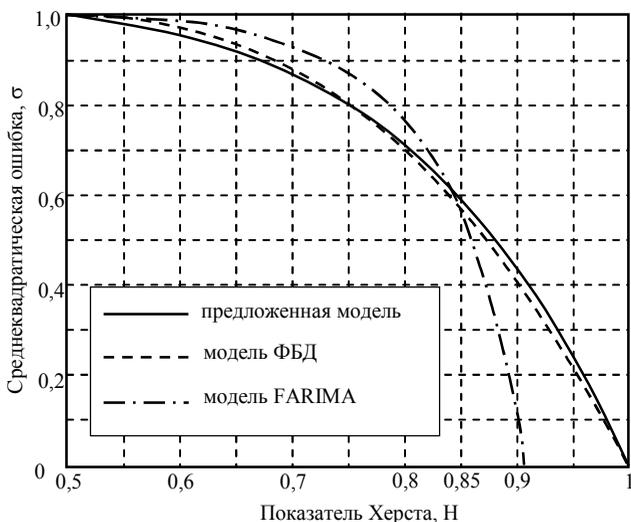


Рис. 4. Сравнение среднеквадратических ошибок прогноза

2. **Реализация.** Прогноз, основанный на фрактальной модели ФБД, использует оценку значения показателя Херста, получаемую в оперативном режиме, а на модели FARIMA – аналогичную оценку и также в оперативном режиме [3]. Получение данных оценок в рамках упомянутых моделей требует значительных вычислительных затрат, т.е. реализация прогнозов, основанных на моделях ФБД и FARIMA – достаточно трудоемкий процесс. Предлагаемый метод не требует проведения оценки показателя Херста, однако, для его функционирования необходимо вычисление ковариационной функции временных интервалов согласно (7) для прогнозируемого трафика. В настоящее время существуют быстрые алгоритмы [3, 7], которые позволяют проводить эти вычисления в режиме реального времени с незначительными затратами вычислительного ресурса.

**Возможность применения метода.** Для проверки возможности прогноза с помощью предложенного метода было проведено исследование показателя Херста для реального трафика, проходящего через критический участок (рис. 5, а). Оценка изменения значений показателя Херста приведена на рис. 5, б. Как видно из графика рис. 5, б, исследуемый трафик проявляет ДВЗ, а величина показателя Херста для данной, достаточно характерной реализации, лежит в интервале  $0,6 \leq H \leq 0,8$ , что, во-первых, хорошо согласуется с требованиями, предъявляемыми к предлагаемому способу прогноза, а, во-вторых, соответствует аналогичным измерениям [1, 3, 8].

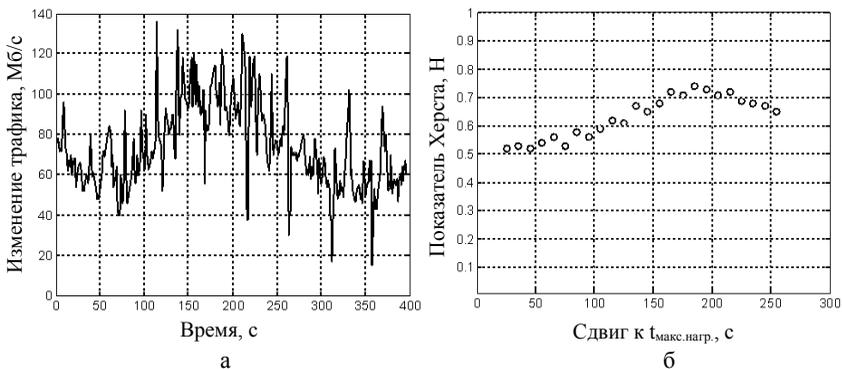


Рис. 5. Расчет для реального трафика (а) показателя Херста (б)

**Выводы.** Для критического участка магистрали мультисервисной сети предложен метод прогноза фрактального трафика, не требующий оперативного расчета показателя Херста. Предложенный метод прогноза делает хорошие оценки среднего значения магистрального трафика, не перегружая сеть служебной информацией. В дальнейших исследованиях в данном направлении предполагается разработать способ адаптивного изменения базовых параметров предложенного метода.

**Список литературы:** 1. Мультисервисные сети / В.В. Величко, Е.А. Субботин, В.П. Шувалов, А.Ф. Ярославцев. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 592 с. 2. Кучук Г.А., Гахов Р.П., Пашиев А.А. Управление ресурсами инфотелекоммуникаций. – М.: Физматлит, 2006. – 220 с. 3. Leland W.E., Taqqu M.S., Willinger W. On the self-similar nature of Ethernet traffic // IEEE/ACM Transactions of Networking. – 1994. – 2 (1). – P. 1-15. 4. Trajkovic L., Niedhardt A. Internet traffic prediction // Centre for Systems Science, Simon Fraser University. – Mar. 2000. – Vol. 12. – Is. 1. – P. 123-131. 5. Фрактальный анализ процессов, структур и сигналов: Коллективная монография / Г.А. Кучук, А.А. Можжаев, Р.Э. Пащенко, К.М. Руккас и др. – Х.: ЭкоПерспектива, 2006. – 360 с. 6. Кучук Г.А., Можжаев О.О., Воробйов О.В. Метод прогнозування фрактального трафіка // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 6 (18). – С. 181-188. 7. Koucheryavy Y., Harju J. A novel approach for self-similar traffic prediction // Proc. of the St.-P., Russia. – 2002. – P. 172-179. 8. Кучук Г.А., Можжаев А.А. Прогнозирование трафика для управления перегрузками интегрированной телекоммуникационной сети // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2007. – № 6 (18). – С. 261-271. 9. Можжаев О.О. Моделирование трафіка телекомунікаційних мереж на базі масштабної інваріантності // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 6 (12). – С. 79-82. 10. Кучук Г.А., Можжаев О.О., Воробйов О.В. Анализ та моделі самоподібного трафіка // Авіаціонно-косміческая техника и технология. – 2006. – № 9 (35). – С. 173-180. 11. Можжаев А.А. Оценка достоверности определения параметров телекоммуникационного трафика // Системи обробки інформації. – Х.: ХУ ПС, 2006. – Вип. 9 (58). – С. 53-55. 12. Кучук Г.А. Управління трафіком мультисервісної розподіленої телекомунікаційної мережі // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НіУ, 2007. – Вип. 2. – С. 18-27.

Поступила в редакцию 30.03.2007

**С.Ю. ГАВРИЛЕНКО**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
**А.М. ФИЛОНЕНКО**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
**Р.Ю. КОМАРЕВ**, НТУ "ХПИ"

## ОПТИМИЗАЦИЯ ОРГАНИЗАЦИИ ТАБЛИЦ СИМВОЛОВ ПРИ ПОСТРОЕНИИ КОМПИЛЯТОРОВ

Розглянуто основні типи організації таблиць символів при побудові компіляторів. Наведено характеристику видів таблиць символів та методів оптимізації по швидкодії та за обсягом. Запропонована модель, яка використовує підпорядковані таблиці, що дозволяє відокремити глобальні та локальні ідентифікатори і таким чином зменшити час доступу до ідентифікатора та також зменшити ймовірність колізій.

The basic types of the organization of tables of symbols are considered at construction of compilers. The characteristic of kinds of tables of symbols and methods of optimization on speed and on volume is resulted. The model which uses the subordinated tables is offered, resolving to separate global and local identifiers and thus to reduce time of access to the identifier and also to reduce probability of collisions.

**Постановка проблемы.** Несмотря на широкое разнообразие языков программирования и интегрированных сред программирования, оптимизация работы программ-компиляторов остается актуальной темой дискуссий для многих разработчиков программного обеспечения.

Проверка правильности семантики и генерация кода требуют знания характеристик идентификаторов, используемых в программе на исходном языке. Эти характеристики выясняются из описаний и из того, как идентификаторы используются в программе, и накапливаются в таблице символов или в списке идентификаторов. Эффективность взаимодействия компилятора с таблицей символов напрямую зависит от способа организации, построения и метода поиска данных. То есть перед нами стоит конкретная проблема – проблема организации таблиц символов.

**Анализ литературы.** Таблицы всех типов имеют общий вид, приведенный на рис. 1, где слева перечисляются аргументы, а справа – соответствующие значения [1, 2, 3].

	Аргумент	Значение
Элемент 1		
Элемент 2		
...		
Элемент N		

Рис. 1. Общий вид таблиц символов

Каждый элемент обычно занимает в машине более одного слова. Если элемент занимает  $k$  слов и нужно хранить  $N$  элементов, то необходимо иметь  $k*N$  слов памяти. Расположить информацию можно двумя способами:

1. Каждый элемент в  $k$  последовательных слов и иметь таблицу из  $k*N$  слов.

2. Иметь  $k$  таблиц, например,  $T_1, T_2, \dots, T_k$ , каждая из  $N$  слов. Весь  $i$ -й элемент при этом будет находиться в словах  $T_{1i}, \dots, T_{ki}$ .

В нашем частном случае аргументами таблицы являются символы или идентификаторы, а значениями – их характеристики. Так как число литер в идентификаторе непостоянно, в аргументе часто помещают вместо самого идентификатора указатель на идентификатор. Это сохраняет фиксированный размер аргумента.

Идентификаторы хранятся в специальном списке строк. Число литер в каждом идентификаторе может храниться как часть аргумента или в списке идентификаторов прямо перед идентификатором. Оба способа, на примере таблицы, содержащей элементы для идентификаторов  $I, MAX$ , и  $J$ , показаны на рис. 2

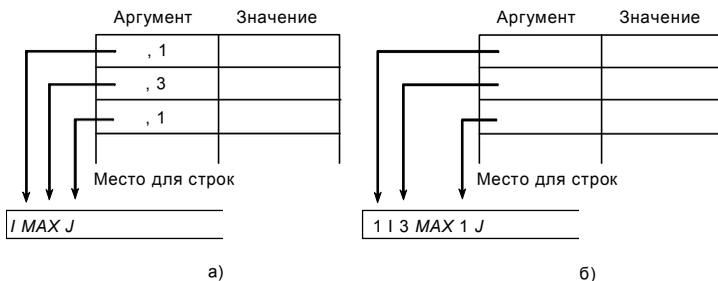


Рис. 2. Способы запоминания аргументов

Так как при компиляции на процесс поиска необходимых данных уходит много времени, важно выбрать такую организацию таблиц, которая допускала бы эффективный поиск.

**Неупорядоченные и упорядоченные таблицы.** Простейший способ организации таблицы состоит в том, чтобы добавлять элементы для аргументов в порядке их поступления, без каких-либо попыток упорядочения [3 – 6]. Поиск в таком случае требует сравнения с каждым элементом таблицы, пока не будет найден подходящий.

Поиск может быть выполнен более эффективно, если элементы таблицы упорядочены (отсортированы) согласно некоторому естественному порядку аргументов. В нашем случае, где аргументами являются строки литер, наиболее естественным является упорядочение, порождаемое внутренним представлением строк литер. Обычно оно совпадает с лексикографическим порядком. Так, строки  $A, AB, ABC, AC, BB$  расположены в возрастающем

порядке. Эффективным методом поиска в упорядоченном списке из  $n$  элементов является так называемый бинарный или логарифмический поиск.

**Хеш-адресация** – это метод преобразования символа в индекс элемента в таблице (элементам присваиваются номера  $0, 1, 2, \dots, N - 1$ , если таблица состоит из  $N$  элементов) [7]. Простой хеш-функцией является внутреннее представление первой буквы символа. Так, если двоичное представление  $A$  есть  $11000001$ , то результатом хеширования символа  $ABE$  будет код  $11000001$  ( $C1$  в шестнадцатеричной системе счисления). Начальным индексом, с которого начинается поиск элемента для аргумента  $ABE$ , будет  $11000001$ .

Пример хеш-адресации для идентификаторов  $ABE$ ,  $B$  и  $I$  показано на рис. 3.

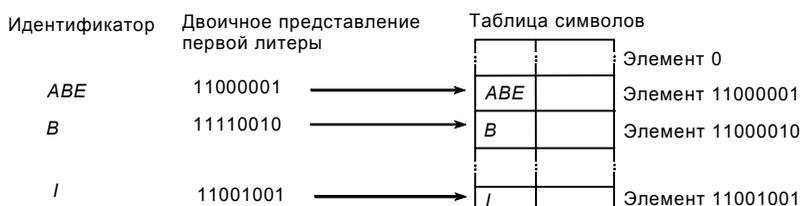


Рис. 3. Хеш-адресация

**Таблицы символов, имеющие структуру дерева.** В этом методе для упорядочения элементов используется бинарное дерево, в котором к каждому узлу может быть "повешено" не более двух поддеревьев. Каждый узел дерева представляет собой заполненный элемент таблицы, причем корневой узел является первым элементом [6].

**Таблицы символов, имеющие блочную структуру.** Некоторые языки имеют структуру вложенных блоков и процедур [8]. Один и тот же идентификатор может быть описан и использован много раз в различных блоках и процедурах, и каждое такое описание должно иметь единственный, связанный с ним элемент в таблице символов. При использовании идентификатора возникает проблема, как найти соответствующий ему элемент в таблице символов.

Правило нахождения соответствующего идентификатору описания состоит в том, чтобы сначала просмотреть текущий блок (в котором идентификатор используется), затем объемлющий блок и т. д. до тех пор, пока не будет найдено описание данного идентификатора. Мы можем осуществить такой поиск, храня все элементы таблицы для каждого блока в смежных ячейках и используя список блоков.

**Цель статьи.** Оптимизация компилятора за счет использования подчиненных таблиц, что позволяет отделить глобальные и локальные

идентификаторы и таким образом уменьшить время доступа к идентификаторам и количество коллизий.

Проанализировав основные виды организации таблиц символов при построении компиляторов, можно предложить новый метод организации таблиц символов с использованием подчиненных таблиц. Основная мысль предлагаемой конструкции и методов работы с ней заключается в том, чтобы объединить положительные качества всех, рассмотренных ранее, стандартных методов.

На рис. 4 изображено использование одной основной таблицы для записи глобальных идентификаторов, и подчиненных таблиц для локальных идентификаторов. При этом доступ к данным основной и подчиненных таблиц осуществляется посредством хеш-адресации. Таким образом, мы объединяем метод хеш-адресации, структуру типа дерево и блочную структуру.

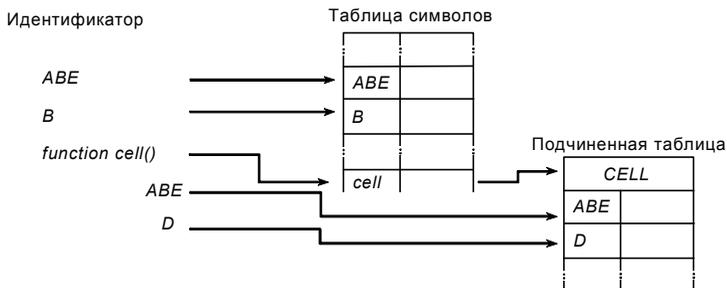


Рис. 4. Использование подчиненных таблиц

Сравним различные методы работы с таблицами по времени поиска. Мы будем проводить сравнение в терминах ожидаемого числа  $E$  сравнений аргументов, которые нужно выполнить, чтобы найти данный символ. Это число, зависящее от коэффициента загрузки  $lf$  (*load factor*) таблицы в данный момент, представляет собой отношение текущего числа элементов  $n$  к максимально возможному числу элементов  $N$  (1)

$$lf = n / N. \quad (1)$$

Благодаря использованию хеш-адресации в пределах таблицы время поиска практически совпадает со временем, затраченным на хеширование. Так мы получаем огромную экономию по сравнению со временем поиска по неупорядоченной таблице из  $n$  позиций,

$$E = n / 2 \quad (2)$$

или даже по сравнению с временем поиска по упорядоченной таблице

$$E_{\max} = 1 + \log_2 n. \quad (3)$$

Одновременно с этим, создавая подчиненные таблицы для записи локальных переменных, мы значительно уменьшаем вероятность коллизий, возникающих в результате использования программистом одинаковых идентификаторов в основной программе и подпрограммах. Также, за счет малой глубины вложенности подчиненных таблиц, удалось убрать лишние расходы времени на переход от одного узла к другому, что неизбежно происходит при организации таблицы по типу "дерево". И, наконец, нам удалось избежать избыточного описания нахождения идентификатора в таблице, как было при использовании блочной структуры.

Предложенный алгоритм с учетом математических выкладок апробировался на четырех видах задач:

1) программный код объемом в 2 "страницы" с несколькими простыми функциями;

2) программный код объемом в 10 страниц с большим числом простых функций;

3) программный код объемом в 10 страниц с использованием сложных объектов и активным взаимодействием между функциями;

4) программный код объемом в 50 страниц с использованием сложных объектов, большим числом функций и их активным взаимодействием между собой.

Все виды программных кодов последовательно запускали на специально разработанных для этих целей компиляторах. В итоге получили достоверную статистику по скорости обработки данных разного типа и объема компиляторами с различной организацией таблиц символов.

Таблица

Скорость обработки данных

Скорость обработки апробированных задач			
Задача № 1	Задача № 2	Задача № 3	Задача № 4
Одноуровневая таблица с использованием хеш-адресации			
0,2 секунды	1,2 секунды	2,5 секунды	8 секунд
Организация типа дерево			
0,2 секунды	2,2 секунды	4,5 секунды	19 секунд
Блочная структура			
0,7 секунды	4,2 секунды	5,5 секунды	25 секунд
Организация с использованием подчиненных таблиц			
0,3 секунды	1,7 секунды	2,5 секунды	6 секунд

**Выводы.** Данные, полученные в результате апробации, свидетельствуют о целесообразности использования предлагаемого метода для идентификации сложных объектов, имеющих объемный исходный код. Предложенный метод может быть применен в научных исследованиях, в коммерческих целях, а также широким кругом пользователей, занимающихся увеличением скорости обработки данных разного типа и объема.

**Список литературы:** 1. Ульман Джеффри, Ахо Альфред, Сети Рави. Компиляторы: принципы, технологии и инструменты. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. – 768 с. 2. Кнут Д. Искусство программирования. Т. 1. Основные алгоритмы. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. – 823 с. 3. Грис Д. Конструирование компиляторов для цифровых вычислительных машин. – М.: Мир, 1975. – 327 с. 4. Карпов В.Э. Классическая теория компиляторов. – М.: МГИЭТ, 2003. – 61 с. 5. Рэй Дункан. Оптимизация программ на ассемблере. PC Magazine/Russian Edition. – 1992. – № 1. – Р. 102–117. 6. Хантер Р. Основные концепции компиляторов. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2002. – 256 с. 7. Вайнгартен Ф. Трансляция языков программирования. – М.: Мир, 1977. – 190 с. 8. Левитин В., Ананий В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 576 с.

*Поступила в редакцию 20.04.2007*

*Є.М. ГРАБОВСЬКИЙ*, канд. екон. наук, ХНЕУ (м. Харків)

## **ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МУЛЬТИМЕДІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ**

Стаття присвячена питанням виділення принципів побудови мультимедійних інформаційних систем електронної комерції. Аналізуються фактори формування структури технологічних рішень в Інтернет і методи моделювання бізнесу в рамках CASE-технології.

Article is devoted to questions of allocation of principles construction of multimedia information systems of electronic commerce. Factors of structure formation of technological decisions on the Internet and CASE methods business modeling are analyzed.

**Постановка проблеми.** На сьогодні відбувається інтенсивне розширення областей використання мережі Інтернет внаслідок важливих переваг, що надаються нею в різних аспектах діяльності. В особливості це стосується комерційних транзакцій, для яких Мережа забезпечує великі географічні масштаби, високу швидкість і безперервність роботи. В таких умовах здійснення комерційних угод в Інтернет повинно підтримуватися відповідними мультимедійними інформаційними системами з певними принципами їхньої побудови та функціонування.

Задача виділення основних принципів побудови мультимедійних інформаційних систем електронної комерції вирішується на Україні в рамках пріоритетного науково-технічного напрямку "Нові комп'ютерні засоби та технології інформатизації суспільства".

**Аналіз літератури.** У дослідженнях [1 – 7] аналізується поняття мультимедійної інформаційної системи, виділяються особливості використання інформаційних систем у електронній комерції, пропонуються технологічні рішення, що становлять концептуальну й технологічну основу комерційних транзакцій в мережі Інтернет. Однак відсутня цілісна методика, що дозволяє формувати та обґрунтовувати основні принципи побудови мультимедійних інформаційних систем торгівельної діяльності в Мережі.

**Мета статті** – виділення основних принципів побудови мультимедійних інформаційних систем електронної комерції та систематизація основних факторів формування структури технологічних рішень, що визначають сформовані принципи.

**Принципи формування мультимедійних технологічних рішень електронної комерції.** Розвиток електронної комерції в сучасних умовах постіндустріальної економіки вимагає реалізації мультимедійних засобів підтримки з певними особливостями функціональної структури та побудови.

Формування основних принципів побудови мультимедійних інформаційних систем (МІС) електронної комерції слід виконувати на основі аналізу факторів, наведених в табл. 1.

Таблиця 1

Обґрунтування основних факторів, що визначають перелік принципів побудови мультимедійних інформаційних систем е-комерції

Фактори	Обґрунтування необхідності виділення фактору	Особливості врахування фактору в МІС електронної комерції
Функціональні особливості мережі Інтернет.	Інтернет формує інфраструктуру електронної комерції й, отже мережеву основу МІС.	Побудова МІС має здійснюватися на основі мережевої технології Інтернет/Інтранет/Екстра-нет.
Принципи побудови сховищ даних.	Сховища даних виступають логічно інтегрованим джерелом інформації для МІС електронної комерції.	Забезпечення предметної орієнтації сховищ на цільові сегменти; інтеграція транзакційних даних з метою побудови єдиної глобальної схеми торговельних контактів в Мережі.
Реальний режим часу.	Потреба в оперативній релевантній інформації на поточний момент часу.	Формування активних баз даних електронних транзакцій, забезпечення паралельної обробки результативної інформації.
Інтенсивні комунікації в процесі управління електронними угодами.	Необхідність клієнтоорієнтованого підходу бізнесу в Інтернет, розширення географії комерційної діяльності до світового масштабу.	Організація системи зворотного зв'язку у вигляді форумів, відеоконференцій.

Врахування зазначених факторів та аналіз спеціалізованих літературних джерел [3, 4, 6, 8] дозволили сформувати основні принципи побудови мультимедійних інформаційних систем електронної комерції.

Принцип децентралізації. Має на увазі розподіл інформаційних ресурсів МІС між всіма філіями та підрозділами компанії. Даний принцип забезпечує підвищення ступені динамічності управління бізнесом в Мережі.

Принцип відповідності методів моделювання бізнесу комунікаційному середовищу інтернет-компанії. Використання методів моделювання бізнесу в рамках CASE-технології [7] передбачає обґрунтування змін організаційної структури в процесі розвитку електронної комерції, створення мережевих альянсів та співтовариств. Відповідно до цього при розробці МІС електронної комерції слід враховувати доцільність використання певних методів моделювання (табл. 2).

Особливості використання методів моделювання бізнесу при розробці МІС  
електронної комерції

Методи	Рівень B2C-, B2B- транзакцій	Рівень довгочасових електронних угод	Рівень мережевих співтовариств
Метод функціональної ієрархії	н	о	о
Метод аналізу станів	м	о	о
Метод діаграм потоків даних	о	о	н
Метод моделювання подій	о	м	м
Метод функціональної логіки	о	о	о

В табл. 2 прийняті наступні умовні позначення: о – обов'язкове використання; м – використання необов'язкове, але можливе; н – використання методу є небажаним.

Принцип агрегації даних. Даний принцип передбачає можливість вилучення операційних даних як "миттєвих знімків" з однієї або більше баз даних та інших джерел інформації, подальше здійснення послідовної деталізації та забезпечення гранулярності комерційної інформації. В процесі реалізації даного принципу слід запобігати виникненню наступних подій:

1) додаткове навантаження на операційну базу даних, що може створюватися в результаті виконання багаточисельних операцій вибірки та укрупнення даних, що призводить до зниження продуктивності на поточних операціях;

2) необґрунтоване підвищення об'єму необхідної пам'яті в сховищі даних для зберігання комерційної інформації про угоди в Інтернет, яка ніколи не буде використовуватися індивідуально.

Принцип активних компонент баз даних. Побудова мультимедійної інформаційної системи електронної комерції повинна передбачати відповідність створюваної системи правилу «подія-умова-дія», що сприятиме розширенню моделей обробки комерційних транзакцій в мережі Інтернет. Останнє, в свою чергу, забезпечить можливість виразу стратегічних і тактичних умов електронної комерції компанії більш перспективним декларативним чином, що припускає використання штучного інтелекту, наприклад механізму виводу "від фактів до цілі" (Forward Chaining). Такий механізм дозволяє слідування множині дій, заснованих на стратегічних

(тактичних) правилах бізнесу інтернет-компанії, та виведення деякого типу результату з ланцюжка можливих дій.

Принцип стандартизації. Даний принцип передбачає, по-перше, слідування в процесі розробки МІС електронної комерції специфікаціям Multimedia PC, JPEG, MPEG, MHEG, а по-друге, стандартним методологіям розробки додатків (наприклад, Microsoft Viewer), що дозволить забезпечити максимальну сумісність технологічної платформи компанії з відповідними рішеннями її стратегічних партнерів по електронній комерції.

Комплексне врахування запропонованих принципів є основою ефективної торгівельної марки компанії в Інтернет.

**Висновки.** Таким чином, у даному дослідженні знайшов свого відбиття аналіз побудови мультимедійних інформаційних систем сфери торгівельної діяльності в Інтернет.

Науковою новизною даної роботи є виділення основних принципів проектування мультимедійних інформаційних систем електронної комерції.

Практичне значення проведеного дослідження полягає у вдосконаленні архітектури технологічних рішень електронної комерції на основі врахування запропонованих принципів проектування.

Подальшим напрямком даного дослідження може виступати розроблення методики комплексної діагностики інформаційної системи інтернет-компанії.

**Список літератури:** 1. *Алтухов Л.А.* Создание инфраструктуры электронного бизнеса: гибкость, масштабируемость, надежность // Антикризисное управление. – 2001. – № 11. – С. 13–19. 2. *Буйдов А.В.* ИТ-стратегия: формула повышения эффективности бизнеса // Интеллидженд Энтэрпрайз. – 2003. – № 23. – С. 54–56. 3. *Васильев Д.С.* ASP-новые возможности интернет-бизнеса // Мир Internet. – 2001. – № 2. – С. 61–62 4. *Гейтс Б.* Бизнес со скоростью мысли. – М.: Открытые системы, 1999. – 360 с. 5. *Годин В.В.* ИТ и требования к менеджеру 21 века // Менеджмент в России и за рубежом. – 2001. – № 2. – С. 10–24. 6. *Ермошкин Н.В.* Информационные технологии и эффективность // Вестник связи. – 2004. – № 1. – С. 59–63. 7. *Маклаков С.В.* CASE-средства разработки информационных систем. – М.: ИнфраМ, 2005. – 234 с. 8. *Сергієнко І.В.* Про основні напрямки створення інтелектуальних інформаційних технологій // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2002. – № 1. – С. 38–44.

*Поступила в редакцію 23.03.2007*

*В.Д. ДАЛЕКА*, НТУ "ХПИ",  
*С.С. ВДОВИЧЕНКО*, НТУ "ХПИ"

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАМЯТИ КОМПЬЮТЕРА ПРИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ПРОГРАММИРОВАНИИ**

Розглянуто питання виділення, розподілення та використання фізичної (оперативної) пам'яті, що виділяється для екземплярів класу (об'єктів), у IBM PC сумісних комп'ютерах при реалізації основних ідей, принципів та концепцій об'єктно-орієнтованого програмування.

The questions of excretion, allocation and using of core quota for examples of class (object) on IBM PC conformant computers for realization of main ideas, principles and conceptions of object-oriented programming are studied.

**Постановка проблеми.** Вопросы распределения памяти компьютера для данных, объектов и структур различных форматов, а также поиска оптимальных алгоритмов их обработки были и остаются одними из наиболее важных в области высоких технологий, при компьютерной обработке данных. Знания принципов и механизмов распределения памяти необходимы при создании прикладных и системных программных продуктов, например, при разработке 2D и 3D-графики, СУБД, сетевых и Web-приложений, систем безопасности и ограничения доступа и т.п. Суть работы каждого программиста заключается в создании структур данных и разработке алгоритмов их обслуживания. И от того, насколько информирован программист о том как, когда и сколько памяти выделяется для переменных, зависит эффективность его работы и показатели качества его программного продукта в целом.

**Анализ литературы.** Успех и популярность любой структуры данных зависит от удобства и эффективности ее применения, что, в свою очередь, зависит от удачного проектирования самой структуры и алгоритмов ее обработки. Эти вопросы, особенно вопросы эффективности, очень тесно связаны с порядком выделения, распределения и использования оперативной памяти для данных той или иной структуры и программного кода, реализующего алгоритмы их обработки. В литературе [1, 2] достаточно подробно рассмотрены вопросы выделения и распределения памяти для данных базовых типов, статических и динамических структур, но при этом практически не рассматриваются такие типы данных как классы. Имеются, правда, электронные издания [3 – 6], в которых приведены фрагментарные данные по интересующему вопросу. Литература, посвященная аппаратным средствам IBM PC [8] описывает структуру самой оперативной памяти на физическом и логическом уровне без описания размещения в ней каких-либо структур данных.

**Цель статьи.** Исследовать выделение, распределение и использование

оперативной памяти IBM PC совместимых компьютеров при реализации основных идей, принципов и концепций объектно-ориентированного программирования (ООП). Рассмотреть распределение оперативной памяти для объектов простых классов, классов-наследников при многоуровневом и множественном наследовании. При этом основное внимание акцентировать на размещении в памяти статических и нестатических данных-членов (свойств) классов как ключевых структурных элементов. Такие же технологии и концепции как конструкторы и деструкторы, полиморфизм, виртуальное наследование в данной статье не рассматриваются.

Если вспомнить, что структуры данных и их оптимизация – это один из важнейших вопросов при разработке практически любого программного продукта, то актуальность и своевременность темы, затронутой в статье, становится очевидной.

**Выделение и распределение оперативной памяти компьютера для объектов при ООП.** Объектно-ориентированное программирование не является последним и самым современным стилем программирования, но этот стиль или технология является основной и базовой идеологией практически для всех современных технологий и стилей, применяющихся в мире программирования. Вышесказанное дает основание утверждать, что идеи и принципы ООП являются в данный момент наиболее распространенными в программировании, а, следовательно, знания принципов выделения и распределения памяти в ООП окажутся полезными как начинающим, так и опытным программистам.

Для проведения исследований был выбран язык программирования C++ как один из самых популярных языков, наиболее полно поддерживающий идеи, принципы и парадигмы ООП, сочетающий в себе средства осмысленной связи данных и алгоритмов, что дает возможность расширять и структурировать программы. Кроме того, что очень важно в данной работе, C++ обладает необычайной гибкостью при работе с памятью.

Как показывает практика, вопросы выделения памяти чрезвычайно чувствительны к изменению программного и аппаратного обеспечения, на котором они рассматриваются. Поэтому детали и тонкости реализации некоторых аспектов могут претерпевать значительных изменений не только при переходе от одной аппаратной платформы к другой, но и при смене операционных систем и средств разработки от разных производителей и даже при переходе от версии к версии компиляторов одного производителя. Следует отметить, что приводимые ниже данные получены на компьютере класса IBM PC, работающим под управлением ОС Microsoft Windows XP Professional SP2, в среде разработки Microsoft Visual Studio 98. Экспериментально проверялись объем и порядок выделения стековой и динамической памяти для данных-членов классов, ее распределение для объектов классов и были получены такие результаты.

1. *Объекты простых классов, не содержащие данные и функции («пустые» объекты)*), как оказалось, требуют 1 байт памяти. Несколько объектов одного или нескольких подобных классов размещаются и в стековой, и в динамической памяти в порядке убывания адресов ячеек памяти (табл. 1).

Таблица 1

Стековая память			Динамическая память		
Имя	Адрес	Размер (байт)	Имя	Адрес	Размер (байт)
objClass1	0x0012FF7C	1	objClass1	0x00491EA0	1
objClass2	0x0012FF78	1	objClass2	0x00491E70	1
objClass3	0x0012FF74	1	objClass3	0x00491E50	1

На порядок расположения объектов не влияет порядок объявления их классов и то, в какой (локальной или глобальной) части программы они были объявлены. Объекты располагаются в том порядке, в котором они определены в программе. Объекты, размещенные в стековой памяти, располагаются на расстоянии 4 байта друг от друга, что является следствием оптимизации кода, активно используемой современными компиляторами.

2. *Объекты простых классов*, содержащие данные-члены базовых и интегрированных типов, вложенные объекты, указатели, как и предполагалось, требуют память, размер которой равен суммарному размеру всех его данных-членов, независимо от того, являются ли они открытыми, закрытыми или защищенными. Данные-члены располагаются в памяти, начиная с первого байта выделенной памяти в направлении возрастания адресов ячеек стековой или динамической памяти в том же порядке, в каком они описаны в объявлении класса (табл. 2).

Таблица 2

Данные классов		Объект класса cOwner		Дамп памяти	
cMember	cOwner	Адрес	Размер	Адрес	Контент
public: int int1 = 4; protected: int int2 = 5; private: int int3 = 6;	public: int int1 = 1; protected: int int2 = 2; cMember member; private: int int3 = 3;	0012FF68	24 байта	0012FF68 0012FF6C 0012FF70 0012FF74 0012FF78 0012FF7C	00000001 00000002 00000004 00000005 00000006 00000003

Таким образом, размер не наследуемого и не содержащего виртуальных функций объекта в общем случае равен суммарному размеру всех его данных-членов. При оптимизации кода компилятор может выделять для таких объектов дополнительную память.

3. *Статические данные-члены* (открытые, закрытые и защищенные) располагаются в отдельном сегменте памяти, как было отмечено в [7]. Они

принадлежат классу, но не принадлежат его экземпляру. Статические данные-члены размещаются в выделенной для них памяти подряд, в порядке увеличения адресов ячеек памяти (табл. 3).

Таблица 3

Распределение памяти для объектов простых классов со статическими данными

Данные классов			Дамп памяти для статических данных	
cMember	cOwner	Статические	Адрес	Контент
public: static int statm1; int mint1=1; protected: static int statm2; int mint2=2; private: static int statm3; int mint3=3;	public: static int stato1; int oint1 = 7; protected: static int stato2; int oint2 = 8; private: static int stato3; int int3 = 9; cMember member;	int cMember::statm1=4; int cMember::statm3=6; int cOwner::stato1=10; int cOwner::stato3=11; int cMember::statm2=5; int cOwner::stato2=12;	0047DDD0 0047DDD4 0047DDD8 0047DDDC 0047DDE0 0047DDE4	00000004 00000006 0000000a 0000000b 00000005 0000000c

При этом последовательность расположения данных определяется исключительно порядком их определения и инициализации за пределами объявления классов, и не зависит ни от порядка объявления самих классов, ни от порядка создания их объектов. Размер памяти для объекта класса cOwner составляет 24 байта.

**4. Простое наследование** (как открытое, так и закрытое) приводит к копированию всех открытых, закрытых и защищенных данных базового класса в производный класс. Данные базового класса размещаются вначале области памяти, выделенной для объекта производного класса, непосредственно перед данными, описанными в самом производном классе, и сохраняют свою первоначальную последовательность (табл. 4).

Таким образом, размер объекта производного класса определяется суммарным размером данных-членов базового и этого производного класса. В случае замещения данных базового класса в объект производного класса включаются как замещенная, так и замещающая версия этих данных, что отражается на его размере и структуре выделенной для него памяти.

**5. Многоуровневое наследование** приводит к копированию всех открытых, закрытых и защищенных данных из базовых классов в производный класс. При этом наследовании копирование данных производится последовательно, начиная от базового класса до производного через промежуточные, добавляя к данным-членам каждого предыдущего класса данные последующего (табл. 5).

Как показали эксперименты, при замещении данных-членов одного из классов, стоящих выше в иерархии наследования, в текущий и во все нижестоящие классы копируется как замещенная, так и замещающая копия

данного. В результате размер объекта класса, находящегося в конце цепочки наследования, равен сумме размеров всех данных-членов объявленных в каждом из вышестоящих классов, включая замещающие данные. Расположение данных-членов в памяти, выделенной для объекта производного класса, производится в направлении увеличения адресов памяти в порядке от базового класса вниз по иерархии до данного производного класса. Поэтому, данные, последнего производного класса оказываются наиболее удаленными от начала области памяти, выделенной для хранения его объекта.

Таблица 4

Распределение памяти для данных-членов объектов при простом наследовании

Данные классов		Объект класса cChild : cParent		Дамп памяти	
cParent	cChild	Адрес	Размер	Адрес	Контент
public: int pint1=1; protected: int pint2=2; private: int pint3=3;	public: int pint1=8; int int1=4; protected: int int2=5; private: int int3=6;	0012FF64	28 байт	0012FF64 0012FF68 0012FF6C 0012FF70 0012FF74 0012FF78 0012FF7C	00000001 00000002 00000003 00000008 00000004 00000005 00000006

Таблица 5

Размещение в памяти данных объектов при многоуровневом наследовании

Данные классов			Наследование	Объект класса cChild	
cBase	cParent	cChild		Адрес	Размер
public: int int1=1; protected: int int2=2; private: int int3=3;	public: int bint2=10; int pint1=4; protected: int pint2=5; private: int pint3=6;	public: int pint2=11; int int1=7; protected: int int2=8; private: int int3=9;	class cParent : public cBase  class cChild : public cParent	0012FF54	44 байта
Дамп памяти					
Адрес	Контент	Адрес	Контент	Адрес	Контент
0012FF54	00000001	0012FF64	00000004	0012FF74	00000007
0012FF58	00000002	0012FF68	00000005	0012FF78	00000008
0012FF5C	00000003	0012FF6C	00000006	0012FF7C	00000009
0012FF60	0000000a	0012FF70	0000000b		

**6. Множественное наследование** классов (открытое и закрытое) приводит к копированию в производный класс данных-членов всех базовых классов. При этом порядок их копирования и расположения в памяти, выделенной для объекта производного класса, определяется порядком описания наследования их классов, определенном при объявлении производного класса. Вопросы определения размеров объектов производных

классов и реализация в памяти замещаемых в производных классах данных-членов при множественном наследовании идентичны соответствующим вопросам при многоуровневом наследовании (табл. 6).

Таблица 6

Данные классов			Объект класса cChild		
cParent1	cParent2	cChild	Наследование	Адрес	Размер
public: int p1int1=1; protected: int p1int2=2; private: int p1int3=3;	public: int p2int1=4; protected: int p2int2=5; private: int p2int3=6;	public: int p2int2=10; int int1=7; protected: int int2=8; private: int int3=9;	class cChild : public cParent1, public cParent2	0012FF58	40 байт
Дамп памяти					
Адрес	Контент	Адрес	Контент	Адрес	Контент
0012FF58	00000001	0012FF68	00000005	0012FF78	00000008
0012FF5C	00000002	0012FF6C	00000006	0012FF7C	00000009
0012FF60	00000003	0012FF70	0000000a		
0012FF64	00000004	0012FF74	00000007		

При многоуровневом множественном наследовании правила выделения и распределения памяти определяются правилами для многоуровневого и множественного наследования, что отражается как на размере объектов, так и на структуре выделяемой для них памяти.

**Выводы.** В статье рассмотрены и систематизированы вопросы выделения и распределения памяти для объектов простых классов для статических и нестатических свойств, а также распределение памяти для данных-членов при построении основных видов наследования.

**Список литературы:** 1. Уильям Топп, Уильям Форд. Структуры данных в C++. – М.: ЗАО Издательство БИНОМ, 1999. – 816 с. 2. Фурман И.О., Краснобаев В.А., Далека В.Д. Модели та структури даних у системах автоматизованого керування: Підручник для ВНЗ. – К., 2004. – 253 с. 3. Amjad Z. ATL Under the Hood Part 1 <http://www.codeguru.com/cpp/comtech/atl/tutorials/article.php/c3607/>- 04/03/2002. 4. Amjad Z. ATL Under the Hood Part 2 <http://www.codeguru.com/cpp/comtech/atl/tutorials/article.php/c3545/>- 02/15/2002. 5. Amjad Z. ATL Under the Hood Part 3 <http://www.codeguru.com/cpp/comtech/atl/tutorials/article.php/c3549/>- 03/29/2002. 6. Amjad Z. ATL Under the Hood Part 5. <http://www.codeguru.com/cpp/comtech/atl/tutorials/article.php/c3547/>- 10/18/2002. 7. Шилд Герберт. Полный справочник по C++. – М.: Издательский дом Вильямс, 2004. – 800 с. 8. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия. – СПб.: Питер, 2006. – 1072 с.

Поступила в редакцию 20.04.2007

**А.Ф. ДАНИЛЕНКО**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
**А.А. ФИОФИЛОВА** (г. Харьков)

## АВТОМАТИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЯМР СПЕКТРОМЕТРОМ

Запропонована система автоматизації управління і збору даних для ЯМР спектрометра із застосуванням засобів обчислювальної техніки. Розроблена схема автоматизованого формування вхідної імпульсної послідовності для ЯМР спектрометрів на базі мікропроцесора, а також система обробки і аналізу одержаних даних за допомогою персонального комп'ютера.

Control automation system and system of gathering data for NMR spectrometer applying computer techniques are proposed. The scheme of automatic formation of the incoming impulse consistency for NMR spectrometers on the base of the microprocessor as well as the system of processing and analysis of the received data with the help of PC is worked out.

**Постановка проблемы.** Явление ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) было открыто Блохом и Перселлом в 1946 году и в настоящее время находит разнообразное применение в различных областях физики, химии, биологии и техники. ЯМР наблюдается в твердых, жидких и газообразных веществах и используется для измерения ядерных констант (спина ядра и магнитного момента), для определения структуры молекул и кристаллов, для изучения фазовых переходов в веществе [1].

В ЯМР экспериментах, как и при других спектральных исследованиях, информацию о веществе получают с помощью воздействия на скорость перехода микрочастиц из одного энергетического состояния на другое состояние. По закону сохранения энергии изменение энергетического состояния может происходить за счет либо поглощения, либо излучения электромагнитного поля. В данном случае, при переходе с изменением ориентации спина по полю на ориентацию против поля будет поглощаться электромагнитное поле радиочастотного диапазона. При обратных переходах поле будет излучаться.

Для экспериментального наблюдения за исследуемыми объектами используются магнитометры ЯМР. Работа всех ЯМР магнитометров основана на измерении тем или иным способом ларморовской частоты прецессии ядер в магнитном поле, связанной с индукцией поля  $B$  через гиромагнитное отношение  $\gamma$ , являющееся свойством данного типа ядер:

$$\omega = \gamma \cdot B . \quad (1)$$

Методика заключается в воздействии на ядра, содержащиеся в образце, радиочастотными импульсами с последующей регистрацией либо сигнала спада свободной индукции (ССИ), либо сигнала "спинового эха". Длительность сигналов, оказывающая большое влияние на точность измерений поля, определяется двумя факторами: поперечной релаксацией, обусловленной взаимодействием спинов ядер друг с другом и с решеткой, и

разбросом частот прецессии ядер в образце, вызванным неоднородностью магнитного поля [2, 3].

Процесс измерения времен релаксации требует использования когерентных многоимпульсных последовательностей, где импульсы должны иметь прямоугольную форму и соответствующие конкретному эксперименту длительность и период. Важным параметром магнитометра является "мертвое время" – промежуток времени между импульсами, необходимое приемному тракту магнитометра для восстановления своей способности принимать и усиливать сигналы ЯМР. Если интервал между импульсами будет больше или меньше этого времени, то результат измерения амплитуды эхо-сигнала будет неверным [4]. В настоящее время в большинстве установок приходится практически вручную настраивать генераторы импульсов для получения такой входной импульсной последовательности.

**Анализ литературы.** Для получения импульсных последовательностей используют синтезаторы частоты, которые включают в себя генераторы прямоугольных импульсов. В научно-исследовательских комплексах ЯМР наибольшее распространение получили синтезаторы частоты на основе фазовой подстройки частоты (ФАПЧ). Типовые синтезаторы, использующие этот метод синтеза, позволяют получить сигнал с частотой до нескольких сотен мегагерц и обеспечивают высокую спектральную чистоту сигнала, необходимую для аппаратуры ЯМР. Среди недостатков синтезаторов на основе ФАПЧ наиболее существенными являются: низкая скорость перестройки частоты, узкий диапазон синтезируемых частот, сложность изготовления и настройки. Поэтому в последнее время все большее распространение получает другой метод синтеза частот – прямой цифровой синтез (Direct Digital Synthesis). Суть данного метода заключается в формировании в определенные дискретные моменты времени цифрового кода, соответствующего амплитуде синусоидального сигнала в данный момент времени, и преобразовании цифрового кода с помощью цифро-аналогового преобразователя в аналоговую форму [5].

Микросхемы синтезатора на основе метода прямого синтеза получили широкое распространение в современных установках ЯМР. Такие микросхемы, сопряженные с шиной VME, позволяют с помощью программного интерфейса выполнять следующие функции: в режиме возбуждения задавать частоту радиочастотных импульсов возбуждения; в режиме приема создавать ортогональный сигнал с частотой ядерного магнитного резонанса для квадратурного детектора [6].

**Цель работы.** Разработать схему автоматизированного формирования входной импульсной последовательности для ЯМР спектрометров на базе микропроцессора, а так же систему приема и обработки ответных сигналов.

**Решение задачи.** Связь между величиной измеряемого сигнала и параметрами измерителя имеет вид:

$$A_i = A_0 \exp((-2/T_2) \cdot T), \quad (2)$$

где  $A_i$  – величина измеряемого сигнала;  $A_0$  – величина, определяемая свойствами исследуемого образца;  $T_2$  – время спин-спиновой релаксации,  $T$  – интервал между входными импульсами [7].

На рис. 1 приведена схема формирования входной импульсной последовательности для ЯМР и реакции ССИ. Важным параметром, помимо интервала между импульсами, является закон убывания заднего фронта первого импульса, он должен быть экспоненциальным.

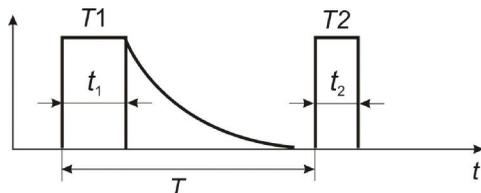


Рис. 1. Схема входной импульсной последовательности спектрометра ЯМР

Для формирования такой импульсной последовательности разработана схема, представленная на рис. 2. Сформированные первый и второй импульсы с заданной длительностью с помощью синтезатора частоты подаются на вход микропроцессора и записываются в его память.

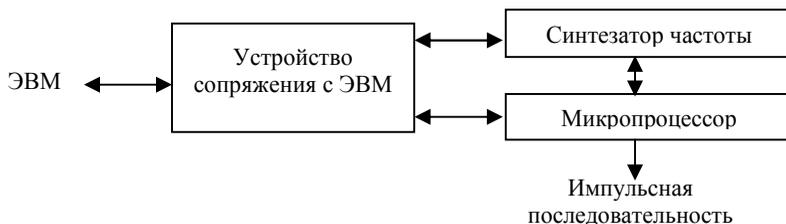


Рис. 2. Схема формирования входной импульсной последовательности спектрометра ЯМР

При проведении исследования микропроцессор регистрирует ССИ. Характер его убывания и закон изменения определяет необходимое расстояние между импульсами длительностью  $t_1$  и  $t_2$ . Затем на выходе микропроцессора формируется необходимая импульсная последовательность по вычисленным параметрам. Для оценки величины  $T$  используется параметр, получаемый из анализа характера спада ССИ. Характер его убывания и закон изменения входного импульса определяется последовательным сравнением нормированных значений импульса с шаблонными значениями для заданных отсчетов. С целью упрощения анализа рассчитаны и определены шаблоны различных функций и помещены в память микропроцессора.

Для анализа и обработки полученных данных от установки сигнал с датчиков ЯМР с частотой свободной прецессии ядер и амплитудой от нескольких микровольт поступает в предусилитель, а затем и в усилитель. Предусилитель расположен на минимально возможном расстоянии от датчика, каждый датчик имеет свой предусилитель, так как усилить сигнал в непосредственной близости от датчика очень важно, поскольку это предотвращает потери в отношении сигнала к шуму, вызванные как затуханием в кабеле, так и возможными наводками на него. После усиления частота сигнала переводится в низкочастотную область, затем сигнал преобразовывается с помощью АЦП в массивы цифровых кодов. Вся последующая обработка выполняется в цифровом виде во внешней ЭВМ с помощью специализированных программных пакетов. Полный цикл измерения включает в себя две стадии: стадию накопления сигнала и стадию обработки. На стадии накопления осуществляется суммирование массивов сигналов, каждый из которых получен в течение одного элементарного цикла, для повышения отношения сигнала к шуму. В результате накопления и усреднения сигнала отношение сигнала к шуму увеличивается и выполняется последующая цифровая обработка полученного сигнала [8].

**Выводы.** Предложена схема автоматизированного формирования входной импульсной последовательности для ЯМР спектрометра на базе микропроцессора. Система позволяет оптимизировать момент начала появления импульса  $T_2$ , что обеспечивает получение максимальной амплитуды сигнала "спинового эха". Применение микропроцессора позволяет значительно снизить требования к персональному компьютеру по быстродействию.

**Список литературы:** 1. Эрст Р., Боденхаузен Дж. ЯМР в одном и двух измерениях. – М.: Мир, 2000. – 711 с. 2. Пивоваров П.П. Теоретична технологія продукції громадянського харчування. – Харків, 2000. – 116 с. 3. Олсон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации процесса управления. – СПб.: Невский диалект, 2002. – 254 с. 4. Borovikov V.M., Fedurin M.G., Karpov V.G. Precise NMR measurement and stabilization system of magnetic field // Nucl. Instr. and Methods in Physics research. – 2001. – 468 p. 5. Ридико Л. Компоненты и технологии. – М.: Мир, 2001. – 104 с. 6. Шубин Е.И. Широкополосный синтезатор частоты прямого синтеза в стандарте VME. – Новосибирск, 2002. – 153 с. 7. Феррар Т., Беккер Э. Импульсная и Фурье-спектроскопия ЯМР. – М.: Мир, 1973. – 164 с. 8. Карпов В.Г., Медведко А.С. Прецизионные магнитометры на основе ЯМР в стандарте VME. – Новосибирск: ИЯФ им. Будкера Г.И., 2004. – 55 с.

*Поступила в редакцию 30.03.2007*

*В.Д. ДМИТРИЕНКО*, д-р техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*И.П. ХАВИНА*, НТУ "ХПИ"

## **ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СЕТЬ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСПОЗНАВАНИЯ С НЕСКОЛЬКИМИ РЕШЕНИЯМИ**

Розробляється проблемно-орієнтована дискретна нейронна мережа адаптивної резонансної теорії для розв'язання задач розпізнавання з декількома рішеннями.

The specialized discrete neural network of the adaptive resonant theory for the decision of a problem of identification with several possible decisions is created.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Системы распознавания на основе нейронных сетей широко применяются для решения разнообразных задач во многих областях науки и техники. Многими авторами они рассматриваются как альтернатива классическим системам распознавания. В настоящее время известен целый ряд нейронных сетей, пригодных для разработки высокоэффективных систем распознавания [1 – 6]. Большой интерес к нейросетевым системам распознавания связан с тем, что они имеют ряд полезных свойств, которых часто трудно добиться с помощью других методов. В частности, речь идет об их универсальности, о возможности построения нейронных сетей под задачу, о возможности обучения на примерах, о самообучении и обобщении, распознавании новой информации, об использовании ассоциаций, о распознавании зашумленных изображений, возможности обработки данных различной природы и т.д. [1 – 8]. В тоже время существуют и определенные проблемы при разработке систем распознавания на основе нейронных сетей. В первую очередь, это связано с особенностью обучения большинства нейронных сетей, которая, за редким исключением, требует наличия всей исходной информации, поскольку обучение новому образу методом обратного распространения ошибки или генетическими алгоритмами, или другими методами требует, как правило, полного переобучения сети. То есть устройства распознавания на основе таких нейронных сетей нельзя (или весьма проблематично) использовать в сложных системах с существенной априорной неопределенностью, где принципиально необходимо обучение в процессе функционирования системы. Проблема стабильности – пластичности, то есть проблема восприятия новой информации при сохранении уже имеющейся, решена в немногих нейронных сетях, к числу которых относятся и дискретные нейронные сети адаптивной резонансной теории АРТ-1 [6 – 10]. Поэтому проблемы распознавания, в частности, режимов функционирования динамических объектов и адаптация системы распознавания в процессе эксплуатации могут решаться на основе нейросетей адаптивной резонансной теории (АРТ).

Второй недостаток систем распознавания на основе нейронных сетей, в том числе и сетей АРТ, – получение единственного решения даже в тех случаях, когда имеется два или более равноценных решения.

**Целью статьи** является разработка новой архитектуры и алгоритмов функционирования дискретных нейронных сетей адаптивной резонансной теории, позволяющих определять два или более равноценных решения в задачах распознавания.

**Архитектура и алгоритмы функционирования сети АРТ-1.** Архитектура нейронной сети АРТ-1 приведена на рисунке в прямоугольнике, нарисованном пунктирной линией. Основой архитектуры сети являются три слоя нейронов:

- слой чувствительных  $S$ -нейронов, воспринимающих входную информацию в виде черно-белых изображений или бинарных входных векторов;

- слой бинарных интерфейсных  $Z$ -нейронов;

- слой распознающих  $Y$ -нейронов.

Кроме этого имеются еще три управляющих нейрона:  $R$ ,  $G_1$  и  $G_2$ .

В любой момент времени нейроны  $S_i$  и  $Z_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ),  $G_1$  и  $G_2$  находятся в одном из двух состояний: 0 или 1.

Нейроны  $Y$ -слоя с помощью дополнительной нейронной сети, на рисунке не показанной, образуют слой конкурирующих нейронов. Каждый элемент  $Y_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ) распознающего слоя может находиться в одном из четырех состояний:

- активен, сеть АРТ-1 функционирует в режиме определения выходных сигналов нейронов распознающего слоя, выходной сигнал  $U_{\text{вых}Y_j}$  удовлетворяет условию  $0 \leq U_{\text{вых}Y_j} \leq 2$  и определяется выходными сигналами  $Z$ -элементов;

- активен,  $U_{\text{вых}Y_j} = 1$ , нейрон  $Y_j$  является победителем при текущем предъявлении входного изображения;

- неактивен,  $U_{\text{вых}Y_j} = 0$ , нейрон установлен в начальное состояние или проиграл соревнование с другими нейронами при текущем предъявлении входного изображения;

- заторможен,  $U_{\text{вых}Y_j} = -1$ , информация, хранящаяся в весах связей нейрона, не удовлетворяет текущему входному изображению по величине параметра сходства, поэтому нейрон исключен из соревнования.

Все связи нейронной сети АРТ-1 являются возбуждающими, за исключением связей от  $Y$ -элементов к нейрону  $G_1$  и от интерфейсных  $Z$ -элементов к нейрону  $R$ , которые передают тормозящие сигналы.

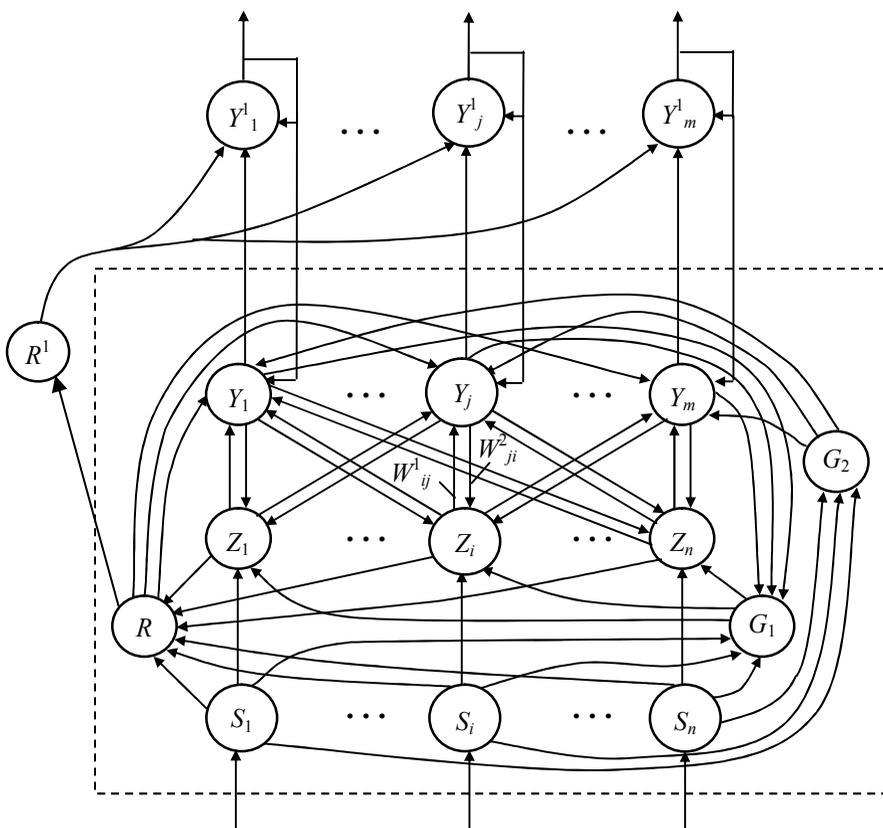


Рис. Архитектура дискретной нейронной сети АРТ для поиска нескольких решений в задачах распознавания

Эта сеть относит предъявленное изображение к одному из запомненных классов только в случае, если оно достаточно похоже на прототип этого класса, то есть на изображение, хранящееся в весах связей нейронной сети. Если такое свойство, установленное с помощью специального параметра сходства между двумя изображениями, имеет место в режиме обучения, то найденный прототип модифицируется, чтобы стать более похожим на предъявленное сети входное изображение. В режиме распознавания – параметры сети не меняются, а только фиксируется класс, к которому относится входное изображение. При отсутствии достаточного сходства между предъявленным изображением и прототипами всех имеющихся

классов, оно запоминается сетью как прототип нового класса. Это возможно благодаря тому, что информация об изображении-прототипе хранится в весах связей одного распознающего  $Y$ -нейрона, и сеть имеет значительное число неиспользуемых распознающих нейронов, избыток которых уменьшается по мере поступления новой входной информации. Наличие избыточных распознающих нейронов является принципиальной особенностью сетей АРТ, поскольку при их отсутствии новые входные изображения просто теряются. Таким образом, локальное хранение информации и наличие избыточных распознающих нейронов позволяет запоминать новую информацию (новые образы), не искажая или теряя уже имеющуюся [8 – 12].

Выход каждого бинарного нейрона  $S_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) входного слоя связан однонаправленной связью с единичным весовым коэффициентом с бинарным нейроном  $Z_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) интерфейсного слоя и входами управляющих нейронов  $R$ ,  $G_1$  и  $G_2$ . Каждый интерфейсный нейрон  $Z_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) связан со всеми элементами  $Y_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ) распознающего слоя и с управляющим нейроном  $R$ . Связи с весовыми коэффициентами  $W_{ij}^1$  ( $i = \overline{1, n}; j = \overline{1, m}$ ),  $0 \leq W_{ij}^1 \leq 1$  передают сигналы с выхода каждого  $Z$ -элемента на входы каждого  $Y$ -нейрона. Бинарные связи с весовыми коэффициентами  $W_{ji}^2$  ( $j = \overline{1, m}; i = \overline{1, n}$ ) связывают выход каждого распознающего нейрона с входом каждого интерфейсного нейрона. На входы каждого  $Z$ -элемента по связям с единичными весовыми коэффициентами поступает также сигнал с выхода бинарного управляющего нейрона  $G_1$ . Сигналы с выходов всех  $Z$ -элементов по связям с единичными весовыми коэффициентами поступают на входы управляющего нейрона  $R$ . Такими же связями выходы всех распознающих нейронов соединены со входами нейрона  $G_1$ , а их входы – с выходами управляющих нейронов  $G_2$  и  $R$ .

$Z$ - и  $Y$ -нейроны получают сигналы из трех источников:  $Z$ -нейроны – от управляющего нейрона  $G_1$  и от нейронов слоев  $S$  и  $Y$ ;  $Y$ -нейроны – от управляющих нейронов  $G_2$ ,  $R$  и от  $Z$ -нейронов.  $Z$ - и  $Y$ -элементы переходят в активное состояние по правилу "два из трех", то есть только при наличии сигналов из двух различных источников.

Для обучения дискретных нейронных сетей обычно используется метод быстрого обучения, при котором равновесные веса связей нейронов определяются за одно предъявление входного изображения [6 – 8, 11].

**Недостаток нейронной сети АРТ-1** поясним с помощью следующего примера.

*Пример.* Пусть  $n = 8$ , параметр сходства изображений равен 0,8 ( $p = 0,8$ ) и в весах связей нейронов  $Y_1$  и  $Y_2$  после режима быстрого обучения хранятся изображения  $S^1 = (1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 1)$ ,  $S^2 = (0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 0)$ , а веса связей сети

имеют следующие значения:  $W_{ij}^1 = 1/(1+n) = 0,111 \quad (i = \overline{1,8}; j = \overline{3,m})$ ;  
 $W_{i1}^1 = 0,333 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 8)$ ;  $W_{i1}^1 = 0 \quad (i = 5, 6, 7)$ ;  $W_{i2}^1 = 0,333 \quad (i = 2, 3, 4, 5, 7)$ ;  
 $W_{i2}^1 = 0 \quad (i = 1, 6, 8)$ ;  $W_{li}^2 = 1 \quad (i = 1, 2, 3, 4, 8)$ ;  $W_{li}^2 = 0 \quad (i = 5, 6, 7)$ ;  $W_{2i}^2 = 1$   
 $(i = 2, 3, 4, 5, 7)$ ;  $W_{2i}^2 = 0 \quad (i = 1, 6, 8)$ .

При подаче на вход сети изображения  $S^3 = (1,1,1,1,0,0,1,0)$  на входах распознающих нейронов будут следующие сигналы:  $U_{\text{вх}Y_1} = U_{\text{вх}Y_2} = 0,333 \cdot 5 = 1,665$ ;  $U_{\text{вх}Y_3} = U_{\text{вх}Y_4} = \dots = U_{\text{вх}Y_m} = 0,111 \cdot 5 = 0,555$ .

В силу алгоритма функционирования сети победителем станет нейрон  $Y_1$ , при этом параметр сходства  $p$  будет иметь значение  $p = \|U_{\text{вых}Z}\| / \|S^3\| = 4/5 = 0,8$ , где  $\|U_{\text{вых}Z}\|$  – норма вектора выходных сигналов нейронов слоя  $Z$ ;  $\|S^3\|$  – норма вектора  $S^3$ . Но точно такой же параметр сходства был бы получен и в случае, если бы нейроном-победителем стал распознающий элемент  $Y_2$ .

Таким образом, при предъявлении входного изображения сеть относит это изображение к первому близкому изображению, хранящемуся в весах связей распознающих  $Y$ -нейронов, и тем самым определяет принадлежность входного изображения к одному из классов. Остальные возможные варианты решения задачи распознавания теряются.

Для расширения возможностей дискретной нейронной сети АРТ и получения всех возможных вариантов решения задачи распознавания добавим к базовой архитектуре АРТ-1 еще один управляющий нейрон  $R^1$ , инвертирующий выходные сигналы нейрона  $R$ , и слой регистрирующих нейронов  $Y_j^1 \quad (j = \overline{1,m})$ . Каждый нейрон  $Y_j^1$  связан однонаправленной бинарной связью с соответствующим нейроном  $Y_j$ . Перед началом режима распознавания нейроны  $Y_j^1 \quad (j = \overline{1,m})$ , как и другие нейроны сети, переводятся в пассивное состояние по цепям связей, не показанным на рисунке. Нейроны  $Y_j^1 \quad (j = \overline{1,m})$  переходят в активное состояние по правилу "два из трех" – при наличии единичных сигналов на выходе нейронов  $Y_j$  и управляющего нейрона  $R^1$ . Единичный сигнал с выхода нейрона  $Y_j^1$  по цепи обратной связи фиксирует единичный выходной сигнал элемента  $Y_j^1$  и затормаживает нейрон-победитель  $Y_j$ . После этого в сети начинается поиск нового нейрона-победителя. Процесс поиска продолжается до тех пор, пока все распознающие распределенные нейроны не окажутся заторможенными. При этом на выходах

нейронов слоя  $Y^1$  может не оказаться ни одного единичного сигнала, так как входное изображение не похоже ни на одно из изображений, хранящихся в весах связей сети, либо на выходах  $Y^1$ -нейронов может быть один или несколько единичных сигналов, указывающих на принадлежность входного изображения к одному или нескольким классам изображений.

**Выводы.** Таким образом, разработана новая архитектура и алгоритмы функционирования дискретной нейронной сети адаптивной резонансной теории, позволяющие определять два или более равноценных решения (если они существуют) в задачах распознавания. Перспективой дальнейших исследований является разработка непрерывных нейронных сетей АРТ, позволяющих определять два или более равноценных решения в задачах распознавания.

**Список литературы:** 1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с. 2. Комашинский В.И., Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с. 3. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети: Теория и практика. – М.: Телеком, 2001. – 382 с. 4. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с. 5. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае. В 2-х томах. Том 2. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 464 с. 6. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p. 7. Дмитриенко В.Д., Распас Р.Д., Сырой А.М. Специализированное вычислительное устройство для распознавания динамических режимов объектов управления // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. – № 1. – С. 15 – 22. 8. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю. – Х.: ХФИ Транспорт Украины, 2003. – 248 с. 9. Grossberg S. Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance // Cognitive Science. – 1987. – Vol. 11. – P. 23 – 63. 10. Carpenter G.A., Grossberg S. A massively parallel architecture for selforganizing neural pattern recognition machine // Computing, Vision, Graphics and Image Processing. – 1987. – Vol. 37. – P. 54 – 115. 11. Дмитриенко В.Д., Корсунов Н.И. Основы теории нейронных сетей. – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с. 12. Дмитриенко В.Д., Носков В.И., Хавина И.П. Алгоритмы обучения дискретных сетей АРТ без адаптации весов связей распределенных распознающих нейронов // Вестник НТУ "ХПИ". – 2006. – № 23. – С. 35 – 48.

Поступила в редакцию 16.03.2007

*В.Д. ДМИТРИЕНКО*, д-р техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*А.Ю. ЗАКОВОРОТНЫЙ*, НТУ "ХПИ"

## **ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРИВОДА МЕТОДАМИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

Розглянуто геометричний метод лінеаризації зворотним зв'язком математичної моделі тягового асинхронного електропривода. Отримано математичну модель електропривода у формі Бруновського.

The geometrical method of linearization is considered by a feedback of mathematical model of the traction asynchronous electric drive. The mathematical model of the electric drive in the form of Brunovsky.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Трудности анализа и синтеза нелинейных систем управления общеизвестны. Поэтому в течении десятилетий ведется поиск более мощных теоретических средств, чем существующие, для решения фундаментальных проблем теории управления. Одним их таких средств является современная геометрия, в частности, геометрический подход к теории управления на основе теории групп и дифференциальной геометрии. Успехи этого подхода привели к интенсивной разработке нового научного направления – единой геометрической теории управления [1, 2]. Существенное преимущество нового научного направления состоит не только в создании математического аппарата, позволяющего описывать системы управления в пространствах состояний более общих, чем линейные пространства, что необходимо при решении целого ряда задач управления [1, 2], но и в реальной осуществимости эквивалентных преобразований нелинейных систем к линейным. Такие преобразования открывают возможности для использования при решении задач разработки нелинейных систем управления методов и средств теории линейных систем [1–3]. При этом линеаризация нелинейной системы выполняется не с помощью классического разложения в ряд Тейлора, а на основе использования линейной обратной связи в пространстве "вход – выход" или "вход – состояние". Теоретически линеаризация с помощью обратной связи позволяет преобразовать к линейному виду широкий класс нелинейных систем управления [1–7]. Однако практическое использование нового геометрического метода линеаризации для сколько-нибудь общих нелинейных систем выше третьего – четвертого порядка существенно затруднено из-за отсутствия конструктивных методов выполнения такой линеаризации.

В работах [2, 8] предпринимались попытки получить линейную модель асинхронного привода. В статье [8] два тяговых асинхронных двигателя дизель-поезда были заменены одним эквивалентным, математическая модель

которого описывается с помощью системы дифференциальных уравнений через потокосцепления статора и ротора:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\Psi_1}{dt} &= a_{11}\Psi_1 + a_{13}\Psi_3 + u_1; \\
 \frac{d\Psi_2}{dt} &= a_{22}\Psi_2 + a_{24}\Psi_4 + u_2; \\
 \frac{d\Psi_3}{dt} &= a_{31}\Psi_1 + a_{33}\Psi_3 + a_{345}\Psi_4\Omega; \\
 \frac{d\Psi_4}{dt} &= a_{42}\Psi_2 + a_{44}\Psi_4 + a_{435}\Psi_3\Omega; \\
 \frac{d\Omega}{dt} &= a_{514}\Psi_1\Psi_4 + a_{523}\Psi_2\Psi_3 - a_{51}\Omega - a_{52}\Omega^2,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $\Psi_1, \Psi_2, \Psi_3, \Psi_4$  – потокосцепления эквивалентного двигателя;  $a_{11}, a_{13}, \dots, a_{514}, a_{523}$  – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами эквивалентного асинхронного двигателя;  $u_1, u_2$  – статорные напряжения;  $a_{51}, a_{52}$  – постоянные коэффициенты, определяемые нагрузкой двигателя;  $\Omega$  – угловая скорость вращения эквивалентного двигателя.

Рассматриваемая модель (1) использовалась для получения линейного эквивалента нелинейной системы. Однако относительно большое число одночленов в правой части системы уравнений (1) привело к громоздким и трудно используемым промежуточным выражениям и конечному результату.

В работе [2] использовалась аналогичная модель асинхронного двигателя, в которой статорные потокосцепления с помощью известных выражений [9] были заменены на статорные токи. Эта модель содержит такое же число одночленов в правой части системы уравнений, что и модель (1), поэтому ее использование для получения линейного эквивалента также проблематично. В связи с этим была предпринята попытка [2] уменьшить общее число одночленов в правой части системы уравнений за счет перехода с помощью нелинейного преобразования из статической системы координат во вращающуюся  $d$ - $q$ -систему координат. Однако допущенные ошибки преобразования привели к появлению некорректной модели, в которой одна из полученных фазовых координат не входила ни в одно из четырех других уравнений ([2], пятое уравнение модели (1.476)).

В связи с этим **целью настоящей работы** является получение приемлемого для целей оптимизации асинхронного привода решения задачи линеаризации математической модели асинхронного двигателя с помощью обратной связи.

Математическую модель (1) в осях  $u$  и  $v$  с помощью известных выражений для токов статора [9]:

$$i_{us} = \frac{1}{\sigma L_s} (\Psi_{us} - k_r \Psi_{ur}); \quad i_{vs} = \frac{1}{\sigma L_s} (\Psi_{vs} - k_r \Psi_{vr}),$$

где  $i_{us}$ ,  $i_{vs}$  – статорные токи по осям  $u$  и  $v$ ;  $\sigma = 1 - k_r k_s = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  – полный коэффициент рассеяния;  $L_m$  – индуктивность контура намагничивания (взаимная индуктивность);  $L_s$ ,  $L_r$  – полная индуктивность соответственно статора и ротора;  $\Psi_{us}$ ,  $\Psi_{vs}$  – потокоцепления по осям  $u$  и  $v$  статора;  $k_s = \frac{L_m}{L_s}$ ,  $k_r = \frac{L_m}{L_r}$  – коэффициенты электромагнитной связи соответственно статора и ротора;  $\Psi_{ur}$ ,  $\Psi_{vr}$  – потокоцепления ротора по осям  $u$  и  $v$ , преобразуем к виду

$$\begin{aligned} \frac{di_{us}}{dt} &= \alpha \beta \Psi_{ur} - \gamma i_{us} + p \beta \Omega \Psi_{vr} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{us}; \\ \frac{di_{vs}}{dt} &= \alpha \beta \Psi_{vr} - \gamma i_{vs} - p \beta \Omega \Psi_{ur} + \frac{1}{\sigma L_s} u_{vs}; \\ \frac{d\Psi_{ur}}{dt} &= -\alpha \Psi_{ur} - p \Omega \Psi_{vr} + \alpha L_m i_{us}; \\ \frac{d\Psi_{vr}}{dt} &= -\alpha \Psi_{vr} + p \Omega \Psi_{ur} + \alpha L_m i_{vs}; \\ \frac{d\Omega}{dt} &= k_1 \mu (\Psi_{ur} i_{vs} - \Psi_{vr} i_{us}) - a_{51} \Omega - a_{52} \Omega^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\alpha = \frac{1}{T_r}$ ;  $T_r$  – постоянная времени ротора двигателя;  $\beta = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r}$ ;  $\gamma = \frac{R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s}$ ;  $R_r$ ,  $R_s$  – активные сопротивления роторной и статорной обмоток двигателя;  $p$  – число пар полюсов статора;  $u_{us}$ ,  $u_{vs}$  – статорные напряжения по осям  $u$  и  $v$ ;  $k_1$  – постоянный коэффициент;  $\mu = \frac{p L_m}{J L_r}$ ;  $J$  – приведенный момент инерции двигателя (с учетом момента инерции дизель-поезда);  $M_n = a_{51} \Omega + a_{52} \Omega^2$  – момент нагрузки двигателя.

Математическая модель асинхронного привода (2) не может быть непосредственно использована для линеаризации объекта с помощью

динамической обратной связи из-за слишком большого числа одночленов, входящих в правую часть системы уравнений (2), что приводит к нетривиальным громоздким преобразованиям и необходимости весьма сложного поиска решений системы уравнений в частных производных. Выполним нелинейное преобразование системы уравнений (2) во вращающуюся систему координат  $d, q$ . Получим, что в новой системе координат

$$\Omega = \Omega; \quad (3)$$

$$\Psi_d i_q = \Psi_{ur} i_{vs} - \Psi_{vr} i_{us}, \quad (4)$$

где  $\Psi_d = \sqrt{\Psi_{ur}^2 + \Psi_{vr}^2}; \quad (5)$

$$i_q = i_{vs} \cos \rho - i_{us} \sin \rho; \quad (6)$$

$$\rho = \arcsin \frac{\Psi_{vr}}{\sqrt{\Psi_{ur}^2 + \Psi_{vr}^2}} \text{ или } \rho = \arccos \frac{\Psi_{ur}}{\sqrt{\Psi_{ur}^2 + \Psi_{vr}^2}}; \quad (7)$$

$i_q$  – ток статора по оси  $q$  в системе координат  $d, q$ . При этом ток статора по оси  $d$  определяется выражением

$$i_d = i_{us} \cos \rho - i_{vs} \sin \rho. \quad (8)$$

Наиболее просто с помощью соотношений (3) и (4) в новой системе координат получается последнее уравнение из системы уравнений (2), которое в  $d$ - $q$ -системе координат приобретает вид

$$\frac{d\Omega}{dt} = k_1 \mu \Psi_d i_q - a_{s1} \Omega - a_{s2} \Omega^2. \quad (9)$$

Второе дифференциальное уравнение получим, продифференцировав левую и правую часть выражения (5) и подставив вместо производных  $\frac{d\Psi_{ur}}{dt}$ ,  $\frac{d\Psi_{vr}}{dt}$  соответствующие правые части третьего и четвертого уравнений из системы (2). После несложных алгебраических преобразований с учетом выражений (7) и (8) имеем:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} = -\alpha \Psi_d + \alpha L_m i_d. \quad (10)$$

Продифференцировав левую и правую часть одного из выражений (7) и выполнив простые преобразования с учетом выражений (2), (5) и (6) получим

$$\frac{d\rho}{dt} = p\Omega + \alpha L_m \frac{i_q}{\Psi_d}. \quad (11)$$

Последние два дифференциальных уравнения новой математической модели получим, продифференцировав левые и правые части выражений (6), (8) и подставив необходимые соотношения из уравнений (2) и (11), и выполнив необходимые алгебраические преобразования:

$$\frac{di_d}{dt} = -\gamma i_d + p\Omega i_q + \alpha L_m \frac{i_q^2}{\Psi_d} + \alpha\beta\Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s}(u_{us} \cos \rho + u_{vs} \sin \rho); \quad (12)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\gamma i_q - p\Omega i_d - \alpha L_m \frac{i_d i_q}{\Psi_d} - p\beta\Omega\Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s}(u_{vs} \cos \rho + u_{us} \sin \rho). \quad (13)$$

Введем в полученную модель (9) – (13) асинхронного двигателя новые управления  $u_1$ ,  $u_2$ , позволяющие убрать из правых частей уравнений (12), (13) нелинейные члены:

$$u_1 = p\Omega i_q + \alpha L_m \frac{i_q^2}{\Psi_d} + \alpha\beta\Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s}(u_{us} \cos \rho + u_{vs} \sin \rho); \quad (14)$$

$$u_2 = -p\Omega i_d - \alpha L_m \frac{i_d i_q}{\Psi_d} - p\beta\Omega\Psi_d + \frac{1}{\sigma L_s}(u_{vs} \cos \rho + u_{us} \sin \rho). \quad (15)$$

Обозначив  $x_1 = \Omega$ ;  $x_2 = \Psi_d$ ;  $x_3 = i_d$ ;  $x_4 = i_q$ ;  $x_5 = \rho$ ;  $a_{11} = -a_{51}$ ;  $a_{12} = -a_{52}$ ;  $a_{124} = k_1\mu$ ;  $a_{21} = -\alpha$ ;  $a_{23} = \alpha L_m$ ;  $a_{31} = -\gamma$ ;  $a_{41} = -\gamma$ ;  $a_{51} = p$ ;  $a_{524} = \alpha L_m$  и подставив управления  $u_1$  и  $u_2$  (соотношения (14) и (15)) в уравнения (12), (13), получим модель асинхронного двигателя в виде:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + a_{124}x_2x_4; \\ \frac{dx_2}{dt} &= a_{21}x_2 + a_{23}x_3; \\ \frac{dx_3}{dt} &= a_{31}x_3 + u_1; \\ \frac{dx_4}{dt} &= a_{41}x_4 + u_2; \\ \frac{dx_5}{dt} &= a_{51}x_1 + a_{524} \frac{x_4}{x_2}. \end{aligned} \quad (16)$$

Определим возможность преобразования нелинейной системы (16) к линейной форме (к канонической форме Бруновского [1, 2, 8]). Для этого

определим инволютивность последовательности распределений  $M^0$ ,  $M^1$ ,  $M^2$  [2, 8].

С системой дифференциальных уравнений (16) связаны векторные поля

$$\mathbf{X}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + a_{124}x_2x_4 \\ a_{21}x_2 + a_{23}x_3 \\ a_{31}x_3 \\ a_{41}x_4 \\ a_{51}x_1 + a_{524}\frac{x_4}{x_2} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Y}_1(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{Y}_2(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Поскольку векторные поля  $\mathbf{Y}_1(\mathbf{x})$  и  $\mathbf{Y}_2(\mathbf{x})$  постоянны, то распределение  $M^0 = \text{span}\{\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2\}$  – инволютивно и  $\dim M^0 = 2$ , где  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ ;  $\text{span}$  – линейная оболочка векторов  $\mathbf{Y}_1$  и  $\mathbf{Y}_2$ ;  $\dim M^0$  – размерность распределения  $M^0$  [2, 8].

Определим распределение  $M^1 = \text{span}\{\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, L_x \mathbf{Y}_1, L_x \mathbf{Y}_2\}$ , где  $L_x \mathbf{Y}_1$  и  $L_x \mathbf{Y}_2$  – производные Ли векторных полей  $\mathbf{Y}_1$  и  $\mathbf{Y}_2$  вдоль векторного поля  $\mathbf{X}$ :

$$L_x \mathbf{Y}_1 = [\mathbf{X}, \mathbf{Y}_1] = \frac{\partial \mathbf{Y}_1}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{X} - \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{Y}_1 = -\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{Y}_1 = |0, -a_{23}, -a_{31}, 0, 0|^T;$$

$$L_x \mathbf{Y}_2 = [\mathbf{X}, \mathbf{Y}_2] = \frac{\partial \mathbf{Y}_2}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{X} - \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{Y}_2 = -\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{Y}_2 = \left| -a_{124}x_2, 0, 0, -a_{41}, -\frac{a_{524}}{x_2} \right|^T,$$

где  $[\mathbf{X}, \mathbf{Y}_k]$  – скобки Ли векторных полей  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}_k$ .

Для инволютивности распределения  $M^1$  необходимо выполнение условия  $\text{rank}(\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, L_x \mathbf{Y}_1, L_x \mathbf{Y}_2, [\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j]) = 4$ , где  $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$  – векторные поля из семейства  $(\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, L_x \mathbf{Y}_1, L_x \mathbf{Y}_2)$ . Имеем:

$$[\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2] = [\mathbf{Y}_1, L_x \mathbf{Y}_1] = [\mathbf{Y}_1, L_x \mathbf{Y}_2] = [\mathbf{Y}_2, L_x \mathbf{Y}_2] = [\mathbf{Y}_2, L_x \mathbf{Y}_1] = 0. \quad (17)$$

Однако

$$[L_x \mathbf{Y}_1, L_x \mathbf{Y}_2] = \frac{\partial(L_x \mathbf{Y}_2)}{\partial \mathbf{x}} L_x \mathbf{Y}_1 - \frac{\partial(L_x \mathbf{Y}_1)}{\partial \mathbf{x}} L_x \mathbf{Y}_2 = \left| a_{23} a_{124}, 0, 0, 0, \frac{a_{524} a_{23}}{x_2^2} \right|^T.$$

Поэтому ранг матрицы  $\mathbf{R} = (\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, L_x \mathbf{Y}_1, L_x \mathbf{Y}_2, [L_x \mathbf{Y}_1, L_x \mathbf{Y}_2])$  равен пяти:

$$R = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & -a_{124}x_2 & a_{23}a_{124} \\ 0 & 0 & -a_{23} & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -a_{31} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -a_{41} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{a_{524}}{x_2} & \frac{a_{524}a_{23}}{x_2^2} \end{vmatrix}.$$

Таким образом, распределения  $M^1$  не является инволютивным. Подраспределения  $M_1^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_x Y_1\}$  и  $M_2^1 = \text{span}\{Y_1, Y_2, L_x Y_2\}$  распределения  $M^1$  в силу соотношений (17) являются инволютивными и имеют одинаковые размерности, равные 3. Введем дополнительную фазовую координату в канал, связанный с управлением  $u_2$ :

$$x_6 = u_2; \quad \frac{dx_6}{dt} = u_2^*; \quad u_1^* = u_1.$$

С расширенной моделью асинхронного двигателя связаны следующие векторные поля:

$$X^*(x^*) = \begin{vmatrix} a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + a_{124}x_2x_4 \\ a_{21}x_2 + a_{23}x_3 \\ a_{31}x_3 \\ a_{41}x_4 + x_6 \\ a_{51}x_1 + a_{524}\frac{x_4}{x_2} \\ 0 \end{vmatrix}; \quad Y_1^*(x^*) = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad Y_2^*(x^*) = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix},$$

где  $x^* = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ .

Для расширенной модели асинхронного двигателя распределение  $M^{0*} = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*\}$  – инволютивно,  $\dim M^{0*} = 2$ . Распределение  $M^{1*} = \text{span}\{Y_1^*, Y_2^*, L_{x^*} Y_1^*, L_{x^*} Y_2^*\}$  также инволютивно, поскольку  $[Y_1^*, Y_2^*] = [Y_1^*, L_{x^*} Y_1^*] = [Y_1^*, L_{x^*} Y_2^*] = [Y_2^*, L_{x^*} Y_2^*] = [Y_2^*, L_{x^*} Y_1^*] = [L_{x^*} Y_1^*, L_{x^*} Y_2^*] = 0$ ,

$$\text{где } L_{x^*} Y_1^* = [X^*, Y_1^*] = \frac{\partial Y_1^*}{\partial x^*} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_1^* = -\frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_1^* = |0, -a_{32}, -a_{31}, 0, 0, 0|^T;$$

$$L_{x^*} Y_2^* = [X^*, Y_2^*] = \frac{\partial Y_2^*}{\partial x^*} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_2^* = -\frac{\partial X^*}{\partial x^*} Y_2^* = |0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0|^T;$$

$$-\frac{\partial \mathbf{X}^*}{\partial \mathbf{x}^*} \mathbf{Y}_1^* = \begin{vmatrix} a_{11} + 2a_{12}x_1 & a_{124}x_4 & 0 & a_{124}x_2 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{41} & 0 & 1 \\ a_{51} & -a_{524} \frac{x_4}{x_2^2} & 0 & \frac{a_{524}}{x_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ -a_{23} \\ -a_{31} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}.$$

При этом матрица  $R_1 = (\mathbf{Y}_1^*, \mathbf{Y}_2^*, L_x^* \mathbf{Y}_1^*, L_x^* \mathbf{Y}_2^*)$  имеет ранг равный 4,  $m_1 = \dim M^{1*} = 4$ .

Рассмотрим распределение  $M^{2*} = \text{span}\{\mathbf{Y}_1^*, \mathbf{Y}_2^*, L_x^* \mathbf{Y}_1^*, L_x^* \mathbf{Y}_2^*, L_x^2 \mathbf{Y}_1^*, L_x^2 \mathbf{Y}_2^*\}$ ,

$$\text{где } L_x^2 \mathbf{Y}_1^* = [X^*, L_x^* \mathbf{Y}_1^*] = \frac{\partial(L_x^* \mathbf{Y}_1^*)}{\partial \mathbf{x}^*} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial \mathbf{x}^*} L_x^* \mathbf{Y}_1^* = -\frac{\partial X^*}{\partial \mathbf{x}^*} L_x^* \mathbf{Y}_1^* =$$

$$= \left[ a_{23}a_{124}x_4, a_{23}(a_{21} + a_{31}), a_{31}^2, 0, -\frac{a_{23}a_{524}x_4}{x_2^2}, 0 \right]^T;$$

$$L_x^2 \mathbf{Y}_2^* = [X^*, L_x^* \mathbf{Y}_2^*] = \frac{\partial(L_x^* \mathbf{Y}_2^*)}{\partial \mathbf{x}^*} X^* - \frac{\partial X^*}{\partial \mathbf{x}^*} L_x^* \mathbf{Y}_2^* = \left[ a_{124}x_2, 0, 0, a_{41}, \frac{a_{524}}{x_2}, 0 \right]^T.$$

Распределение  $M^{2*}$  имеет следующую размерность:

$$\dim M^{2*} = \text{rank}\{\mathbf{Y}_1^*, \mathbf{Y}_2^*, L_x^* \mathbf{Y}_1^*, L_x^* \mathbf{Y}_2^*, L_x^2 \mathbf{Y}_1^*, L_x^2 \mathbf{Y}_2^*\} = 6.$$

Распределение  $M^{2*}$  инволютивно. Используя теорию о линейном эквиваленте для нелинейной аффинной системы с векторным управлением [2, теорема 1.16], получим, что индексы управляемости  $k_1$  и  $k_2$  для рассматриваемой системы управления одинаковы:  $k_1 = k_2 = 3$ , и имеются две клетки канонической формы Бруновского.

Таким образом, налицо следующий эквивалент исходной математической модели в форме Бруновского:

$$\begin{aligned} \frac{dy_i}{dt} &= y_{i+1}, \quad i = 1, 2, 4, 5; \\ \frac{dy_i}{dt} &= v_k, \quad i = 3, 6; \quad k = i/3. \end{aligned} \quad (18)$$

Следовательно, известно, что существуют некоторые преобразования  $y_1 = T_1(\mathbf{x}^*)$  и  $y_4 = T_2(\mathbf{x}^*)$ , из которых путем последовательного дифференцирования функций  $T_1(\mathbf{x}^*)$  и  $T_2(\mathbf{x}^*)$  вдоль векторного поля  $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}^* + u_1^* \mathbf{Y}_1^* + u_2^* \mathbf{Y}_2^*$  можно определить, соответственно  $y_2, y_3$  и  $y_5, y_6$ . Получим систему дифференциальных уравнений, определяющих функции  $T_1(\mathbf{x}^*)$  и  $T_2(\mathbf{x}^*)$ . Для этого вначале продифференцируем вдоль векторного поля  $\mathbf{X}_1$  эти функции:

$$\frac{dy_1}{dt} = y_2 = L_{\mathbf{X}_1} T_2(\mathbf{x}^*) = L_{\mathbf{X}^*} T_1(\mathbf{x}^*) + u_1^* L_{\mathbf{Y}_1^*} T_1(\mathbf{x}^*) + u_2^* L_{\mathbf{Y}_2^*} T_1(\mathbf{x}^*); \quad (19)$$

$$\frac{dy_4}{dt} = y_5 = L_{\mathbf{X}_1} T_2(\mathbf{x}^*) = L_{\mathbf{X}^*} T_2(\mathbf{x}^*) + u_1^* L_{\mathbf{Y}_1^*} T_2(\mathbf{x}^*) + u_2^* L_{\mathbf{Y}_2^*} T_2(\mathbf{x}^*), \quad (20)$$

где  $L_{\mathbf{X}_1} T_i(\mathbf{x}^*)$ ,  $L_{\mathbf{X}^*} T_i(\mathbf{x}^*)$ ,  $L_{\mathbf{Y}_1^*} T_i(\mathbf{x}^*)$ ,  $L_{\mathbf{Y}_2^*} T_i(\mathbf{x}^*)$  – производные Ли функций  $T_i(\mathbf{x}^*)$ ,  $i = 1, 2$ , вдоль, соответственно, векторных полей  $\mathbf{X}_1 = \mathbf{X}^* + u_1^* \mathbf{Y}_1^* + u_2^* \mathbf{Y}_2^*$ ,  $\mathbf{X}^*$ ,  $\mathbf{Y}_1^*$  и  $\mathbf{Y}_2^*$ .

Поскольку из выражения (18) следует, что  $y_2$  и  $y_5$  в соотношениях (19), (20) не зависят от управлений  $u_1^*$  и  $u_2^*$ , то имеем:

$$\begin{aligned} L_{\mathbf{Y}_1^*} T_1(\mathbf{x}^*) &= \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, \mathbf{Y}_1^* \right\rangle = \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3} \cdot 1 + \\ &+ \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6} \cdot 0 = 0; \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} L_{\mathbf{Y}_2^*} T_1(\mathbf{x}^*) &= \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, \mathbf{Y}_2^* \right\rangle = \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3} \cdot 0 + \\ &+ \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6} \cdot 1 = 0; \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} L_{\mathbf{Y}_1^*} T_2(\mathbf{x}^*) &= \left\langle \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, \mathbf{Y}_1^* \right\rangle = \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3} \cdot 1 + \\ &+ \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6} \cdot 0 = 0; \end{aligned} \quad (23)$$

$$L_{Y_2^*} T_2(\mathbf{x}^*) = \left\langle \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, Y_2^* \right\rangle = \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_2(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6} \cdot 0. \quad (24)$$

Из выражений (21) – (24) следует, что функции  $T_1(\mathbf{x})$  и  $T_2(\mathbf{x})$  не зависят от  $x_3$  и  $x_6$ .

Дифференцируя  $y_2 = L_{X^*} T_1(x^*)$  и  $y_5 = L_{X^*} T_2(x^*)$  вдоль векторного поля  $X_1$ , получим:

$$\frac{dy_2}{dt} = y_3 = L_{X_1}(L_{X^*} T_1) = L_{X^*}^2 T_1 + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_1); \quad (25)$$

$$\frac{dy_5}{dt} = y_6 = L_{X_1}(L_{X^*} T_2) = L_{X^*}^2 T_2 + u_1^* L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_2) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_2(x^*)). \quad (26)$$

Из выражения (18) следует, что  $y_3$  и  $y_6$  в соотношениях (25), (26) не зависят от управлений  $u_1^*$  и  $u_2^*$ , поэтому имеем

$$L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1) = L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_1) = L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_2) = L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_2) = 0. \quad (27)$$

Для дальнейших вычислений воспользуемся известной теоремой [3, стр. 180].

Теорема. Пусть имеются  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  – гладкие векторные функции и  $T_1(\mathbf{x})$  – скалярная функция векторного аргумента ( $\mathbf{f}, \mathbf{g}, \mathbf{x} \in R^n; T_1 \in R$ ) и выполняются соотношения

$$L_g L_f^i T_1(\mathbf{x}) = 0, \quad i = 0, 1, \dots, m-1, \quad L_g L_f^m \alpha(\mathbf{x}) \neq 0, \quad (28)$$

тогда справедливо выражение

$$L_{ad_f^j g} L_f^k T_1(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq j+k \leq m-1, \\ (-1)^j L_g L_f^m T_1(\mathbf{x}) \neq 0, & j+k = m. \end{cases} \quad (29)$$

Рассмотрим случай, когда  $k=0$ , тогда из соотношений (28)  $L_g L_f T_1(\mathbf{x}) = L_g L_f^2 T_1(\mathbf{x}) = \dots = L_g L_f^{m-1} T_1(\mathbf{x}) = 0$ ,  $L_g L_f^m T_1(\mathbf{x}) \neq 0$  следует:

$$L_{ad_f^j g} T_1(\mathbf{x}) = 0 \quad \text{при } j=0, 1, \dots, m-1, \quad L_{ad_f^m g} T_1(\mathbf{x}) \neq 0. \quad (30)$$

Известно [3], что производная Ли  $L_f T_1(\mathbf{x})$  скалярной функции  $T_1(\mathbf{x})$  векторного аргумента по векторной функции  $\mathbf{f}(\mathbf{x})$  ( $T_1(\mathbf{x}) \in R$ ;  $\mathbf{x}, \mathbf{f}(\mathbf{x}) \in R^n$ ) может быть определена несколькими эквивалентными выражениями:

$$L_f T_1(\mathbf{x}) = \frac{dT_1(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \nabla T_1(\mathbf{x}) \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial T_1(\mathbf{x})}{\partial x_i} f_i(\mathbf{x}), \quad (31)$$

где  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right)$  – оператор, равносильный оператору дифференцирования  $\frac{d}{d\mathbf{x}}$  по векторному аргументу. Поэтому соотношения (30) можно, используя выражения (31), записать в виде

$$\nabla T_1(\mathbf{x}) ad_f^j \mathbf{g} = 0, \quad j = 0, 1, \dots, m-1, \quad \nabla T_1(\mathbf{x}) ad_f^m \mathbf{g} \neq 0. \quad (32)$$

Используя выражения (28) – (32), из соотношений (27) получим

$$\begin{aligned} L_{Y_1^*}(L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*)) &= \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*} Y_1^* \right\rangle = \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2} \cdot (-a_{23}) + \\ &+ \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3} \cdot (-a_{31}) + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6} \cdot 0 = 0; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} L_{Y_2^*}(L_{X^*} T_1(\mathbf{x}^*)) &= \left\langle \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial \mathbf{x}^*}, L_{X^*} Y_2^* \right\rangle = \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_1} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_2} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_3} \cdot 0 + \\ &+ \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_4} \cdot (-1) + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_5} \cdot 0 + \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_6} \cdot 0 = 0. \end{aligned} \quad (34)$$

Поскольку функция  $T_1(\mathbf{x}^*)$  не зависит от  $x_3$ , то из выражения (33) следует, что она не зависит и от  $x_2$ , а из выражения (34) получим и независимость  $T_1(\mathbf{x}^*)$  от аргумента  $x_4$ . Таким образом, функция  $T_1(\mathbf{x}^*)$  может зависеть только от аргументов  $x_1$  и  $x_5$ .

С помощью соотношений, аналогичных (33), (34), нетрудно получить, что функция  $T_2(\mathbf{x}^*)$  не зависит от аргументов  $x_2$ ,  $x_4$  и, таким образом, может быть функцией только аргументов  $x_1$  и  $x_5$ .

Дифференцируя  $y_3 = L_{X^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)$  и  $y_5 = L_{X^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)$  вдоль векторного поля  $X_1$ , получим

$$\frac{dy_3}{dt} = L_{X_1}(L_X^2 T_1(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^3 T_1 + u_1^* L_{Y_1^*}(L_X^2 T_1) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_X^2 T_1); \quad (35)$$

$$\frac{dy_6}{dt} = L_{X_1}(L_X^2 T_2(\mathbf{x}^*)) = L_{X^*}^3 T_2 + u_1^* L_{Y_1^*}(L_X^2 T_2) + u_2^* L_{Y_2^*}(L_X^2 T_2). \quad (36)$$

Из этих выражений следует, что  $L_{Y_1^*}(L_X^2 T_1(\mathbf{x}^*)) \neq 0$  и  $L_{Y_2^*}(L_X^2 T_2(\mathbf{x}^*)) \neq 0$

или

$$L_{Y_1^*}(L_X^2 T_1(\mathbf{x})) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{x}}, L_X^2 \mathbf{Y}_1^* \right\rangle = \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \cdot (a_{23} a_{124} x_4) + \frac{\partial T_1}{\partial x_5} \cdot \left( -\frac{a_{23} a_{524} x_4}{x_2^2} \right) \neq 0; \quad (37)$$

$$L_{Y_2^*}(L_X^2 T_2(\mathbf{x})) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{x}}, L_X^2 \mathbf{Y}_2^* \right\rangle = \frac{\partial T_2}{\partial x_1} \cdot (a_{124} x_4) + \frac{\partial T_2}{\partial x_5} \cdot \left( \frac{a_{524}}{x_2} \right) \neq 0. \quad (38)$$

При  $x_2 \neq 0$  и  $x_4 \neq 0$  одним из возможных решений системы неравенств (37), (38) может быть  $T_1(\mathbf{x}) = x_1$  и  $T_2(\mathbf{x}) = x_5$ .

Известно [2], что для того чтобы существовало преобразование (19), (20), (25), (26), (35), (36) необходимо и достаточно, чтобы матрица

$$\mathbf{Q} = \begin{vmatrix} L_{Y_1^*}(L_X^2 T_1(\mathbf{x}^*)) & L_{Y_2^*}(L_X^2 T_1(\mathbf{x}^*)) \\ L_{Y_1^*}(L_X^2 T_2(\mathbf{x}^*)) & L_{Y_2^*}(L_X^2 T_2(\mathbf{x}^*)) \end{vmatrix}$$

была невырождена. Проверим это, вычислив элементы матрицы  $\mathbf{Q}$  и ее определитель:

$$L_{Y_1^*}(L_X^2 T_1(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{x}^*}, L_X^2 \mathbf{Y}_1^* \right\rangle = \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \cdot a_{124} a_{23} x_4 = a_{124} a_{23} x_4; \quad (39)$$

$$L_{Y_1^*}(L_X^2 T_1(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{x}^*}, L_X^2 \mathbf{Y}_2^* \right\rangle = \frac{\partial T_1}{\partial x_1} \cdot a_{124} x_2 = a_{124} x_2; \quad (40)$$

$$L_{Y_1^*}(L_X^2 T_2(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{x}^*}, L_X^2 \mathbf{Y}_1^* \right\rangle = \frac{\partial T_2}{\partial x_5} \cdot \left( -\frac{a_{23} a_{524} x_4}{x_2^2} \right) = -a_{23} a_{524} \frac{x_4}{x_2^2}; \quad (41)$$

$$L_{Y_2^*}(L_X^2 T_2(\mathbf{x}^*)) = \left\langle \frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{x}^*}, L_X^2 \mathbf{Y}_2^* \right\rangle = \frac{\partial T_2}{\partial x_5} \cdot \frac{a_{524}}{x_2} = \frac{a_{524}}{x_2}; \quad (42)$$

$$\det \mathbf{Q} = \begin{vmatrix} a_{124} a_{23} x_4 & a_{124} x_2 \\ -a_{23} a_{524} \frac{x_4}{x_2^2} & \frac{a_{524}}{x_2} \end{vmatrix} = 2 a_{124} a_{23} a_{524} \frac{x_4}{x_2}.$$

Таким образом, при  $x_2 \neq 0$  и  $x_4 \neq 0$  преобразования (19), (20), (25), (26), (35), (36) существуют.

Зная  $T_1(\mathbf{x}^*)$  и  $T_2(\mathbf{x}^*)$ , определим функции перехода к форме Бруновского (18):

$$\begin{aligned}
 y_1 &= T_1(\mathbf{x}) = x_1; \quad y_4 = T_2(\mathbf{x}) = x_5; \\
 y_2 &= L_{\mathbf{X}^*} T_1(\mathbf{x}^*) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial T_1(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i} \mathbf{X}^* = a_{11}x_1 + a_{21}x_1^2 + a_{124}x_2x_4; \\
 y_5 &= L_{\mathbf{X}^*} T_5(\mathbf{x}^*) = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial T_5(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i} \mathbf{X}_i^* = a_{51}x_1 + a_{524} \frac{x_4}{x_2}; \\
 y_3 &= L_{\mathbf{X}^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*) = L_{\mathbf{X}^*}(L_{\mathbf{X}^*} T_1(\mathbf{x}^*)) = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial(L_{\mathbf{X}^*} T_1(\mathbf{x}^*))}{\partial x_i} \mathbf{X}_i^* = (a_{11} + 2a_{12}x_1) \cdot \\
 &\cdot (a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + a_{124}x_2x_4) + a_{124}x_4(a_{21}x_2 + a_{23}x_{31}) + a_{124}x_2(a_{41}x_4 + a_6); \\
 y_6 &= L_{\mathbf{X}^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*) = L_{\mathbf{X}^*}(L_{\mathbf{X}^*} T_2(\mathbf{x}^*)) = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial(L_{\mathbf{X}^*} T_2(\mathbf{x}^*))}{\partial x_i} \mathbf{X}_i^* = \\
 &= a_{51}(a_{11}x_1 + a_{12}x_1^2 + a_{124}x_2x_4) + \left( -a_{524} \frac{x_4}{x_2} \right) (a_{21}x_2 + a_{23}x_{31}) + \frac{a_{524}}{x_2} (a_{41}x_4 + a_6).
 \end{aligned}$$

Из вида уравнений (19), (20), (25), (26), (35), (36) следует, что управления  $v_1, v_2$  для системы уравнений в форме Бруновского (18) определяются из выражений (35), (36):

$$\begin{aligned}
 v_1 &= L_{\mathbf{X}^*}^3 T_1(\mathbf{x}^*) + u_1^* L_{\mathbf{Y}_1^*} (L_{\mathbf{X}^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) + u_2^* L_{\mathbf{Y}_2^*} (L_{\mathbf{X}^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)); \\
 v_2 &= L_{\mathbf{X}^*}^3 T_2(\mathbf{x}^*) + u_1^* L_{\mathbf{Y}_1^*} (L_{\mathbf{X}^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)) + u_2^* L_{\mathbf{Y}_2^*} (L_{\mathbf{X}^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)).
 \end{aligned} \tag{43}$$

Систему уравнений (18) можно использовать для определения оптимальных управлений  $v_1, v_2$ . Затем, зная  $v_1$  и  $v_2$  – определить  $u_2^*$  и  $u_1^*$  из системы уравнений (43), а потом найти  $u_1$  и  $u_2$ :

$$\begin{aligned}
 u_2^* &= \frac{1}{\det \mathbf{Q}} \left[ L_{\mathbf{Y}_1^*} (L_{\mathbf{X}^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) (v_2 - L_{\mathbf{X}^*}^3 T_2(\mathbf{x})) - L_{\mathbf{Y}_1^*} (L_{\mathbf{X}^*}^2 T_2(\mathbf{x}^*)) (v_1 - L_{\mathbf{X}^*}^3 T_1(\mathbf{x})) \right]; \\
 u_1^* &= \frac{1}{L_{\mathbf{Y}_1^*} (L_{\mathbf{X}^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*))} \left[ v_1 - L_{\mathbf{X}^*}^3 T_1(\mathbf{x}) - u_2^* L_{\mathbf{Y}_2^*} (L_{\mathbf{X}^*}^2 T_1(\mathbf{x}^*)) \right]; \\
 u_1 &= u_1^*; \quad u_2 = \int_0^T u_1^* dt.
 \end{aligned}$$

Сравнение процессов в математических моделях асинхронного привода (1), (2), (16) и (18) в разных режимах работы привода подтвердило правильность линеаризации обратной связью исходной модели (1) и работоспособность модели объекта в форме Бруновского.

**Выводы.** Таким образом, впервые средствами дифференциальной геометрии получена работоспособная математическая модель асинхронного привода в канонической форме Бруновского, которую можно использовать для синтеза системы управления асинхронным приводом.

**Список литературы:** 1. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 5-и томах. Т. 5: Методы современной теории управления / Под ред. *К.А. Пупкова, Н.Д. Егунова*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 784 с. 2. *Краснощёнченко В.И., Грищенко А.П.* Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2005. – 520 с. 3. *Ким Д.П.* Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учебное пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с. 4. *Kim D.P.* Automatic Control. Theory Nonlinear and Multivariable System. – Seoul: Harnol, 2000. – 558 p. 5. *Marino R., Tomei P.* Nonlinear Control Design. – Prentice Hall Europe, 1995. – 396 p. 6. *Краснощёнченко В.И.* Синтез регуляторов для нелинейных систем, приводимых к канонической форме Бруновского // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1997. – № 569. – С. 28 – 33. 7. *Краснощёнченко В.И.* О линейных эквивалентах нелинейных систем // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 1999. – № 575. – С. 39 – 45. 8. *Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю.* Динамическая линеаризация с помощью обратной связи математической модели тягового привода // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ «ХП». – 2006. – № 40. – С. 49–57. 9. *Сандлер А.С., Сарбатов П.С.* Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями. – М.: Энергия, 1974. – 328 с.

*Поступила в редакцию 25.04.2007*

*А.Л. ЕРОХИН*, докт. техн. наук, ХНУВС (г. Харьков),  
*А.П. ТУРУТА*, ХНУВС (г. Харьков)

## ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ КОМПОНЕНТ WEB

В роботі розглянуті причини відмови обслуговування компонент web. Наводяться розрахунки, які можуть бути використані при моделюванні меж нормальної роботи сервісу. Пропонується метод покращення роботи web. Доводиться необхідність ідентифікації користувачів для запобігання відмови компонент web.

In the study is show reason of denial of web-service. Calculation is made for border normal work to be modeling. The method is proposed for improvement web service. User identification is good way for prevention denial of service.

**Постановка проблемы.** Увеличение Интернет аудитории и сетевые атаки дестабилизируют работу web-сервера. Необходимо определять причины нарушений в работе и пути повышения эффективности работы сервера.

**Анализ литературы.** Рассмотрим существующие подходы к моделированию работы компонент сети web. В [1] проведен анализ функциональных компонент информационной сети, а в [2] предложена модель телекоммуникационной сети. В ряде работ для повышения эффективности работы web-сервиса предлагается улучшать настройку прикладных служб, так, в [3, 4] предлагаются способы настройки параметров протокола и web-сервиса, однако скорость изменения ситуации не позволяет заранее предусмотреть все возможные ситуации. В [5] рассматривается анализ и моделирование трафика для телекоммуникационного оборудования, в [6] предлагается разработка модуля для распознавания приложений по сетевым параметрам. Однако, при анализе трафика теряется важная информация о назначении трафика. В работе [7] рассматриваются подходы к определению качества сервиса, но проблема обеспечения указанных параметров остается нерешенной. В [8] сделано сравнение аппаратных решений QoS для улучшения качества работы серверов в сети. Анализ литературы показал, что существующие подходы не рассматривают количественные оценки, что приводит к ухудшению качества работы сети.

**Цель статьи** – исследование показателей эффективности работы каналов связи, выявление проблем работы сервиса и разработка подхода к количественной оценке качества работы сети.

Телекоммуникационная система характеризуется, с одной стороны, функциональной моделью, с другой – структурной. Адекватной структурной моделью является сама сеть [2], которая воссоздает взаимосвязи между элементами системы. Для исследования отдельных моментов была

предложена функциональная модель компонентов информационной сети [1]. Вследствие увеличения сетевой аудиторией или атаки в каналах связи (КС), в точке обслуживания запросов (сервер) могут возникать перегрузки, вследствие логических ошибок – блокировки. Такие проблемы решаются путем настройки параметров протокола TCP [4] для снижения вероятности DDoS, путем настройки системы выявления атаки HoneyPot, а также путем отсечения соединений пользовательских агентов (User-Agent) на 3<sup>х</sup> уровнях:

- на уровне скрипта (при генерации ответа);
- модуля web-сервиса (при поступлении запроса);
- на системном уровне (firewall, маршрутизатор).

**Оценка эффективности работы КС.** В исследованиях [5] для информационных сетей эмпирически получена закономерность потерь передаваемых данных от нагрузки на канал связи. Полученные результаты оформим таблицей:

Таблица

Зависимость эффективности работы КС от нагрузки

Нагрузка, %	Потери, разы[5]	Исходная скорость, кб/с	Фактическая скорость	Время передачи файла*, с	Количество файлов	Общее время их передачи
<10	1	100	100	0,1	1	0,1
50	2-3	100	40	0,2	5	1
>75	20-30	100	4	2	8	16

\* Таблица сформирована с учетом пропускной способности канала связи 100 кб/с и размера файла 10 кб.

Очевидно, что для последнего случая целесообразно уменьшить количество одновременно обрабатываемых файлов: части отказать в исполнении, отсрочить исполнение. Например, приостановим передачу 3-х файлов, в результате получится ситуация 2, 5 файлов будут обслужены за 1 сек, последующие файлы (3 шт) будут обслужены за последующие 0,6 сек (не более). В результате 8 файлов будет обслужено за 1,6 сек, против 16 сек, полученных в результате перегрузки каналов связи.

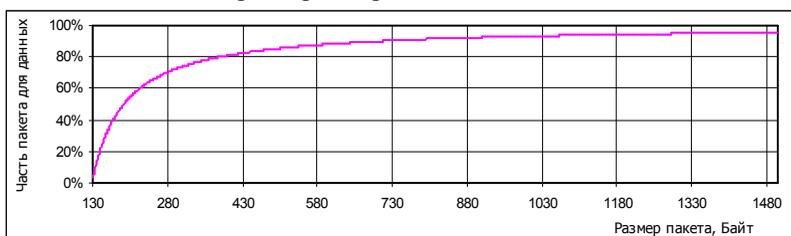
Для предотвращения перегрузки канала связи применяются различные методы, например, в ОС Windows используется служба QoS, которая резервирует часть полосы пропускания и тем самым в ряде случаев сглаживает перегрузки. Однако такой подход во время простоя не дает использовать зарезервированные возможности и не может обеспечить гибкость при работе. С учетом изложенного выше расчета и для обеспечения гибкости удержания эффективной полосы пропускания предлагается реализовать не исполнения запросов следующими способами: не выполнения запроса скриптом; разрыв конкретного соединения; блокирования адреса отправителя; отключение КС; отключение маршрутизатора.

Для адекватной реакции важно решить задачу идентификации пользовательских агентов. В предикатных уравнениях предлагается [9]

использовать функцию узнавания загруженности КС –  $X_N$ . Она может принимать значения из множества  $\{a_m, \dots, a_k, \dots, a_p\}$ , где  $X_N^{a_m}$  – соответствует простую,  $X_N^{a_k}$  – соответствует эффективной нагрузке,  $X_N^{a_p}$  – соответствует перегрузке. Такая функция узнавания используется в оценке КС [1].

### Оценка эффективности передаваемых пакетов данных.

Эффективность передачи данных зависит от совокупности параметров транспортного и канального уровней [10]. Проанализируем структуру заголовков и данных пакетов Ethernet, IP, TCP и построим график зависимости эффективного объема от размера кадра:



Отметим, что эффективная передача данных сохраняется при размере кадра более 330 байт (потери составляют менее 10%). При сокращении кадра до 170 байт потери составляют до 30%. Дальнейшее уменьшение размера кадра приводит к более резкому падению эффективности работы. Очевидно, что при ухудшении скоростных характеристик, необходимо проводить оценку каждого соединения и всех вместе с целью освобождения полосы пропускания для быстрых соединений и обслуживания медленных при наличии запаса полосы пропускания. Для адекватного реагирования необходима система идентификации состояния системы и КС, а также система принятия решения об избирательном обслуживании запросов. Для предупреждения ошибок, связанных с нестабильным состоянием отдельных КС, предлагается использовать множество эталонных объектов для проверки скоростных характеристик.

**Оценка развития ситуации.** В работе [5] производилась оценка самоподобия трафика пользователей сети Интернет, оценивалось время отправки и получения сообщения, интервалы времени между ними, длина сообщения, в результате коэффициент Херста достигал 0,75. Таким образом, трафик пользователей, даже без анализа контента, характеризуется свойствами самоподобия.

Отметим, что при обслуживании запросов имеем ряд преимуществ, для оценки развития ситуации, перед обычным анализом трафика: известно какой файл запрошен и его характеристики [1]; статистика вызова файла, длительность его чтения; информация о том, какие файлы вызывались после

запрашиваемого; априорная Баесова вероятность последующих переходов [11]; возможные цепные последовательности. Для поиска скрытых закономерностей [9, с. 67] предлагается: собирать информацию о файлах предшествующих запросу; оценивать количество и вероятности переходов после текущего запроса; вычислять математическое ожидание ( $MO$ ) и дисперсию ( $\sigma$ ) размеров файлов для одного имени, на основании полученных величин формировать группы по размеру и стабильности параметров ( $MO \gg \sigma$ ); определять время генерации файла, способность агента воспринимать файл, время отправки; собирать информацию об узких местах, проблемных файлах. Очевидно, что собранные данные помогут эффективно оценивать направление развития ситуации в следующий момент. Для обеспечения разгрузки КС, избирательности обслуживания с учетом полученной оценки развития ситуации управляющий модуль web-сервиса принимает одно из следующих решений: обслужить запрос; изменить ответ: затянуть ответ (сделать паузу) или перенаправить агента на другой сервер, или перенести ответ во времени; направить управляющие команды системе.

**Выводы.** 1. Разработан подход к количественной оценке проблем, возникающих при перегрузках КС, и указаны возможные пути решения. 2. Предложены количественные оценки зависимости эффективности передаваемых данных по КС в зависимости от размера кадра. 3. Разработаны способы оценки развития ситуации. 4. Исследованы характеристики файлов, которые сервис может собирать для поиска скрытых закономерностей и последующего решения задачи улучшения работы web-сервиса. 5. Обоснована необходимость идентификации сетевых агентов и избирательности их обслуживания.

**Список литературы:** 1. *Ерохин А.Л., Турута А.П.* Идентификация нештатных ситуаций в информационных сетях // Бионика интеллекта. – 2006. – № 1 (64). – С. 46-55. 2. *Олійник В.Ф.* Основи теорії систем зв'язку: Математичні моделі телекомунікаційних систем. – К.: Техніка, 2000. – 152 с. 3. <http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt> (27.5.2006). 4. *Pete Freitag*/ пер. А.Войновича. 20 Способов усиления безопасности Apache Web сервера. <http://www.peterfreitag.com/505.cfm> 06.12.05. 5. *Самир Махмуд.* Исследование характеристик телекоммуникационных систем при входящем потоке с эффектом самоподобия // 10-й ювілейний міжнародний молодіжний форум "Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.": Зб. матеріалів форуму. – Х.: ХНУРЕ, 2006. – С. 106-107. 6. *Michael E. Flannagen.* Administering CISCO QoS in IP-networks. Syngress, 2001. 7. *Семенов Ю.А.* Сети Интернет. Архитектура и протоколы. – М.: Сиринь, 1998. 8. *Гриффин К.* В поисках идеала QoS. Сети #13-14/2002 <http://www.osp.ru/nets/2002/13-14/147146/> 9. *Шабанов-Кушнаренко Ю.П.* Теория интеллекта. Проблемы и перспективы. – Х: Вища школа, 1987. – 160 с. 10. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. – СПб.: Питер, 2001. – 672 с. 11. *Нейлор К.* Как построить свою экспертную систему. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 286 с. 12. *Методы и модели анализа данных: OLAP и Data mining /А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод.* – СПб.: Питер, 2004. – 336 с.

*Поступила в редакцию 10.04.2007*

*Н.И. ЗАПОЛОВСКИЙ*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*М.В. ЛИПЧАНСКИЙ*, НТУ "ХПИ",  
*Н.А. ПИНЧУК*, НТУ "ХПИ"

## **СИНТЕЗ ТЕРМИНАЛЬНЫХ УПРАВЛЕНИЙ ДВИЖЕНИЕМ ПОЕЗДА**

Розглядаються питання розробки оптимізаційної математичної моделі для вирішення задачі оптимального управління розбігом дизель-потягу. Для синтезу управління як закону зміння тягового моменту потягу пропонується алгоритм у вигляді математичних співвідношень, які легко реалізуються програмним шляхом та дозволяють формувати управління у реальному масштабі часу.

The questions of development optimization mathematical model for the solving problem of optimal control diesel-train acceleration are considered. An algorithm for the synthesis of controls as a law of change train's trust moment as mathematical relations, easily realized in programmatic way and allowing forming controls in the real-time is offered.

**Постановка проблемы.** В настоящее время как в странах СНГ, так и в Украине определенное внимание в научных исследованиях отводится вопросам энергосбережения, приходящимся на долю железнодорожного транспорта. Как показывает опыт разработки подобных систем, решение этой проблемы может быть осуществлено путем создания эффективных систем управления. Существующие системы управления, разработанные ранее для различных видов железнодорожного транспорта, проектировались преимущественно только с учетом надежного функционирования определенных контуров регулирования, а не всей системы в целом. Одним из основных требований к разрабатываемым системам управления поездом является обеспечение его вывода на заданную скорость при минимальном расходе энергии или за минимальное время при соблюдении ограничений, предусмотренных графиком движения и конструктивными, и эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к системам управления, энергетическому оборудованию и др. Это вызвано, прежде всего, необходимостью обеспечения требований безопасности, дальнейшего повышения эффективности перевозок и возможностью увеличения скорости движения, повышения надежности и ресурсосбережения [1 – 3]. В этой связи практический интерес представляет задача синтеза закона управления, обеспечивающего оптимизацию топливо-энергетических затрат при переводе исследуемого объекта из начального фазового состояния в конечное с соблюдением ограничений на фазовые координаты (скорость, ускорение) и управления за фиксированное время.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Известен ряд публикаций [4 – 9], в которых рассматриваются вопросы синтеза законов

управления с учетом минимизации заданного критерия качества. Наиболее перспективным и реализуемым в системах управления объектами железнодорожного транспорта является метод терминальных управлений, разработанный Батенко А.П. [8]. Основой для нахождения терминальных управлений является система дифференциальных уравнений, описывающая объект управления, ограничения на фазовые координаты и функции от них, оптимизирующий функционал и граничные условия на левом (при  $t = 0$ ) и правом (при  $t = T$ ) концах фазовой траектории. Результатом решения является вектор-функция управления  $u(u_1, u_2, \dots, u_m)$ , минимизирующая на отрезке времени  $[0, T]$  функционал и обеспечивающая выполнение наложенных ограничений и соблюдение граничных условий. Эта методика поиска оптимальных управлений использована в работах [9, 10]. Однако алгоритм и программа, осуществляющая поиск оптимальных управлений, требуют значительных затрат машинного времени, что не позволяет ее использовать в режиме реального времени. Поэтому разработка алгоритмов и программ для синтеза законов управления, обеспечивающих оптимизацию определенного критерия качества, и позволяющая осуществлять функционирование системы управления в реальном масштабе времени, на сегодняшний день является актуальной задачей.

**Целью статьи** является синтез закона управления в виде закона изменения тягового момента поезда в функции фазовых координат, обеспечивающего процесс разгона от начальной до заданной скорости за фиксированное время на определенном участке железнодорожного пути с учетом минимизации расхода топлива.

**Реализация решения задачи синтеза.** Для синтеза системы управления движением поезда в качестве управляющего воздействия является тяговый момент, развиваемый электроприводом. Математическая модель, описывающая динамику поезда, представляется уравнениями:

$$\frac{dV}{dt} = K_1(M_T - M_C); \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = V, \quad (2)$$

где  $V$  – скорость;  $K_1 = R/J$ ;  $J = mR^2$ ;  $m$  – масса поезда;  $M_T$  – тяговый момент поезда;  $M_C$  – момент сопротивления;  $S$  – путь;  $R$  – радиус колеса.

Момент сопротивления  $M_C$  определяется как:

$$M_C = j W_0 F_C R; \quad (3)$$

$$W_0 = \frac{1}{1000} (a_0 + a_1 V + a_2 V^2); \quad (4)$$

$$F_C = m g, \quad (5)$$

где  $j$  – коэффициент, учитывающий уклон пути;  $W_0$  – удельное сопротивление движению;  $a_0, a_1, a_2$  – постоянные коэффициенты;  $g$  – ускорение свободного падения.

Используя уравнения (1) – (5), выразим тяговый момент  $M_T$  как функцию фазовых координат (в данном случае – пройденного пути  $S$ ):

$$M_T = \frac{1}{m R} \frac{d^2 S}{dt^2} + \left[ a_0 + a_1 \frac{dS}{dt} + a_2 \left( \frac{dS}{dt} \right)^2 \right] \frac{j m g R}{1000}. \quad (6)$$

Пройденный путь может быть представлена в виде временного ряда с коэффициентами  $C_i$  [6]:

$$S(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + \dots + C_i t^{i-1}. \quad (7)$$

Количество коэффициентов  $C_i$  ограничивается, с одной стороны, количеством известных граничных условий (для пути, скорости, ускорения), а с другой – разрядной сеткой используемого вычислительного устройства.

Исходя из этих замечаний, ограничиваем  $i = 6$ , и описываем траекторию пути в виде временного ряда вида:

$$S(t) = C_1 + C_2 t + C_3 t^2 + C_4 t^3 + C_5 t^4 + C_6 t^5. \quad (8)$$

Для конкретного участка пути известными являются: величина уклона  $j$  (профиль пути); начальные и конечные условия по пути и скорости движения ( $S_0, S_k, V_0, V_k$ ); предельно-допустимые значения ускорения и силы тяги; время движения. Здесь четыре ограничения должны выполняться строго, то есть решается краевая задача. К ним относятся начальные и конечные значения пути и скорости. Данные о предельно-допустимых значениях ускорения используются для отыскания оптимальной траектории.

Поскольку значение предельно-допустимого ускорения находится в пределах  $\pm 0,7 \text{ м/с}^2$ , то имея карту (график) движения, можно синтезировать управления для отдельных участков движения. Тогда для участков разгона предельно-допустимое значение ускорения находится в пределах от 0 до  $0,7 \text{ м/с}^2$ , для участков замедления – от 0 до  $-0,7 \text{ м/с}^2$  и для участков с постоянной скоростью – равно нулю.

Поскольку известны граничные условия для скорости движения и предельно-допустимые значения для ускорения, находится первая и вторая производная от функции  $S(t)$ , описываемой уравнением (8):

$$\frac{dS}{dt} = C_2 + 2C_3 t + 3C_4 t^2 + 4C_5 t^3 + 5C_6 t^4; \quad (9)$$

$$\frac{d^2 S}{dt^2} = 2C_3 + 6C_4 t + 12C_5 t^2 + 20C_6 t^3. \quad (10)$$

Обозначим:  $S_0, V_0$  – соответственно начальные значения пути и скорости на определенном временном интервале  $[t_0 - t_1]$  карты движения;  $S_1, V_1$  –

соответственно конечные значения пути и скорости на временном интервале  $[t_0 - t_1]$  карты движения;  $G_0, G_1$  – соответственно значения величины ускорения в начале и конце траектории движения на временном интервале  $[t_0 - t_1]$  карты движения, не превышающие их предельно-допустимых значений.

Для определения коэффициентов  $C_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) используем граничные условия по пути и скорости, и предельно-допустимые значения по ускорению.

Для определения длины участка пути на основании уравнения (8) получим:

$$C_2(t_1 - t_0) + C_3(t_1^2 - t_0^2) + C_4(t_1^3 - t_0^3) + C_5(t_1^4 - t_0^4) + C_6(t_1^5 - t_0^5) = S_1 - S_0. \quad (11)$$

Аналогично получаем уравнения для скорости и ускорения:

$$2C_3(t_1 - t_0) + 3C_4(t_1^2 - t_0^2) + 4C_5(t_1^3 - t_0^3) + 5C_6(t_1^4 - t_0^4) = V_1 - V_0; \quad (12)$$

$$6C_4(t_1 - t_0) + 12C_5(t_1^2 - t_0^2) + 20C_6(t_1^3 - t_0^3) = G_1 - G_0. \quad (13)$$

Обозначив  $b_1 = (t_1 - t_0)$ ;  $b_2 = (t_1^2 - t_0^2)$ ;  $b_3 = (t_1^3 - t_0^3)$ ;  $b_4 = (t_1^4 - t_0^4)$ ;  $b_5 = (t_1^5 - t_0^5)$ , из (11) определяем  $C_2$ :

$$C_2 = \frac{1}{b_1} [(S_1 - S_0) - b_2 C_3 - b_3 C_4 - b_4 C_5 - b_5 C_6]. \quad (14)$$

Подставим полученное выражение для  $C_2$  в уравнение (9) при  $t = t_0$ . Получим:

$$\frac{S_1 - S_0}{b_1} + \left[ -\frac{b_2}{b_1} C_3 - \frac{b_3}{b_1} C_4 - \frac{b_4}{b_1} C_5 - \frac{b_5}{b_1} C_6 \right] + 2C_3 t_0 + 3C_4 t_0^2 + 4C_5 t_0^3 + 5C_6 t_0^4 = V_0. \quad (15)$$

Аналогичную операцию проделаем и для момента времени  $t = t_1$  при граничной скорости  $V_1$ . В результате получим:

$$C_3 \left( 2t_0 - \frac{b_2}{b_1} \right) + C_4 \left( 3t_0^2 - \frac{b_3}{b_1} \right) + C_5 \left( 4t_0^3 - \frac{b_4}{b_1} \right) + C_6 \left( 5t_0^4 - \frac{b_5}{b_1} \right) = V_0 - \frac{S_1 - S_0}{b_1}; \quad (16)$$

$$C_3 \left( 2t_1 - \frac{b_2}{b_1} \right) + C_4 \left( 3t_1^2 - \frac{b_3}{b_1} \right) + C_5 \left( 4t_1^3 - \frac{b_4}{b_1} \right) + C_6 \left( 5t_1^4 - \frac{b_5}{b_1} \right) = V_1 - \frac{S_1 - S_0}{b_1}. \quad (17)$$

Из (16) и (17) находим  $C_3$ :

$$C_3 = \frac{1}{2b_1} [(V_1 - V_0) - 3b_2 C_4 - 4b_3 C_5 - 5b_4 C_6]. \quad (18)$$

В уравнения (16) и (17) подставляем значение  $C_3$ , полученное из соотношения (18). В результате получим:

$$C_4 \left( 3t_0^2 - \frac{b_3}{b_1} - \frac{3b_2 t_0}{b_1} + \frac{3b_2^2}{2b_1^2} \right) + C_5 \left( 4t_0^3 - \frac{b_4}{b_1} - \frac{4b_3 t_0}{b_1} + \frac{2b_2 b_3}{b_1^2} \right) + \quad (19)$$

$$+ C_6 \left( 5t_0^4 - \frac{b_5}{b_1} - \frac{5b_4 t_0}{b_1} + \frac{5b_2 b_4}{2b_1^2} \right) = V_0 - \frac{S_1 - S_0}{b_1} - \frac{2t_0 - b_2/b_1}{2b_1} (V_1 - V_0);$$

$$C_4 \left( 3t_1^2 - \frac{b_3}{b_1} - \frac{3b_2 t_1}{b_1} + \frac{3b_2^2}{2b_1^2} \right) + C_5 \left( 4t_1^3 - \frac{b_4}{b_1} - \frac{4b_3 t_1}{b_1} + \frac{2b_2 b_3}{b_1^2} \right) + \quad (20)$$

$$+ C_6 \left( 5t_1^4 - \frac{b_5}{b_1} - \frac{5b_4 t_1}{b_1} + \frac{5b_2 b_4}{2b_1^2} \right) = V_1 - \frac{S_1 - S_0}{b_1} - \frac{2t_1 - b_2/b_1}{2b_1} (V_1 - V_0).$$

Из уравнения (13) при граничных условиях по ускорению ( $G_0$  и  $G_1$ ), получим:

$$6b_1 C_4 + 12b_2 C_5 + 20b_3 C_6 = G_1 - G_0. \quad (21)$$

Значение коэффициента  $C_1$  можно определить из уравнения (8) при  $t = t_1$ :

$$C_1 = S_1 - C_2 t_1 - C_3 t_1^2 - C_4 t_1^3 - C_5 t_1^4 - C_6 t_1^5. \quad (22)$$

Обозначим:

$$a_{41} = 3t_0^2 - \frac{b_3}{b_1} - \frac{3b_2 t_0}{b_1} + \frac{3b_2^2}{2b_1^2}; \quad a_{42} = 4t_0^3 - \frac{b_4}{b_1} - \frac{4b_3 t_0}{b_1} + \frac{3b_2 b_3}{b_1^2};$$

$$a_{43} = 5t_0^4 - \frac{b_5}{b_1} - \frac{5b_4 t_0}{b_1} + \frac{5b_2 b_4}{2b_1^2}; \quad a_{51} = 3t_1^2 - \frac{b_3}{b_1} - \frac{3b_2 t_1}{b_1} + \frac{3b_2^2}{2b_1^2};$$

$$a_{52} = 4t_1^3 - \frac{b_4}{b_1} - \frac{4b_3 t_1}{b_1} + \frac{3b_2 b_3}{b_1^2}; \quad a_{53} = 5t_1^4 - \frac{b_5}{b_1} - \frac{5b_4 t_1}{b_1} + \frac{5b_2 b_4}{2b_1^2};$$

$$a_{61} = 6b_1; \quad a_{62} = 12b_2; \quad a_{63} = 20b_3;$$

$$g_1 = V_0 - \frac{S_1 - S_0}{b_1} - \frac{(2t_0 - b_2/b_1)}{2b_1} (V_1 - V_0);$$

$$g_2 = V_1 - \frac{S_1 - S_0}{b_1} - \frac{(2t_1 - b_2/b_1)}{2b_1} (V_1 - V_0); \quad g_3 = G_1 - G_0.$$

Используя данные обозначения и полученные уравнения (19) – (21), получим систему линейных алгебраических уравнений (23) относительно искомых коэффициентов  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$ . Коэффициенты  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  находятся из уравнений (22), (14) и (18).

$$\begin{cases} a_{41} C_4 + a_{42} C_5 + a_{43} C_6 = g_1; \\ a_{51} C_4 + a_{52} C_5 + a_{53} C_6 = g_2; \\ a_{61} C_4 + a_{62} C_5 + a_{63} C_6 = g_3. \end{cases} \quad (23)$$

Решение системы уравнений (23) представлено в следующем виде:

$$C_4 = \frac{\Delta C_4}{\Delta}; \quad C_5 = \frac{\Delta C_5}{\Delta}; \quad C_6 = \frac{\Delta C_6}{\Delta};$$

$$\Delta = a_{41}(a_{52} a_{63} - a_{53} a_{62}) - a_{42}(a_{51} a_{63} - a_{53} a_{61}) + a_{43}(a_{51} a_{62} - a_{52} a_{61});$$

$$\Delta C_4 = g_1(a_{52} a_{63} - a_{53} a_{62}) - a_{42}(g_2 a_{63} - g_3 a_{53}) + a_{43}(g_2 a_{62} - g_3 a_{52});$$

$$\Delta C_5 = a_{41}(g_2 a_{63} - g_3 a_{53}) - g_1(a_{51} a_{63} - a_{53} a_{61}) + a_{43}(a_{51} g_3 - g_2 a_{61});$$

$$\Delta C_6 = a_{41}(g_3 a_{52} - g_2 a_{62}) - a_{42}(g_3 a_{51} - g_2 a_{61}) + g_1(a_{51} a_{62} - a_{52} a_{61}).$$

В итоге для каждого интервала времени  $[t_0, t_1]$  могут быть найдены коэффициенты  $C_i$  ( $i = 1, \dots, 6$ ), и, соответственно, управления в виде тягового момента  $M_T$ .

Поиск оптимальной фазовой траектории осуществляется путем варьирования значений ускорений на левом и правом концах допустимых траекторий. Поскольку физически возможный диапазон его изменения незначительный ( $0 - 0,7 \text{ м/с}^2$ ), то может быть использован метод последовательного перебора, но не исключается и градиентный поиск. При шаге в  $0,01 \text{ м/с}^2$  необходимо выполнить около 100 просчетов для определения оптимальной траектории, что вполне приемлемо при использовании для этих целей современных ПЭВМ, обеспечивая при этом формирование сигнала управления в реальном времени.

В качестве оптимизируемого параметра рассматривался расход топлива (энергии) при известном удельном расходе.

Для дизель-поезда (для случая использования дизеля типа 12V 183TDB) расход топлива для конкретной позиции контроллера машиниста определяется на основе универсальной характеристики дизеля.

При условии работы дизеля по регулировочной характеристике удельный расход топлива, в зависимости от полной потребляемой мощности энергетической системой дизель-поезда, может быть описан уравнением вида

$$g_e = g_e(P_e, N), \quad (24)$$

где  $g_e$  – удельный расход топлива;  $P_e$  – полная мощность, потребляемая энергетической системой дизель-поезда;  $N$  – номер позиции контроллера машиниста.

Удельная расходная характеристика дизеля в зависимости от потребляемой мощности может быть описана уравнением вида

$$g_e(P_e) = K_0 + K_1 P_e + K_2 P_e^2 - K_3 P_e^3, \quad (25)$$

где  $K_0, K_1, K_2, K_3$  – коэффициенты аппроксимации.

Расход топлива при движении дизель-поезда по заданному участку пути согласно определенной допустимой фазовой траектории будет определяться как

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} g_e(P_e) P_e dt. \quad (26)$$

При выборе оптимальной фазовой траектории для заданного участка пути признаком оптимальности является минимум функционала (26), то есть минимальные затраты дизельного топлива при прохождении участка пути за фиксированное время.

**Выводы.** Разработан алгоритм поиска оптимальных управлений при движении поезда по заданному участку пути, который не критичен к длине участка, а, следовательно, и времени прохождения, поскольку имеется возможность дробить участки пути при расчете оптимальной траектории на отдельные части.

Исследование законов управления с использованием математической модели подтвердило перспективность использования данного алгоритма для синтеза оптимальных управлений поездом в процессе разгона.

В дальнейшем планируется разработанный алгоритм поиска использовать при создании систем управления электропоездами и дизель-поездами, а так же при создании скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта.

**Список литературы:** 1. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт. В прошлом, настоящем и будущем. – СПб.: Изд-во. “Информационный центр “Выбор”. – 2001. – Т.1. – 256 с. 2. *Басов Г.Г.* Прогнозування розвитку дизель-поїздів для залізниць України: Монографія. Ч. 1. – Харків: “Апекс+”, 2004. – 240 с. 3. *Басов Г.Г., Яцько С.І.* Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу. Ч. 2. – Харків: “Апекс+”, 2005. – 248 с. 4. *Костромин А.М.* Об оптимальном управлении тепловозом // Оптимизация управления и повышение эффективности работы локомотивов // Труды Белорус. ин-та инж. ж.-д. трансп. – Гомель, 1984. – С. 42–49. 5. *Костромин А.М.* Оптимизация управления локомотивом. – М.: Транспорт, 1979. – 119 с. 6. *Луков Н.М.* Автоматизация тепловозов, газотурбовозов и дизель-поездов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с. 7. *Ерофеев Е.В., Мостов И.С.* Оптимизация программ движения поездов // Труды Москов. ин-та инж. ж.-д. трансп. – 1977. – № 550. – С. 121–125. 8. *Батенко А.П.* Системы терминального управления. – М.: Радио и связь, 1984. – 160 с. 9. *Носков В.И., Колыбин Ю.Н., Липчанский М.В.* Оптимизационная модель для синтеза терминальных управлений движением электропоезда // Вісник НТУ “ХПІ”: Збірка наукових праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2001. – № 4. – С. 15–19. 10. *Носков В.И., Дмитриченко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю.* Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов. – Харьков: ХФИ “Транспорт Украины”, 2003. – 248 с.

Поступила в редакцию 23.04.2007

*Н.И. ЗАПОЛОВСКИЙ*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*Н.В. МЕЗЕНЦЕВ*, НТУ "ХПИ"

## **ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИЯХ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ**

Виконаний аналіз різних функцій приналежності нечітких змінних при проектуванні нечіткого контролера швидкості у векторній системі управління електроприводом змінного струму. Наводяться результати моделювання і зроблені висновки відносно найбільш відповідних функцій приналежності для даного випадку.

The analysis of various functions of a fitting fuzzy variable is executed at designing the fuzzy speedcontroller in the vector control system of AC drive. Results of modelling are resulted and conclusions of rather most suitable functions of a fitting to the given case are made.

**Постановка проблемы.** При векторном способе управления электроприводом переменного тока дизель-поезда возникает необходимость управления процессом разгона с учетом качества протекания электромагнитных процессов и оптимизации энергетических затрат. Одним из критериев качества является величина перерегулирования, которая не должна превышать некоторого максимального значения в переходном режиме. В структуру системы векторного управления входят несколько регуляторов, в частности, ПИ-регулятор скорости, которой не обладает соответствующими качественными характеристиками. В последние 20 – 25 лет в теории автоматического управления появилось направление, связанное с методами нечеткой логики, позволяющими строить цифровые регуляторы, которые обеспечивают предельно высокое быстродействие систем управления. Однако остается открытым вопрос выбора функций принадлежности для нечетких переменных, описывающих функционирование регулятора. Поэтому целесообразно провести сравнительный анализ различных функций принадлежности и их влияние на работу проектируемого регулятора.

**Анализ литературы.** В [1 – 3] анализируются общие принципы векторного управления электроприводами, в частности, построение систем векторного управления с использованием стандартных П-, ПИ-, ПИД-регуляторов. В работах [4 – 6] рассмотрены методы синтеза систем управления на основе нечеткой логики. Здесь, с одной стороны, нечеткие системы управления используются для объектов управления, модель которых неизвестна, а с другой – как альтернатива классическим системам управления. Показано, что важным достоинством нечетких систем управления является возможность их обучения на примерах. Также приведено ряд возможных архитектур для построения нечетких систем управления.

В работе [7] детально описывается построение нечеткого регулятора для системы векторного управления электроприводом переменного тока. Рассматривается структура системы управления, приводится алгоритм работы нечеткого контроллера скорости, а также результаты моделирования спроектированной системы в пакете MATLAB. Однако здесь недостаточно внимания уделено вопросу выбора функций принадлежности нечетких переменных.

**Целью статьи** является исследование работоспособности нечеткого контроллера скорости в векторной системе управления электроприводом переменного тока дизель-поезда при различных функциях принадлежности нечетких переменных.

**Основной раздел.** Обобщенная структура системы векторного управления тяговым двигателем электропривода переменного тока дизель-поезда с использованием нечеткого контроллера по угловой скорости двигателя [3] приведена на рис. 1.

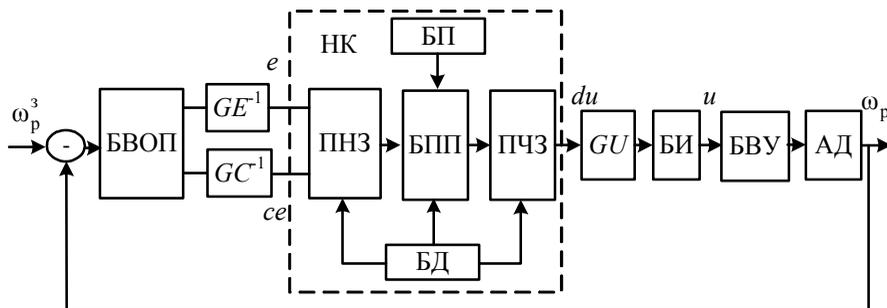


Рис. 1. Структура нечеткого контроллера в системе управления с обратной связью

Здесь:  $\omega_p^3$  – сигнал задания скорости вращения ротора тягового асинхронного двигателя; БВОП – блок вычисления ошибки и ее производной;  $GE^{-1}$ ,  $GC^{-1}$ ,  $GU$  – блоки умножения (деления) на масштабные коэффициенты; НК – нечеткий контроллер; ПНЗ – блок перехода к нечетким значениям; БП – база правил для нечеткого контроллера; БПП – блок применения правил; БД – база данных; ПЧЗ – блок перехода к четким значениям; БИ – блок интегрирования; БВУ – блок векторного управления; АД – асинхронный двигатель. Сигналы ошибки и производной ошибки преобразуются блоками  $GE^{-1}$  и  $GC^{-1}$  в соответствующие сигналы в относительных единицах  $e$  и  $ce$  путем деления на масштабные коэффициенты. Аналогично, выходной управляющий сигнал  $u$  вычисляется путем умножения выходного сигнала в относительных единицах  $du$  на масштабный коэффициент  $GU$ , с последующим его интегрированием блоком БИ для получения  $u$ .

В качестве нечетких переменных рассматриваются следующие [7]:

$E$  – сигнал ошибки по угловой скорости, которая может принимать значения:  $\{Z_1$  – нулевой сигнал ошибки;  $NS_1$  – небольшой отрицательный;  $NM_1$  – средний отрицательный;  $NB_1$  – большой отрицательный;  $PS_1$  – небольшой положительный;  $PM_1$  – средний положительный;  $PB_1$  – большой положительный};

$CE$  – сигнал ошибки по производной угловой скорости;  $\{Z_2$  – нулевой сигнал по производной ошибки;  $NS_2$  – небольшой отрицательный;  $NM_2$  – средний отрицательный;  $NB_2$  – большой отрицательный;  $PS_2$  – небольшой положительный;  $PM_2$  – средний положительный;  $PB_2$  – большой положительный};

$DU$  – сигнал нечеткого управления,  $\{Z_3$  – нулевой сигнал управления;  $NVS_3$  – очень малый отрицательный;  $NS_3$  – небольшой отрицательный;  $NM_3$  – средний отрицательный;  $NB_3$  – большой отрицательный;  $PVS_3$  – очень малый положительный;  $PS_3$  – небольшой положительный;  $PM_3$  – средний положительный;  $PB_3$  – большой положительный}.

Формирование нечеткого вывода контроллером осуществляется на основании нечетких правил, приведенных в таблице.

Таблица

$CE \backslash E$	$NB_1$	$NM_1$	$NS_1$	$Z_1$	$PS_1$	$PM_1$	$PB_1$
$NB_2$	$NB_3$	$NB_3$	$NB_3$	$NM_3$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$
$NM_2$	$NB_3$	$NB_3$	$NM_3$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$
$NS_2$	$NB_3$	$NM_3$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$
$Z_2$	$NM_3$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$	$PM_3$
$PS_2$	$NS_3$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$	$PM_3$	$PB_3$
$PM_2$	$NVS_3$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$	$PM_3$	$PB_3$	$PB_3$
$PB_2$	$Z_3$	$PVS_3$	$PS_3$	$PM_3$	$PB_3$	$PB_3$	$PB_3$

Правила формируются следующим образом:

**1. Если  $E = NB_1$  и  $CE = NB_2$ , то  $DU = NB_3$ ,**

**2. Если  $E = NM_1$  и  $CE = NB_2$ , то  $DU = NB_3$  и т.д.**

Областью определения всех нечетких переменных является интервал  $[-1, 1]$  относительных значений соответственно сигналов ошибки по угловой скорости, по производной угловой скорости и по сигналу управления. В качестве функций принадлежности нечетких лингвистических переменных  $E$ ,  $CE$ ,  $DU$  рассматривались функции, приведенные на рис. 2.

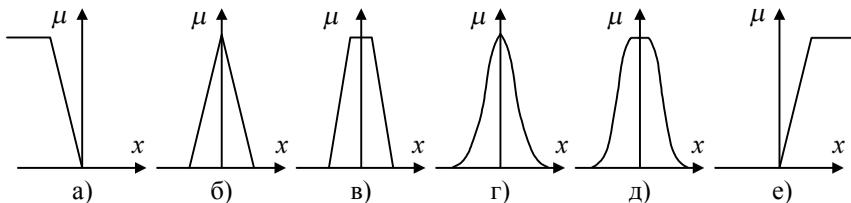


Рис. 2. Виды функций принадлежности

Эксперименты проводились для различных вариантов задания функций принадлежности как входных, так и выходной нечетких переменных. Сначала выбирались однотипные функции принадлежности (для входа и выхода). При этом получилось, что если функции принадлежности имели вид а – в и е, то нечеткий контроллер функционировал практически одинаково, только если использовались функции вида в (трапецидальные), получили некоторое перерегулирование по сравнению с функциями вида б.

На рис. 3 приведены результаты для случая использования функций вида б и в.

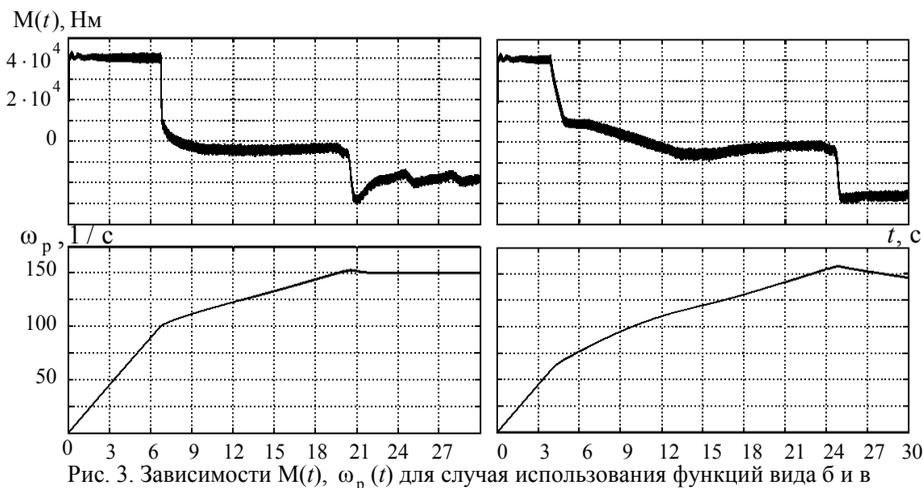


Рис. 3. Зависимости  $M(t)$ ,  $\omega_p(t)$  для случая использования функций вида б и в

При использовании функций принадлежности вида г и д регулятор не выполнял свою основную функцию (рис. 4).

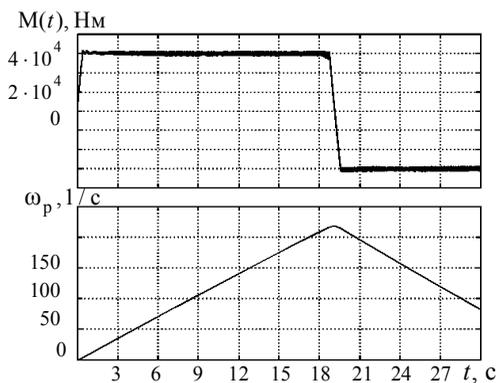


Рис. 4. Зависимости  $M(t)$ ,  $\omega_p(t)$  для случая использования функций вида г и д

Для случая комбинированного способа задания функций принадлежности: для входных переменных выбрали один тип функций принадлежности, а для

выходной – другой. При этом выяснилось, что форма функций принадлежности для выходной величины (сигнала нечеткого управления  $DU$ ) является не определяющей, т.е. за качество работы регулятора отвечает выбор вида функций принадлежности для входных нечетких переменных (сигнала ошибки по угловой скорости и сигнала ошибки по производной угловой скорости). На рис. 5 приведены зависимости при использовании для входа функций принадлежности треугольной формы (вида в), а для выхода – вида г.

Из анализа рис. 5 и рис. 3.1 можно увидеть, что использование на выходе функций принадлежности вида г позволяет несколько сгладить форму кривой момента, хотя график скорости практически остался без изменений.

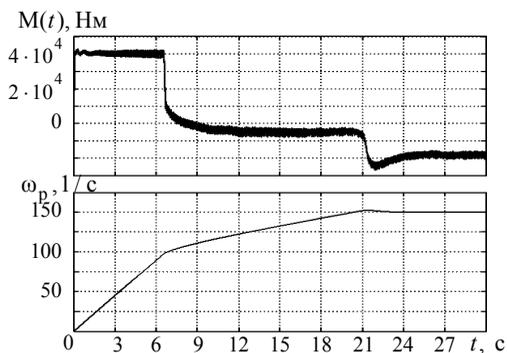


Рис. 5. Зависимости  $M(t)$ ,  $\omega_p(t)$  для случая использования для входа функций вида в), для выхода вида г

**Выводы.** Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что использование функций принадлежности вида г и д как для входных, так и для выходной нечеткой переменной (одновременно) не позволяет построить работоспособный регулятор. Определяющим является выбор функций принадлежности для входных нечетких переменных. Для входных нечетких переменных предпочтительнее выбирать функции принадлежности вида б или в, для выходной – г или д.

**Список литературы:** 1. Усольцев А.А. Векторное управление асинхронными двигателями. Учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла. – С-Пб. 2002. – 39 с. 2. Рудаков В.В., Столяров И.М., Дартуа В.А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с. 3. Bimal K. Bose Modern Power Electronics and AC Drives. – Prentice-Hall PTR, 2002. – 738 с. 4. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов В.В. Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с. 5. Ярушикина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем: Учебное пособие. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с. 6. Васильев В.И., Ильясов Б.Г. Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики: Учебное пособие. – Уфа: УГАТУ, 1997. – 220 с. 7. Заполовский Н.И., Носков В.И., Мезенцев Н.В., Горбач Н.В. Разработка и исследование системы управления электроприводом переменного тока с использованием методов нечеткой логики // Вестник НТУ "ХПИ". Тематический выпуск: Информатики и моделирование. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – № 23. – С. 53 – 60.

Поступила в редакцию 18.04.2007

**В.Г. ИВАНОВ**, канд. техн. наук,  
**М.Г. ЛЮБАРСКИЙ**, д-р физ.-мат. наук,  
**Ю.В. ЛОМОНОСОВ**, канд. техн. наук (г. Харьков)

## **JPEG И ВЕЙВЛЕТ-КОМПРЕССИЯ ОБЪЕКТА И ФОНА ИЗОБРАЖЕНИЯ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ КАЧЕСТВА**

У даній роботі приводяться практичні результати комп'ютерного моделювання стиску деяких класів зображень. Зображення перед кодуванням попередньо розбивається на дві частини – об'єкт і тло. Поділ зображення здійснюється в площині вейвлет-коефіцієнтів. Кодування кожної складової зображення робиться окремо з різним ступенем точності на основі JPEG-технологій з використанням узагальненого перетворення Фур'є (дискретне косинусне перетворення – DCT), а також із застосуванням багатомасштабної обробки вейвлет-коефіцієнтів.

In the given operation the practical results of computer simulation of contraction of some classes of the maps are resulted. The map, before encoding, is previously broken down into two parts - plant and background. The separation of the map is carried out in a plain of wavelet-coefficients. The encoding by each component the maps is made separately with different degree of accuracy on the basis of JPEG-know-hows with usage of a generalized Fourier transform (discretic cosine transforming - DCT), and also with applying of multiscale treating of wavelet-coefficients.

**Введение.** В течение многих лет доминирующей тенденцией в исследованиях проблемы сжатия данных и изображений являются методы обработки сигналов и методы теории информации, которые используют декоррелирующие свойства различных линейных преобразований и возможности квантования и энтропийного кодирования коэффициентов этих преобразований [1].

Развитие этих методов привело к созданию известных JPEG-форматов, которые используют субоптимальные косинусные преобразования Фурье и методы вейвлет-преобразований, позволяющие в 20 и более раз сократить объем графических данных, сохранив при этом хорошее визуальное качество [2, 3]. Повысить количественные и качественные характеристики этих форматов можно в результате сокращения содержательной избыточности изображений. Суть такого подхода заключается в том, что в памяти хранится только часть изображения, представляющая интерес в данном конкретном применении.

**Постановка задачи и её решение.** Основной проблемой при сокращении содержательной избыточности изображений остается выделение значимых (информативных) участков изображений (объектов) и участков менее информативных (фона). И хотя решению этой проблемы посвящено большое количество работ [4 – 6], в которых получены интересные результаты, в целом задача кодирования изображений на основе этих принципов еще далека от своего окончательного решения.

В данной работе разделение элементов изображения на два класса (объект и фон) производится при помощи вейвлет-преобразования изображения, и выделения контуров в пространстве коэффициентов высокочастотных областей многомасштабного анализа. Конечным результатом выделения объектов на изображении является построение битовой плоскости, которая содержит информацию о расположении объекта и фона. Дальнейшая обработка выделенных областей осуществляется при помощи JPEG-технологий на базе дискретного косинусного преобразования, а также с помощью многомасштабного вейвлет-анализа. Эта работа является продолжением исследований авторов, основные результаты которых были опубликованы в [7 – 9].

**Выделение объектов на плоскости изображений.** Идея кодирования изображения с различной степенью качества реализована в графическом формате DjVu [10]. В этом формате изображение разделяется на передний план, задний план и битовую плоскость соответствия, которая содержит информацию о взаимном размещении переднего и заднего плана на плоскости изображения. Разделение изображения на передний план ( в рассматриваемом случае – аналог объекта) и задний план (фон) основано на нахождении границ резких перепадов яркости между областями с равномерным распределением её значений. Подобный алгоритм выделения значимых областей изображений позволяет сохранить эти области с лучшим качеством, а степень сжатия повысить за счет большей компрессии заднего плана. Кодирование переднего и заднего плана изображения производится на основе вейвлет-преобразования данных с различным разрешением, причем разрешение заднего плана в несколько раз меньше, чем разрешение переднего плана. Таким образом, обрабатываемое изображение в формате DjVu кодируется с различной степенью качества, что по сравнению с форматом JPEG-2000 (JP2), где также используется вейвлет-преобразование для всей плоскости изображения, имеет некоторое преимущество в сжатии для определенных классов изображений.

Ограничением приведенного метода выделения переднего плана есть то, что значимый (информативный) объект должен иметь равномерное распределение яркости, быть замкнутым по форме и иметь четкие границы перепада яркости по сравнению с задним планом изображения (символьные данные). В случае, когда наиболее информативная область реалистичного изображения не имеет замкнутой формы с постоянным значением яркости, приведенный алгоритм не производит разделения изображения и кодирует его с равной степенью качества, т.е. сводится к известному формату JPEG-2000.

**Целью данной работы** является разработка и анализ эффективного алгоритма кодирования на основе выделения наиболее информативных областей изображения, не имеющих равномерного распределения яркости внутри себя и замкнутых границ, очерчивающих объект. В качестве такого изображения, из библиотеки стандартных изображений

<http://www.icsl.ucla.edu>, был выбран файл lena.bmp, который представлен на рис. 1. Параметры исходного изображения: размер 256×256, глубина цвета в градации серого 8 бит. Вейвлет коэффициенты исходного изображения, после одного шага преобразования, представлены на рис. 2.

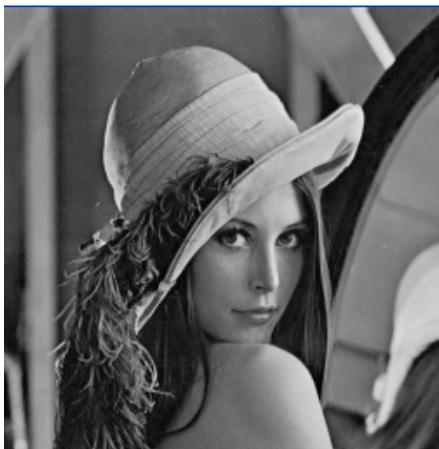


Рис.1. Исходное изображение

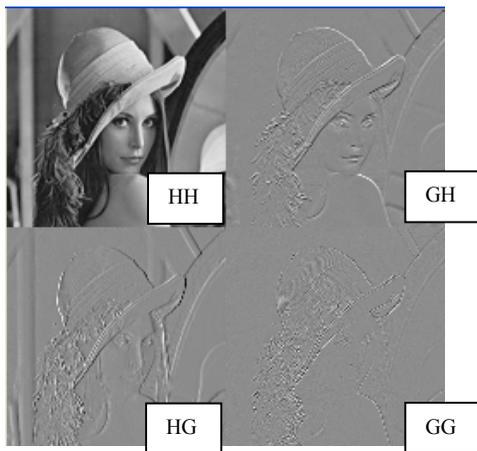


Рис. 2. Вейвлет коэффициенты после одного шага преобразования

На практике вейвлет-преобразование проводится с помощью биортогональных вейвлет-базисов по формулам разложения (1) и синтеза (2). Если  $\{a_i\}$  – коэффициенты разложения остаточного члена, то  $\{b_i\}$  и  $\{c_i\}$  –

коэффициенты, соответственно нового остаточного члена в следующем масштабе представления

$$b_i = \sum_s h_s a_{2i+s} \text{ и } c_i = \sum_s g_s a_{2i+s} . \quad (1)$$

Аналогичным образом, если известны коэффициенты  $\{b_i\}$  и  $\{c_i\}$ , то коэффициенты  $\{a_i\}$  можно восстановить в соответствии с выражением

$$a_i = \sum_s h_s b_{i-s} + \sum_s g_s c_{i-s} . \quad (2)$$

Для разложения и восстановления сигнала используют две разные пары квадратурных зеркальных фильтров: пара  $\{\tilde{h}, \tilde{g}\}$  при разложении и пара  $\{h, g\}$  при восстановлении. Основное уравнение, в данном случае имеет вид

$$\overline{h(\omega)\tilde{h}(\omega)} + \overline{h(\omega + \pi)\tilde{h}(\omega + \pi)} = 2 .$$

Для этого равенства существует семейство решений:

$$\begin{aligned} \tilde{h}_{n,m}(\omega) &= \sqrt{2} \left( \frac{1 + e^{i\omega}}{2} \right)^n ; \\ h_{n,m}(\omega) &= \sqrt{2} \left( \frac{1 + e^{i\omega}}{2} \right)^2 P_m \left( \sin^2 \frac{\omega}{2} \right) e^{-im\omega} , \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_m(x) = \sum_{s=0}^{m-1} C_{m-1+s}^s x^s$  – многочлен Дебеша.

Для вейвлет-преобразования исходного изображения, рис. 1, использовалась пара квадратурных зеркальных фильтров  $h$  и  $\tilde{h}$  с параметрами  $n = 1$  и  $m = 2$  выражения (3), общий вид, которых представлен на рис. 3.

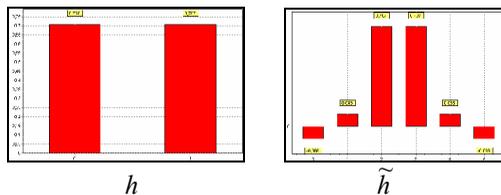


Рис. 3. Пара квадратурных зеркальных фильтров с параметрами  $n = 1$  и  $m = 2$

При построении разделяющей битовой плоскости, использовались вейвлет коэффициенты HG и GH областей (рис. 2), которые были получены в соответствии с выражением (1). После усредненного суммирования выбранных вейвлет-коэффициентов  $(HG+GH)/2$  получим изображение, которое представлено на рис. 4.



Рис. 4. Изображение полученное в результате усредненного суммирования вейвлет коэффициентов HG и GH областей

Полученное изображение имеет более равномерное распределение яркости по сравнению с оригиналом (рис. 1), или остаточным членом разложения НН (рис. 2). Это качество достигается за счет применения соответствующей пары фильтров  $h$  и  $\tilde{h}$  при вейвлет преобразовании исследуемого изображения. Исходное изображение раскладывается на “грубую” (НН) и ”тонкую” (GG) структуры (рис. 2). Области HG и GH имеют более гладкий рельеф яркости на всей плоскости, но при этом сохраняют наиболее существенные ее перепады. Выбор именно этих составляющих (HG и GH) обусловлен тем, что они получены в результате обработки исходного изображения одной парой фильтров  $h$  и  $\tilde{h}$ , но только в обратной последовательности их применения. При этом область HG содержит наиболее выраженные перепады яркости в вертикальном направлении, что обусловлено последовательностью операций свертки исходного изображения с соответствующими фильтрами  $h$  и  $\tilde{h}$ . Область GH, наоборот, имеет резкие скачки яркости в горизонтальной плоскости.

Усредненное суммирование HG и GH плоскостей позволяет сохранить резкие изменения яркости, которые обязательно присутствуют в обоих направлениях. Усредненное суммирование HG и GH областей формирует плоскость изображения для пороговой обработки (рис. 4) по формуле

$$X_{i,j} = (HG_{i,j} + GH_{i,j}) / 2, \quad (4)$$

где  $X_{i,j}$  – точка усредненного изображения,  $i, j = 1, \dots, n$ ;  $n$  – количество строк и столбцов в матрице изображения размерностью  $n \times n$ .

Применение пороговой обработки к изображению, представленному на рис. 4, позволяет получить совокупность точек, между которыми значения разности яркости превышает пороговое значение ( $|X_i - X_{i+1}| \geq KX_{cp}$ ), (рис. 5, а). Формирование плоскости  $Z_{i,j}$ , которая содержит точки превышения порогового значения, (рис. 5, а) согласно правилу

$$Z_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } |X_{i,j} - X_{i,j+1}| \geq KX_{\text{cp}}, \text{ или } |X_{i,j} - X_{i+1,j}| \geq KX_{\text{cp}}; \\ 0, & \text{если } |X_{i,j} - X_{i,j+1}| < KX_{\text{cp}}, \text{ или } |X_{i,j} - X_{i+1,j}| < KX_{\text{cp}}. \end{cases} \quad (5)$$

где  $i, j = 1, \dots, n - 1$ ,  $n$  – количество строк и столбцов в матрице изображения размерностью  $n \times n$ .

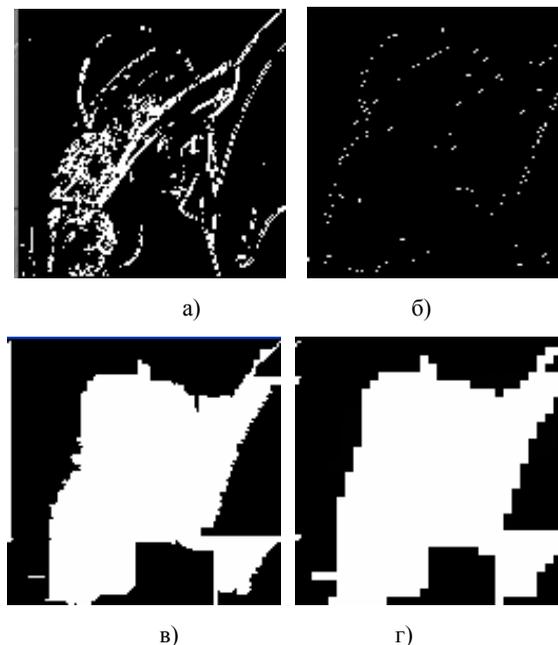


Рис. 5 а) совокупность точек, превысивших разностный порог; б) граничные точки разделения объекта и фона; в) битовая плоскость разделения; г) битовая плоскость после сегментации

Пороговое значение привязывалось к среднему значению яркости  $X_{\text{cp}}$  на всей плоскости изображения (рис. 4), и выбиралось таким образом, чтобы исключить наличие случайных точек, т.е. тех точек, которые не имеют в своем ближайшем окружении себе подобных. Таким образом, производится фильтрация одиночных точек преодолевших пороговое значение. На рис. 5, а наглядно видны область с высокой плотностью перепадов яркости и область, которая практически не содержит смежных точек превышения порога. Пороговая обработка изображения, представленного на рис. 4, проводилась по строкам и столбцам матрицы изображения.

Затем, для отделения объекта от фона, производится последовательное сканирование изображения по строкам и столбцам до выявления первой и последней не нулевой точки. После разделения изображения на области

объекта и фона, необходимо создать непрерывную и замкнутую границу между этими областями. На рис. 5,б представлены граничные точки, которые разделяют области объекта и фона. Эта граница раздела имеет разрывы и не является замкнутой линией. Для формирования непрерывного и замкнутого контура требуется соединить точки разрыва границы между связными фрагментами контура (см. рис. 6). Точкой разрыва линии границы считается любая точка, имеющая только одну смежную точку, т. е. одного "соседа". Для соединения точек разрыва линии границы  $X_j$  необходимо найти минимальное расстояния между точками разрыва, принадлежащими разным подмножествам  $\{R_i\}$ , т.е. концом связного фрагмента границы и началом другого. После соединения граничных точек между собой получим битовую плоскость, разделяющую объект и фон, рис. 5, в. Построение битовой плоскости является завершающим этапом выделения объекта на плоскости изображения. Точки внутри контура считаются принадлежащими объекту и им присваивается значение 1, точки, лежащие вне контура, считаются фоном и им присваивается значение 0, рис. 5, в.

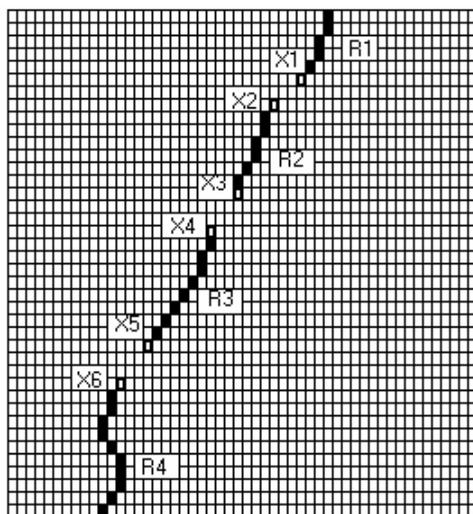


Рис. 6. Связные фрагменты  $R_i$  и точки разрыва линии границы  $X_j$  между областями объекта и фона

В случае, когда компрессия изображений осуществляется при помощи JPEG-технологии на основе дискретного косинусного преобразования, то предварительно осуществляется разбиение плоскости изображения на фрагменты размером  $8 \times 8$  [JPEG]. После одного шага вейвлет-преобразования плоскость изображения, представленная на рис. 4, уменьшается в 4 раза по

сравнению с плоскостью исходного изображения, рис. 1. Следовательно, размер фрагмента, для битовой плоскости, должен быть  $4 \times 4$ , что полностью согласуется с разбиением исходного изображения (рис. 1) на фрагменты  $8 \times 8$ . Каждый фрагмент может принадлежать трем областям: область объекта, область фона, область границы битовой плоскости. Таким образом, фрагментами области объекта можно считать те фрагменты, которые принадлежат, как области самого объекта, так и области границы битовой плоскости. Все остальные сегменты плоскости изображения принадлежат области фона.

На рис. 5, г представлена битовая плоскость разделения изображения после сегментного разбиения на фрагменты  $4 \times 4$ .

В том случае, когда сжатие исходного изображения (рис. 1) производится с использованием многомасштабного вейвлет преобразования, то семантика битовой плоскости (рис. 5, в) не производится.

**JPEG- и вейвлет-компрессия объекта и фона изображений с различной степенью точности.** Сначала рассмотрим практические результаты кодирования изображений с различной степенью точности при использовании JPEG-технологий.

Исходное изображение (рис. 1) необходимо разбить на сегменты размером  $8 \times 8$  и осуществить кодирование объекта и фона изображения по методу JPEG-технологии [5 – 7].

Согласно метода JPEG-компрессии ядро одномерного косинусного преобразования имеет вид:

$$L_x(0) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum X(m); \quad L_x(R) = \sqrt{\frac{2}{N}} \sum_{m=0}^{N-1} X(m) \cos \frac{(2m+1)k\pi}{2N}. \quad (7)$$

В этом выражении  $X(m)$  – значение отчетов в строках соответствующих рабочих матриц, полученных на втором шаге JPEG-технологий,  $L_x(k)$  – коэффициенты дискретного косинусного преобразования, а значения  $m$  и  $k$  изменяются соответственно от 0 до  $N-1$  и от 1 до  $N-1$  с шагом один.

Различная степень точности кодирования объекта и фона определяется количеством косинусных коэффициентов, которые используются в рабочих матрицах объекта и фона. Для фона выберем минимальное значение  $-1$  (имеется ввиду первый коэффициент рабочей матрицы  $8 \times 8$  в каждом сегменте изображения), а для объекта максимальное – 64 коэффициента. Таким образом, сжатие изображения будет осуществляться только за счет сегментов, которые входят в область объекта на битовой плоскости. Область фона будет представлена только одним коэффициентом косинусного преобразования в каждом сегменте области фона. Такой подход позволяет обеспечить максимальное сжатие области фона изображения, а в области объекта обеспечить такую степень компрессии и качества изображения, которая являлась бы приемлемой для решения поставленной задачи.

На рис. 7 представлена зависимость общего коэффициента сжатия всей плоскости изображения (Ксж) от среднеквадратической ошибки (СКО) на плоскости объекта.

На рис. 8, представлено исходное изображение после кодирования методом JPEG компрессии. Рис. 8, а показывает восстановленное изображение после раздельного кодирования объекта и фона с различной степенью качества, а рис. (8, б) после кодирования всей плоскости изображения с одинаковой степенью качества. СКО на плоскости объекта в обоих вариантах составляет 12%, а увеличение коэффициента сжатия с 19 до 24 обусловлено большей степенью компрессии области фона (в данном случае Ксж фона составляет 64 раза, так как только один косинусный коэффициент рабочей матрицы  $8 \times 8$  представляет каждый сегмент области фона). При JPEG кодировании изображений битовую плоскость разделения необходимо кодировать энтропийными методами и хранить или передавать вместе с самим изображением в сжатом виде, что в незначительной мере влияет на степень компрессии самого изображения.

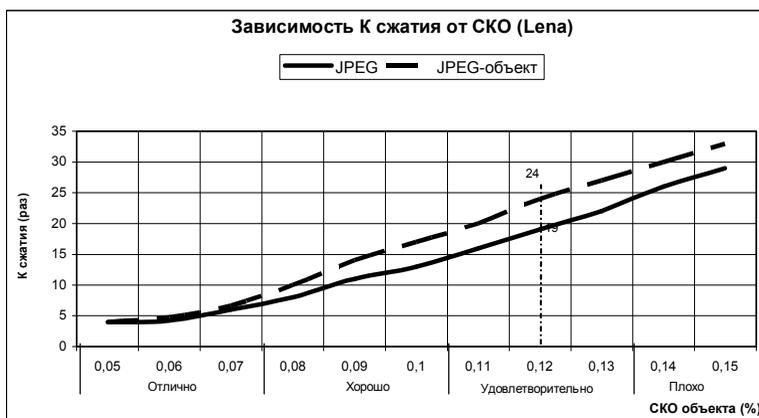


Рис. 7. Зависимость коэффициента сжатия всей плоскости изображения (Ксж) от среднеквадратической ошибки (СКО) на плоскости объекта.

Кодирование изображений на основе вейвлет преобразований с предварительным выделением объекта имеет некоторые отличия от JPEG кодирования области объекта и фона.

Выделение объекта на плоскости изображения производится таким же образом, как и в случае преобразования в JPEG формат. Однако, после формирования битовой плоскости разделения изображения на объект и фон, (рис. 5, г) применить её необходимо только к вейвлет-коэффициентам, представленным в областях HG, GH и GG на каждом шаге разложения.

В результате, все вейвлет-коэффициенты, которые принадлежат области объекта на всех этапах разложения, сохраняются, а коэффициенты, которые принадлежат области фона в соответствующих масштабах, игнорируются. При таком подходе, общий коэффициент сжатия будет более высоким, но на восстановленном изображении текстура фона будет полностью отсутствовать или заменена на абстрактную текстуру, которая не имеет никакого отношения к обрабатываемому изображению.



а) Ксж = 24, СКО объекта = 12%      б) Ксж = 19, СКО объекта = 12%

Рис. 8. Изображение после раздельного кодирования методом JPEG-технологий

Использование вейвлет преобразования при кодировании изображений с разной степенью точности не требует отдельного кодирования и хранения битовой плоскости вместе с изображением. Битовая плоскость используется только на этапе разложения изображения, при восстановлении вейвлет-коэффициенты будут распределены в обратном порядке Z-сканирования плоскости разложения. Этот факт можно отнести к преимуществу вейвлет кодирования изображений по сравнению с методом JPEG.

На рис. 9 представлена зависимость коэффициента сжатия от СКО при кодировании изображения с использованием вейвлет преобразования.

Для отметки СКО = 12% степень сжатия при использовании вейвлет преобразования соответствует 23 (кривая – Вейвлет). При использовании тех же фильтров разложения и восстановления, но с разделением изображения на объект и фон степень сжатия увеличилась до 26 при том же значении СКО = 12% (кривая – Вейвлет-объект). Следует заметить, что при аналогичном значении ошибки восстановления (СКО = 12%) степень сжатия при JPEG кодировании изображения с выделением объекта равна 24 (рис. 7), что превышает соответствующий показатель при обычном вейвлет анализе (рис. 9, кривая – Вейвлет).

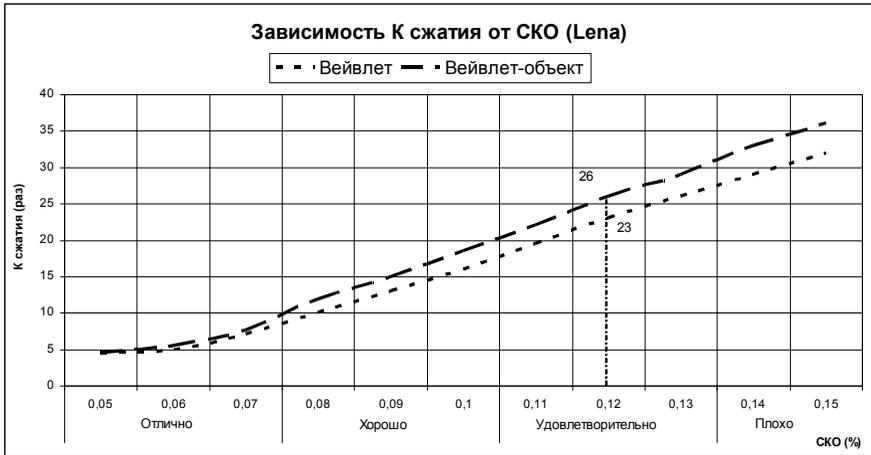


Рис. 9. Зависимость коэффициента сжатия (Ксж) от среднеквадратической ошибки (СКО) при вейвлет анализе изображения

На рис. 10 (а, б) представлены восстановленные изображения, полученные после вейвлет кодирования всей плоскости изображения, (рис. 10, а), а так же после раздельного кодирования области фона и объекта, (рис. 10, б), при одинаковом значении ошибки восстановления, СКО = 12%.



а) Ксж = 23, СКО = 12%  
(без выделения объекта)



б) Ксж = 26, СКО = 12%,  
(с выделением объекта)

Рис. 10. Восстановленные изображения после выделения объекта и вейвлет-кодирования

**Выводы.** Предложенный метод разделения изображения на объект и фон, позволяет кодировать их отдельно, как с различной степенью качества, так и с использованием различных методов. Это дает возможность представлять

наиболее информативные области изображения с более высоким качеством, чем остальные его составляющие. Благодаря такому подходу можно сохранить высокое качество информативных областей (объектов), менее информативные области (фон) представить с большей компрессией, но с худшим качеством и таким образом повысить общий коэффициент сжатия для всего изображения.

Предложенный подход позволил выявить резервы классической схемы JPEG-кодирования и получить лучшие количественные характеристики по сравнению с вейвлет-кодированием на основе формата JPEG 2000.

Также следует отметить, что относительное повышение эффективности кодирования предложенного метода выше в классическом JPEG-формате, чем в JPEG 2000. Это объясняется естественной локальной природой вейвлет-преобразований.

**Список литературы:** 1. *Претт У.* Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с. 2. *Уэлстид С.* Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии. Учеб. пособ. – М.: Изд-во "Триумф", 2003. – 336 с. 3. *Сэломон Д.* Сжатие данных, изображений и звука. – М.: Техносфера, 2004. – 368 с. 4. *Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів // Праці Сьомої Всеукраїнської міжнародної конференції УкрОБРАЗ'2004.* – К.: Видання Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем, 2004. – 306 с. 5. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. 6. *Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів / Праці Восьмої Всеукраїнської міжнародної конференції УкрОБРАЗ'2006.* – К.: Видання Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем, 2006. – 212 с. 7. *Иванов В.Г., Ломоносов Ю.В., Любарский М.Г.* Фурье и вейвлет анализ изображений в плоскости JPEG технологий // Проблемы управления и информатики. – 2004. – №5. – С. 111–124. 8. *Иванов В.Г., Любарский М.Г., Ломоносов Ю.В.* Сжатие изображений на основе компенсации контуров при вейвлет преобразовании // Проблемы управления и информатики. – 2006. – № 3. – С. 89–101. 9. *Иванов В.Г., Любарский М.Г., Ломоносов Ю.В.* Сжатие изображений на основе выделения и кодирования объектов с различным визуальным качеством / Праці Восьмої Всеукраїнської міжнародної конференції "Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів" (УкрОБРАЗ'2006). – К.: Кібернетичний центр НАН України, 2006. – С. 159–163. 10. <http://www.dejavu.research.att.com/djvu/sci/djvuspec>.

*Поступила в редакцію 02.04.2007*

**В.В. КАРАСЮК**, канд. техн. наук,  
**В.А. ПАЗЫЧ**, НЮАУ (г. Харьков)

## АНАЛИЗ ЗАЩИЩЕННОСТИ ЛОКАЛЬНОЙ СЕТИ ВУЗА

У статті розглянута модель системи захисту інформації у локальній мережі. Для опису моделі пропонується використати системний підхід та побудувати матрицю відповідності. Наведені відомості про реальну локальну мережу ВУЗа та загрози інформаційній безпеці, які мали місце впродовж року експлуатації даної мережі. Описані можливості апаратних та програмних засобів захисту, які є вбудованими у комутатори, що встановлені у вузлах локальної мережі. Запропоновані подальші напрямки досліджень і розробок інтелектуальних систем захисту інформації у локальних комп'ютерних мережах.

In article the model of system for protection of the information in a local network is considered. For the description of model it is offered to use the system approach and to construct a matrix of conformity. Data on a real computer network of a higher educational institution and threat of information safety, which took place during a year of operation in the given network are resulted. Opportunities of equipment in network and software of protection, which are built in switches, are described. These switches are used in units of a local network. Directions of the further researches and development of intellectual systems for protection of the information in local computer networks are offered.

**Постановка проблемы.** Анализ защищенности локальных компьютерных сетей относится к слабо структурированным проблемам системного анализа, потому что ее решение сталкивается с широким набором альтернатив нарушений безопасности, зависит от технологических достижений в аппаратном и программном обеспечении информационных систем, по которым нет полной информации, является внутренне сложной проблемой вследствие комбинирования ресурсов, необходимых для защиты компьютерных сетей, и для нее не определены формальные требования защищенности. Локальная компьютерная сеть представляет собой сложный программно-аппаратный и телекоммуникационный комплекс, распределенный территориально и объединяющий большое количество аппаратных устройств, которые динамично взаимодействуют во времени под управлением программного обеспечения. В настоящее время используется много различных эвристических способов оценки защищенности информационных систем, однако единого математического аппарата для решения данной проблемы не существует, эта проблема не тривиальна, что порождает индивидуальные подходы для разрабатываемых и эксплуатируемых информационных систем [1].

**Анализ литературы.** В соответствии с моделью сетевых взаимодействий в сети анализ безопасности проводится на уровнях: пользовательских приложений; СУБД; операционной системы; на сетевом (физическом) уровне; интегрированный подход [2]. В силу значимости рассматриваемой проблемы,

она получила широкое обсуждение в литературе. Известные исследователи в этом направлении – А. Лукацкий, Ю. Цаплев, М. Степашкин, Р. Просяников, А. Астахов, А. Шелупанов, Д. Зегжда, П. Джангк, В. Эймс, О. Бойцев, Дж. Говард и другие [2 – 9]. Для рассмотрения предлагаются: технологии обнаружения атак на основе нарушений политики безопасности; исследования уязвимости информационных систем; анализ журналов регистрации транзакций и сетевого трафика; графовые модели атак; сценарные модели; подходы, ориентированные на использовании агентно-ориентированного моделирования компьютерного противоборства злоумышленников и компонентов защиты и другие. Однако совершенные интеллектуальные средства защиты еще не получили должного распространения, требуют настройки на конкретную сеть и затрат на сопровождение (затрат времени, ресурсов компьютерных систем).

**Цель статьи.** Исходя из позиций системного подхода и существующих реальных угроз для информации в сети, выполнить анализ потенциальной защищенности локальной сети от несанкционированного доступа. Сформулировать условия для оптимального применения средств защиты локальной сети высшего учебного заведения. Провести анализ и выбрать конкретные средства аппаратной и программной защиты.

**Информационная инфраструктура локальной сети.** Созданная локальная сеть имеет развитую структуру, распределенную территориально. Некоторые узлы вынесены из головного корпуса на расстояние до 3 км. Число рабочих станций в сети ныне составляет более 500 компьютеров, и в процессе развития это количество будет расти. На рис. 1 показана обобщенная инфраструктура сети.

**Угрозы для защищенности локальной сети.** После создания основной части локальной сети, она была подключена через городскую сеть провайдера к сети Internet. За время эксплуатации (около 1 года) сеть неоднократно подвергалась воздействию со стороны внешних и внутренних атак, направленных, в первую очередь, на получение информации, находящейся на локальных компьютерах у пользователей. Зафиксированные атаки можно разделить на два вида: попытки получения информации при помощи вирусов, троянских и шпионских программ; атаки на компьютеры, предпринятые через "дыры" в защитных программах (брэндмауэрах) и в программном обеспечении компьютера. За год работы локальной сети наиболее часто встречающимися вирусами на персональных компьютерах были "черви" (Worms), рассмотренные ниже. *Win32.HLLM.Perf* – почтовый червь массовой рассылки. Распространяется по электронной почте в виде вложения. Подделывает адрес отправителя. *Trojan-Dropper.Win32.Delf.sq* – троянский вирус, который устанавливает и запускает на исполнение другие вредоносные программы без

ведома пользователя. *Trojan-PSW.Win32.Ldpinch.air* – троянский вирус, ворующий пароли.

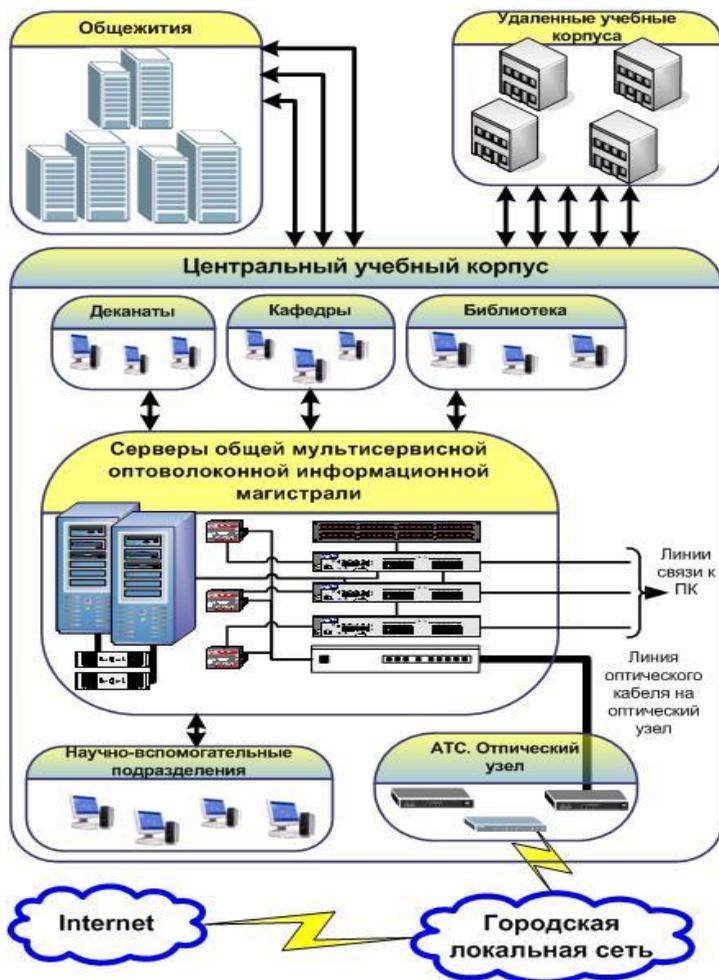


Рис. 1. Обобщенная инфраструктура локальной сети.

*Trojan-Proxy.Win32.Horst.aa* – довольно сложный многокомпонентный троян, который вначале модифицирует исполняемые файлы, а потом ломает систему безопасности, и использующий различные полиморфные технологии для осложнения обнаружения антивирусными программами. *Virus.Win32.Hidrag.a* – резидентный Win32-вирус. Заражает приложения Win32. При заражении шифрует часть заражаемого файла. *Macro.PPoint.Attach* – был найден на нескольких персональных компьютерах. Является первым

известным вирусом, который заражает файлы-презентации MS PowerPoint. Способен получить управление, активизироваться и размножаться в случае, когда в заражаемом файле-презентации содержится хотя бы одна форма (UserForm) [7,8].

**Индивидуальные требования защищенности информационных ресурсов.** Учитывая, что локальная сеть состоит из довольно большого числа компьютеров, и они находятся в различных подразделениях, от деканатов, кафедр, учебных классов до бухгалтерии и отдела кадров, возникает необходимость индивидуальной защиты рабочих мест в подразделениях и отделах. Это выполняется несколькими способами: закрытием доступа аппаратными способами – установкой на линии к отделам роутера; закрытием доступа с использованием запрограммированных портов на управляемом коммутаторе.

**Принципы построения системы защиты локальной сети.** В результате проведенного анализа угроз и с учетом поставленных требований защищенности информационных ресурсов выработан план мероприятий по повышению уровня защиты сети. Использован интегрированный подход, который предполагает применение многоуровневых средств, рассредоточенных по инфраструктуре сети. Для учета соотношения средств защиты с защищаемыми ресурсами построена матрица соответствия

$$Z = \|z_{i,j}\|,$$

где столбец матрицы – множество узлов и рабочих станций сети, подлежащих контролю защищенности; строка – множество средств защиты, имеющихся в сети; элементы  $z_{i,j}$  – состояние  $j$  средства защиты на  $i$  узле. Иерархическая структура сети предполагает наличие иерархической структуры службы защиты информации. Это нашло отражение в структуре матрицы соответствия, которая является инструментом формального анализа состояния средств системы информационной защиты сети.

**Возможности аппаратных и программных средств защиты в локальной сети.** В рассматриваемой сети применено следующее оборудование, которое выполняет функции защиты. Управляемый коммутатор 2-го уровня D-Link DGS-1216T – поддерживает статическую таблицу MAC-адресов для ограничения доступа к сети. Аутентификация 802.1x на основе портов позволяет использовать внешний RADIUS-сервер для авторизации пользователей. Дополнительные функции, такие как D-Link Safeguard Engine, защищают коммутатор от вредоносного трафика, вызванного активностью вирусов (червей). Управляемый коммутатор D-Link DES-3550 может контролироваться и обслуживаться через уникальный IP-адрес с любой рабочей станции, имеющей Web-браузер. Обеспечивает расширенный набор функций безопасности для управления подключением и доступом пользователей. Это Access Control Lists (ACL) на основе MAC-адресов, портов

коммутатора, IP адресов и (или) номеров портов TCP/UDP, аутентификацию пользователей 802.1x и контроль MAC-адресов. Помимо этого, DES-3500 обеспечивает централизованное управление административным доступом через TACACS+ и RADIUS. Эти функции обеспечивают авторизованный доступ пользователей и предотвращают распространение вредоносного трафика. Управляемый коммутатор DES-3526 имеет функции, практически аналогичные DES-3550 [9]. Перечисленные средства защиты размещены по структуре сети в соответствии с исходной матрицей соответствия. При обнаружении понижения уровня защищенности, последующими действиями пользователя должны стать: устранение обнаруженных уязвимостей и "узких" мест (обновление конфигурации сети и политики защищенности); повторный анализ защищенности сети, заданной обновленными спецификациями.

**Выводы.** Проблема защиты информации в компьютерных сетях является чрезвычайно важной и болезненной для всех пользователей и администраторов сетей. Состояние защищенности динамически изменяется во времени и необходим ее постоянный контроль. Для этой цели уже существуют интеллектуальные средства анализа защищенности, но они еще не вышли на уровень практической реализованности. Поэтому системные администраторы продолжают изыскивать приемы эффективной защиты своих сетей. В работе на примере конкретной локальной компьютерной сети ВУЗа показан подход, основанный на формальном анализе матрицы соответствия средств защиты предъявляемым требованиям защищенности.

Дальнейшая реализация предлагаемого подхода предполагается в программной реализации сопровождения матрицы соответствия и разработки подхода к формированию численных оценок защищенности узлов сети в рамках своих метрик, основанных на качественных методиках анализа угроз.

**Список литературы:** 1. Системный анализ в защите информации: Учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальностям в области информационной безопасности / *А.А.Шумский, А.А.Шелупанов*. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 224 с. 2. *Лукацкий А.В.* Обнаружение атак. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 624 с. 3. *Степанкин М.В., Котенко И.В., Богданов В.С.* Интеллектуальная система анализа защищенности компьютерных сетей // <http://www.raai.org/library/library.shtml>, 2006. – 9 с. 4. *Столлинг В.* Основы защиты сетей. Приложения и стандарты: Пер. с англ. – М.: Издат. дом "Вильямс", 2002. – 432 с. 5. *Громико Г.А.* Загальна парадигма захисту інформації // <http://www.crime-research.ua>, 2004. – 13 с. 6. *Эймс В.* Шпионские программы: риск и ответственность // Открытые системы. – 2005. – № 2. – С. 42–47. 7. *Джангк П., Шим С.* Оперативная безопасность в Internet // Открытые системы. – 2004. – № 7. – С. 53–59. 8. *Бойцев О.М.* Удаленное проникновение, или золотые правила безопасности сети // Компьютерная газета HARD'n'SOFT, 2006. – № 10. – С. 3. 9. *Черников Ф.* Обзор решений для обеспечения защиты корпоративной информации // СНП. – 2004. – № 1. – С. 86–91.

*Поступила в редакцию 03.04.2007*

*А.Р. КОРСУНОВ*, канд. техн. наук, УИПА (г. Харьков)

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПРОСТРАНСТВЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БИОСТРУКТУРЫ**

При стисненні динамічного діапазону безперервного електромагнітного сигналу, що приймається, у радіоприйомних пристроях застосовується автоматична регулювання радіоприймальних пристроїв (РПП). Застосування в РПП цифрових систем АРУ дозволяє за допомогою пристроя з коефіцієнтом передачі, що програмується та контролюється, організувати безпосередній відлік вимірювання напруженості електромагнітного сигналу на вході РПП.

In the receiver used expander of dynamic diapason continuous signal, which coming on exit. That is called as automatic operating of intensification (AOI). If employ in the receiver digital system AOI then can realize indicate of the value electromagnetic field tensoin the exite of the reciver.

**Введение.** Наиболее распространенным методом измерения напряженности элетромагнитного поля немодулированного сигнала является метод компарирования [1], т.е. сравнение принятого сигнала с опорным напряжением стандартного источника.

**Постановка проблемы.** Динамический диапазон измеряемых величин в существующих схемах измерения и регистрации ограничен нелинейностью трактов несущей и промежуточных частот радиоприемного устройства (РПУ) [2]. В связи с этим возможность автоматизировать процесс измерений ограничена требованиями перестройки коэффициента усиления РПУ в зависимости от уровня принимаемого сигнала.

**Анализ литературы.** Известно, что в РПУ при сжатии динамического диапазона принимаемого непрерывного сигнала [3] используется автоматическая регулювання усиления (АРУ), регулюющее напряжение ( $V_p$ ), которой является функцией входного сигнала ( $V_{вх}$ ) [4]. В чисто аналоговых системах АРУ напряжение  $V_p$  подается непосредственно на аналого-цифровой преобразователь микро-ЭВМ для регистрации и последующей обработки [5]. Коэффициент усиления ( $K$ ) РПУ представляет собой нелинейную функцию от  $V_p$ , т.е.  $K = K(V_p)$  [6], которую в целях упрощения примем линейной. При подобной аппроксимации зависимости  $V_p = F_p(V_{вх})$  ошибка может достигать 5 дБ, а время отсчета в каждой точке составляет 0,01 с на одно усредненное значение [7].

**Цель работы.** Предлагается использовать  $V_p$  в качестве выходного сигнала в измерениях напряженности электромагнитного поля при контроле режимов облучения биообъектов.

**Результаты исследований.** Применение в РПУ цифровой системы АРУ [8, 9] позволяет с помощью устройства с программируемым коэффициентом передачи [10] организовать непосредственный отсчет измерения напряженности электромагнитного сигнала на входе РПУ

Устройство представляет из себя комплект, состоящий из двух электрически управляемых аттенуаторов (ЭУА) 1 и 2, собранных в едином корпусе, и электрической схемы управления, выполненной в виде кассеты с многоконтактным разъемом.

ЭУА 1 и 2 функционально разделены и имеют автономные цепи управления. Электрическая схема содержит дискретный функциональный преобразователь, линеаризующий нелинейную характеристику ЭУА, и обеспечивающий изменение коэффициента передачи с шагом 1дБ.

Управляется функциональный преобразователь либо цифровой кодом, при включении его в цепь цифровой АРУ или микроЭВМ, либо вручную с помощью переключателей.

Переменные резисторы позволяют перестраивать шаг дискретизации. Отсчет установленного коэффициента передачи производится по цифровому индикатору. При этом аттенуатор 1 используется для установки ослабления с шагом 1 дБ до 10 дБ. Крупные дискреты по 10 дБ устанавливаются посредством аттенуатора 2. На индикаторе отображается реальная информация об уровне введенного ослабления, а не входная команда управления, как в существующих системах. Динамический диапазон регулирования сигнала составляет 60 дБ.

Разработанное устройство программируемого регулятора коэффициента передачи с отсчетом вводимого ослабления значительно упрощает автоматический контроль чувствительности приемного тракта.

Известные методы для подобного контроля [11] требуют большого объема априорной информации в памяти микроЭВМ, например:

1. Коэффициент первичного преобразования измерителя мощности (термистора).
2. Коэффициент вторичного преобразования измерителя мощности (выходное напряжение).
3. Коэффициенты затухания управляемого аттенуатора.

Указанный объем информации удлинит время контроля и вынуждает выводить его за рамки рабочего цикла системы.

Предложенное устройство совместно с генератором опорного сигнала позволяет подобный контроль проводить в коротких интервалах внутри рабочего режима РПУ по разработанному алгоритму (рис.), при котором в памяти микроЭВМ записано номинальное значение собственной мощности шумов на

выходе ( $P_{\text{ш.вых.соб.}}$ ), которое в нашем случае составляло  $60...70 \cdot 10^{-12}$  Вт. По алгоритму выполняются следующие операции:

1. Включить опорный генератор СВЧ с выходной мощностью  $P_r = 60 \cdot 10^7$  Вт (калиброванный выход генератора ГЧ-143). Здесь учтено что переходное ослабление направленного ответвителя, через который подается опорный уровень мощности в тракт РПУ, составляет 20 дБ.

2. Установить на аттенуаторе ослабление  $L_3$  равным начальному

$$L_3 = L_n = 30 \text{ дБ.}$$

3. Измерить  $P_{\text{ш.вых.изм.}}$  выходное ( $P_{\text{ш.вых.изм.}}$ ).

4. Если  $P_{\text{ш.вых.изм.}} < P_{\text{ш.вых.соб.}}$ , то уменьшить ослабление  $L_3 < L_n$  и перейти к п. 3.

5. Если  $P_{\text{ш.вых.изм.}} > P_{\text{ш.вых.соб.}}$ ,  $P_{\text{ш.}}$  то увеличить ослабление  $L_3 > L_n$  и перейти к п. 3.

6. Иначе вывести на устройство отображения показания индикатора цифрового аттенуатора.

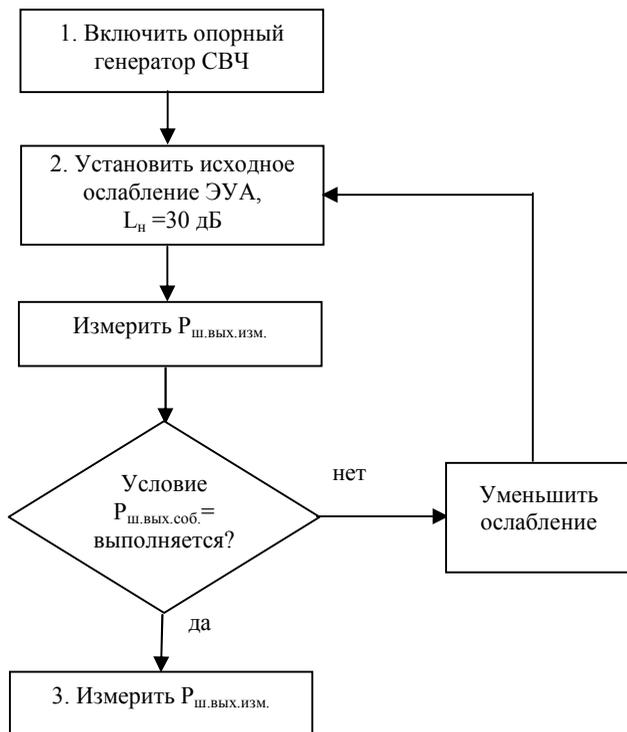


Рис.

Критерием частоты прерывания во времени для дискретного регулятора является заданная точность затухания переходного процесса во всех звеньях системы между двумя импульсами прерывателя.

Расчитать время затухания переходных процессов до заданного уровня во всех звеньях дискретного регулятора задача весьма сложная и к тому же, в связи с нестабильностью элементов, расчётное время затухания не может быть строго детерминировано при всех режимах работы регулятора. В связи с указанным, автор разработал методику контроля полного насыщения токозадающих ключей ЭУА. Указанный режим ключа наступает при завершении переходных процессов в цепях регулятора. При этом полностью будет выполнено условие устойчивости, при котором в автоматической системе регулирования (АСУ) надёжно различается разность

$$|x - x_k| \leq 0,5\eta,$$

где  $x_k$  – компенсирующий сигнал, а  $\eta$  – зона нечувствительности АСУ.

**Выводы.** Проведенное исследование позволило разработать методические основы контроля нестабильности режимов облучения биообъектов, возникающих за счет погрешностей в телекоммуникационных системах, влияние индустриальных и температурных погрешностей, нестабильности источников электромагнитных сигналов. Экспериментальное исследование показало, что время измерения величины изменения напряженности поля на входе РПУ на 1 дБ составляет 0,5 – 1 мс, при точности 0,2 – 0,3 дБ.

Разработанный алгоритм измерения нестабильности позволяет реализовать систему автоматического принятия решения о продолжении облучения биообъекта в случае граничных значений в режиме электромагнитного воздействия близких к аварийному состоянию.

**Список литературы:** 1. Радиосистемы передачи информации: Учеб. пособие для вузов / В.А. Васин, В.В. Калмыков, Ю.Н. Себекин, А.И. Сенин, И.Б. Федоров / Под ред. И.Б. Федорова и В.В. Калмыкова. – М.: Горячая линия, 2005. – 472 с. 2. Шахнович И. Современные технологии беспроводной связи. – М.: Техносфера, 2004. – 168 с. 3. Основы построения систем и сетей передачи информации: Учебное пособие для вузов / В.В. Ломовицкий, А.И. Михайлов, К.В. Шестак, В.М. Щекотихин / Под ред. В.М. Щекотихина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 382 с. 4. Адрианов В.И., Соколов А.В. Средства мобильной связи. – СПб.: ВУН – Санкт-Петербург, 1998. – 256 с. 5. Бузов Г.А., Калинин С.В., Кондратьев А.В. Защита от утечки информации по техническим каналам: Учебное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 416 с. 6. Акимов П.С., Сенин А. И., Соленов В.И. Сигналы и их обработка в информационных системах: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1994. – 256 с. 7. Бриндли К. Измерительные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 159 с. 8. Игнатов В.П. Периодические дискретные каналы с оптимальными корреляционными свойствами. – М.: Радио и связь, 1992. – 640 с. 9. Маковеева Н.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами. – М.: Радио и связь, 1997. – 528 с. 10. Корсунов А.Р. Программируемый и контролируемый аттенуатор 1...4 ГГц // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – №3. – С.121–124.

Поступила в редакцию 20.04.2007

*И.В. КОЗИН*, канд. физ.-мат. наук., ЗНУ (г. Запорожье),  
*С.А. ОСИПОВ*, ЗНУ (г. Запорожье)

## **О МЕРЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВЫБОРА В МОДЕЛЯХ МАТРИЧНЫХ ИГР**

Розроблена методика визначення кількісної оцінки ступеню нестійкості вибору в матричній грі двох осіб з нулевою сумою. Запропоновано метод знаходження міри нестійкості на основі відомих методів умовної оптимізації. Запропонована комп'ютерна система, що дозволяє знайти оцінку нестійкості вибору на основі даних про виграші гравців на множині стратегій.

A new method of finding of quantitative estimation of choice instability in two agents matrix game with zero sum is introduced. A method of measure of instability defining on the basics of known conditional optimization methods is suggested. Also a computer system that allows estimating choice instability on basics of data of agents' benefits on the set of strategies.

**Постановка проблемы.** Классические игровые модели, построенные на основе теории матричных игр [1, 2], начиная с простейшей модели матричной игры двух лиц с нулевой суммой, а также бескоалиционные матричные игры, игры с бесконечным числом стратегий и т.д. обладают рядом особенностей, которые можно определить как детерминированную неустойчивость оптимальных решений игроков. Другими словами, в этих моделях поведение игроков в общем случае достаточно трудно прогнозировать однозначно. Как правило, удается определить лишь вероятностное распределение для выбора стратегий игроков. Типичным примером такой неустойчивости является матричная игра двух лиц с нулевой суммой. При отсутствии седловой точки нет детерминированных стратегий игроков, которые являлись бы оптимальными для каждого из них. Оптимальное решение такой игры существует и может быть найдено лишь в смешанных стратегиях [3, 4]. В игровых моделях каждый игрок может выбирать свою стратегию автономно или обладая информацией о выборе стратегии другими игроками. Если выбор игрока не зависит от его знания выбора стратегий другими игроками, то выбор стратегии в игре будем называть устойчивым. Задача: для произвольной матричной игры определить меру устойчивости выбора, то есть насколько эта игра отличается от игры с устойчивым выбором.

В современных исследованиях проблематика в таком свете практически не освещена. Как правило, речь идет лишь о наличии либо отсутствии устойчивости [5, 6]. Рассматриваются некоторые виды устойчивости такие как  $\mu$ - и  $\psi$ -устойчивости [2]. Мы же в случае отсутствия устойчивости предпринимаем попытку найти игру, в которой исследуемое решение было бы устойчиво, а также определить в определенном смысле расстояние до нее. Сходная идея [7] предложена для некоторых игр в развернутой форме, где внимание уделяется порядку ходов и той информации, которая при этом

открывается игроку. Также рассматривается, так называемая, локальная устойчивость для равновесных по Нэшу решений [8].

**Цель статьи** – во-первых, для игровых моделей на основе матричной игры двух лиц с нулевой суммой получить количественную оценку устойчивости выбора игроков, во-вторых, показать, что задача такого рода сводится к решению задачи оптимизации, в-третьих, предложить алгоритм отыскания числовых оценок степени устойчивости выбора игроков в рассматриваемой игровой модели.

**Неустойчивость выбора в матричной игре двух лиц.** Исследование начнем с классической постановки для матричной игры двух игроков с нулевой суммой [1]. Стратегия игры описывается парой  $(i, j)$ , где  $i$  – номер стратегии первого игрока,  $j$  – номер стратегии второго игрока. Выигрыш первого игрока при условии выбора совместной стратегии  $(i, j)$  равен числу  $a_{ij}$ . Соответственно, выигрыш второго игрока на той же паре стратегий равен  $-a_{ij}$ . Матрица выигрышей  $A = (a_{ij})_{i,j=1}^{i=n, j=m}$  для первого игрока называется матрицей игры и полностью описывает условие игры. Матрицы выигрышей второго игрока отличается от матрицы  $A$  знаком. Выбор стратегии первого игрока осуществляется по правилу  $\min_j a_{ij} \rightarrow \max$ .

Для второго игрока правило выбора имеет вид:  $\max_j a_{ij} \rightarrow \min$ .

Если стратегия  $j = j_0$  известна первому игроку, то он будет действовать по правилу  $\min_{j=j_0} a_{ij} \rightarrow \max$ . Аналогично определяется и поведение второго игрока. Таким образом, выбор игроков не будет зависеть от предварительного знания о выборе другого игрока (будет устойчивым) лишь в случае, когда игра имеет седловую точку, то есть  $\max_j \min_j a_{ij} = \min_j \max_j a_{ij}$ .

Произвольная матричная игра может не иметь седловой точки. В этом случае естественным является вопрос, насколько эта игра далека от игры с устойчивым выбором. Будем рассматривать произвольную игру с матрицей  $A = (a_{ij})_{i,j=1}^{i=n, j=m}$  как точку в линейном пространстве размерности  $nm$ . Для двух матричных игр с одинаковым набором стратегий игроков и с матрицами  $A = (a_{ij})_{i,j=1}^{i=n, j=m}$  и  $B = (b_{ij})_{i,j=1}^{i=n, j=m}$  введем расстояние  $\rho(A, B)$  как обычное евклидово расстояние в линейном пространстве. То есть

$$\rho(A, B) = \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (a_{ij} - b_{ij})^2 \right)^{1/2}.$$

Мерой неустойчивости выбора в игре с матрицей  $A$  будем считать расстояние от этой игры до ближайшей к ней игре с седловой точкой. Таким

образом, мера неустойчивости выбора определяется формулой  $\mu(A) = \rho(A, X^0)$ , где  $X^0 = (x_{ij}^0)_{i,j=1}^{i=n, j=m}$  – оптимальное решение следующей задачи:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (a_{ij} - x_{ij})^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях

$$\max_i \min_j x_{ij} = \min_j \max_i x_{ij}. \quad (2)$$

Учитывая строгую выпуклость целевой функции (1) и замкнутость множества, на котором ищется решение задачи оптимизации, приходим к выводу, что задача (1) – (2) имеет решение для любой матрицы  $A$ . Следовательно, определение меры неустойчивости выбора корректно для любой матричной игры с нулевой суммой. Следует обратить внимание, что для устойчивых ситуаций, то есть для игр с седловой точкой, мера неустойчивости обращается ноль.

Введем два понятия для произвольной матрицы игры  $A = (a_{ij})_{i,j=1}^{i=n, j=m}$ .

Средним выигрышем будем называть величину  $\bar{A} = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij}$ , дисперсией

игры – величину  $D(A) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (a_{ij} - \bar{A})^2$ .

*Теорема 1.* Для любой матричной игры с матрицей выигрыша  $A$  справедлива оценка меры неустойчивости:

$$\mu(A) \leq \sqrt{nmD(A)}. \quad (3)$$

*Доказательство.* Выберем произвольные величины  $M$  и  $\varepsilon > 0$  и рассмотрим матричную игру  $B = (b_{ij})_{i,j=1}^{i=n, j=m}$ , где  $b_{11} = M$ ,  $b_{1j} = M + \varepsilon$ ,  $j = 2, 3, \dots, m$ ,  $b_{i1} = M - \varepsilon$ ,  $i = 2, 3, \dots, n$ . В этой игре имеется седловая точка, которая определяется парой (1, 1). Пусть  $X^0$  – оптимальное решение задачи (1) – (2). Тогда  $\mu(A) = \rho(A, X^0) \leq \rho(A, B)$  для любой матрицы  $B$  заданного типа. Расстояние между матрицами  $A$  и  $B$  определяется формулой

$$\rho^2(A, B) = (a_{11} - M)^2 + \sum_{j=2}^m (a_{1j} - M - \varepsilon)^2 + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^m (a_{ij} - M + \varepsilon)^2. \quad (4)$$

Минимум этого расстояния достигается при значении

$$M = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_{ij} + \varepsilon \left( 1 - \frac{2m-1}{nm} \right) = \bar{A} + \varepsilon \left( 1 - \frac{2m-1}{nm} \right).$$

Подставляя это значение в формулу (4) и переходя к пределу при  $\varepsilon \rightarrow 0$ , получаем неравенство (3). Конечно, оценка (3) для меры неустойчивости является достаточно грубой. Точное значение может быть получено путем решения оптимизационной задачи (1) – (2). Для отыскания приближенной оценки предложен алгоритм решения задачи условной оптимизации, основанный на методе Лагранжа и поиске по образцу [4].

Рассмотрим теперь ситуацию произвольной матричной игры двух игроков с матрицами выигрышей  $A_1$  и  $A_2$  для этих игроков соответственно. Устойчивыми в этой игре являются равновесия по Нэшу. Каждую такую матричную игру можно описать точкой в пространстве размерности  $2nm$ , координатами точки служат элементы матриц выигрышей. Мерой неустойчивости игры будем считать расстояние до ближайшей игры, в которой имеет место равновесие по Нэшу. Рассуждения, аналогичные предыдущим, приводят к следующему утверждению.

*Теорема 2.* Для любой биматричной игры с матрицами выигрышей  $A_1$  и  $A_2$  справедлива оценка меры неустойчивости  $\mu(A_1, A_2) \leq \sqrt{nmD(A_1) + nmD(A_2)}$ .

**Выводы.** В результате проделанной работы была разработана методика определения количественной оценки степени неустойчивости выбора в матричной игре двух лиц с нулевой суммой. Предложен метод отыскания степени неустойчивости на основе известных методов условной оптимизации. Предложена компьютерная система, позволяющая найти оценку неустойчивости выбора на основе данных о выигрышах игроков на множестве стратегий. Дальнейшее развитие работы направлено на исследование устойчивости в играх с непрерывным множеством стратегий, а также в кооперативных играх и играх с числом игроков более чем 2.

**Список литературы:** 1. Данилов В.И. Лекции по теории игр. – М.: Российская экономическая школа, 2002. – 140 с. 2. Оуэн Г. Теория игр, 2004. – 216 с. 3. Таха Х. Введение в исследование операций. – Т. 2. – М.: Мир, 1985. – 496 с. 4. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1990. – 232 с. 5. Петросян Л.А., Зенкевич Н.А., Семлина Е.А. Теория игр. – М.: Книжный дом "Университет – Высшая школа", 1998. – 301 с. 6. Харшаньи Д, Зельтен Р. Общая теория выбора равновесия в играх // Под ред. Зенкевича Н.А. – СПб.: Эконом. шк., 2001. – 406 с. 7. Петросян Л.А., Кузютин Д.В. Игры в развернутой форме: оптимальность и устойчивость. – СПб: Изд-во СПбГУ, 2001. – 292 с. 8. Мулен Э. Кооперативное принятие решений: Аксиомы и модели. – М.: Мир, 1991. – 464 с.

*Поступила в редакцию 20.04.2007*

*С.Л. КУЗЬМЕНКО*, НТУ "ХПИ",  
*Е.Б. ЯЛОВКИНА*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ"

## СИСТЕМА ОБРАБОТКИ ЦВЕТОВОЙ ИНФОРМАЦИИ В ГЛУБОКОЙ ПЕЧАТИ

Для передпечатной обработки цветовой информации запропоновано систему, засновану на трьохетапній схемі автоматизації. Ймовірна реалізація заснована на такому використанні ICC-профільів пристроїв комп'ютерної периферії, яке дозволяє виконати перетворення даних з кольорового охопту зображення-оригіналу в кольоровий охопту кінцевого друкового пристрою. Система програмно реалізується для комплексу глибокого друку на підприємстві "КЦП Україна – Юнь Чень".

We propose a three-stage automated system for preprocessing color information in printing. It uses ICC-profiles in a way that makes possible converting source gamut data into the gamut of printing equipment. Currently system programly realizing for intaglio complex at "Company of color polygraphy Ukraine – Un Chen" enterprise.

**Постановка проблеми.** На современном уровне развития технологий полиграфии особенно актуальным становится вопрос организации правильной цветопередачи между базовой системой и различными устройствами периферии. Под этим понимается защита заказанного цвета от неизбежных искажений на различных этапах полиграфического производства, а также любого производства промышленных изделий [1 – 5].

Общая схема печатного производства [6] представлена на рис. 1. Как видно из схемы, основная часть предпечатной обработки цветовой информации выполняется в отделе технологии и дизайна (ОТД), а основные проблемы цветопередачи возникают на участках 1, 3.



Рис. 1. Общая схема печатного производства

В настоящее время в практике полиграфии очень ответственный этап цветокоррекции выполняется "вручную", если под этим термином понимать работу дизайнера в среде графических пакетов с визуальной оценкой полученных результатов, что ведет к неоправданным затратам рабочих ресурсов (машинное время, квалификация специалиста). Сам по себе, процесс

цветокоррекции обеспечивается корректным подбором профилей устройств, причем в соответствии со стандартом определены следующие типы ИСС-профилей: профили входных устройств; профили мониторов; профили всех выводных устройств. Поэтому разработка системы автоматизации цветокоррекции изображений в полиграфическом производстве, в котором задействованы все типы устройств, является актуальной задачей, решение которой в настоящее время не получило должного освещения в литературе.

**Цель статьи.** Представить результаты по разработке системы предпечатной подготовки изображения, призванной обеспечить точный результат цветопередачи от первоначального оригинала к готовой печатной продукции производства глубокой печати [4, 5, 7].

**Основной материал.** Необходимость в подобных системах основана на следующих факторах:

- система управления цветом должна обеспечивать поддержку самых разнообразных устройств;
- изображение может быть создано в одном месте, а его отображение может происходить в другом, географически отдаленном месте;
- нужно обеспечить воспроизведение одного и того же изображения на различных носителях (например, в печати, в кино и видео), используя одни и те же инструменты и процессы.

Решение вопросов обработки цветовой информации связано с теоретическими результатами колориметрии, систематизацию которых можно датировать 1931 годом, когда в Париже начала работать Международная комиссия по освещению (МКО или *CIE*) [8].

Основные цвета  $X, Y, Z$  модели МКО  $XYZ$  задаются соотношениями:

$$X = \int I(\lambda) \bar{x} d\lambda, \quad Y = \int I(\lambda) \bar{y} d\lambda, \quad Z = \int I(\lambda) \bar{z} d\lambda, \quad (1)$$

где  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  – стандартные кривые для гипотетического идеального наблюдателя [8 – 9], введенные МКО при разработке основ колориметрии и аналогичные соотношениям для триады

$$R = \int I(\lambda) P_R(\lambda) d\lambda, \quad G = \int I(\lambda) P_G(\lambda) d\lambda, \quad B = \int I(\lambda) P_B(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где  $P_R(\lambda), P_G(\lambda), P_B(\lambda)$  – весовые функции чувствительности колбочек глаза человека, реагирующих на цвета  $RGB$ , соответственно.

Исходные положения колориметрии (1) – (2) позволяют на основе базовой цветовой модели МКО  $XYZ$  получить расчетные формулы для определения профилей различных устройств ввода-вывода, использующих цветовую модель  $L^*a^*b^*$  [3, 8, 9]). Преобразование пространства  $XYZ$  в цветное пространство  $L^*a^*b^*$  выполняется по формулам:

$$L^* = 116 (Y/Y_n)^{1/3} - 16, \quad Y/Y_n \geq 0,008856 \quad \text{и} \quad L^* = 903 Y/Y_n, \quad Y/Y_n \geq 0,008856, \\ a^* = 500 \times (f(X/X_n) - f(Y/Y_n)), \quad b^* = 200 \times (f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)), \quad (3)$$

где  $f(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3}$  при  $X/X_n \geq 0,008856$ ,  $f(X/X_n) = 7,787(X/X_n) + 16/116$  при  $X/X_n < 0,008856$ ,  $X_n, Y_n$  – координаты белой точки эталона [8, 9], соответственно определяются и значения  $f(Y/Y_n)$  и  $f(Z/Z_n)$ .

После этого расчетные формулы для профилей устройств, использующих другие цветовые модели, выводятся на основе переходов от аппаратно-независимой модели  $L^*a^*b^*$  к соответствующей цветовой модели [9].

При отслеживании тиража "вручную" возникают следующие проблемы:

- при запуске тиража профили, сохраняющие заказанный цвет, должны настраиваться в среде графических пакетов на визуальном уровне;
- при амортизации устройств во время прохождения тиража необходимая корректировка, снимающая искажения, выполняется опять на визуальном уровне.

Поэтому, точный расчет профилей устройств по формулам (3) необходим на уровне автоматизации описанных проблем цветокоррекции, возникающих в процессе прохождения всего тиража. Такая автоматизация может быть обеспечена системой со следующей структурной схемой (рис. 2).

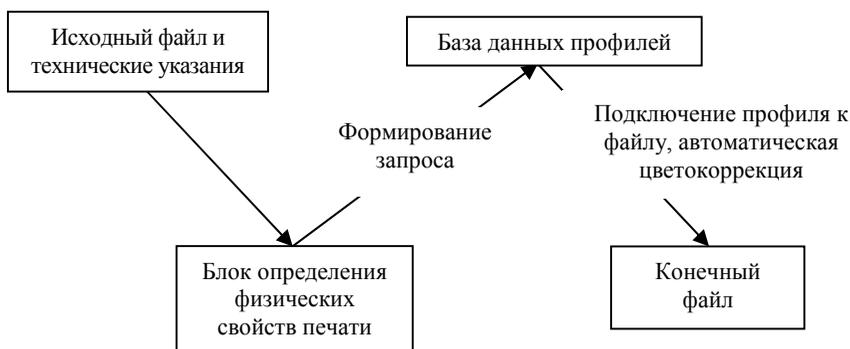


Рис. 2. Схема автоматизации

В схеме предлагаемой системы автоматизации выделяются три основных этапа:

1. При создании документа в него встраивается *ICC*-профиль, с помощью которого производится отображение цветового охвата устройства в цветовое пространство *CIE* (*XYZ* или *LAB*).

2. Сканирование и открытие изображения программным инструментом, а также перевод отсканированного изображения в цветовое пространство монитора или другого выходного устройства или вставка изображений в программы верстки.

3. При выводе документа операционная система использует входной профиль первого этапа и выходной профиль второго этапа для преобразования

данных из цветового охвата источника в цветовой охват конечного печатного устройства.

Все три этапа отлаживаются в среде программного комплекса "DeerICC", их выполнение происходит следующим образом:

1. По техническим указаниям ОТД, сформированным на основе приема и анализа заказа, выполненным согласно стандарта предприятия, определяется конечный набор печатных материалов (краска, пленка, тип печатной машины). В результате, формируется запрос в виде трехзначного числа (первая цифра соответствует индексу вида печати, вторая и третья – индексу пленки и краски соответственно). Затем запрос посылается в базу данных.

2. Из базы извлекается заранее созданный профиль, содержащий информацию обо всех искажениях цвета, соответствующих свойствам печатных материалов, и подключается к рабочему файлу \*.TIF.

3. На основе информации, содержащейся в профиле, производится автоматическая цветокоррекция рабочего файла, с целью компенсации искажений цвета, допущенных в процессе печати (см. рис 1).

**Практическая реализация** системы предпечатной обработки выполняется на предприятии "КЦП Украина – Юнь Чень" под технологию глубокой печати. Создан программный пакет "DeerICC", содержащий набор ICC-профилей устройств соответствующего печатного комплекса, и с помощью которого автоматизируется этап цветокоррекции (см. рис. 2).

**Выводы.** Полученные результаты позволяют реализовать автоматизацию цветопередачи в технологическом процессе. Без автоматизации присутствует жесткая необходимость отслеживать соответствие пробопечати с заказом, что требует обратной связи с ОТД и выполнения визуальной коррекции. С учетом предлагаемого решения становится возможным свести анализ пробопечати до уровня проверки механических дефектов печатных материалов. Развитие этого подхода предполагается выполнить для технологий флексографии, высокой и офсетной печати с учетом их особенностей [7].

**Список литературы:** 1. Джадд Д., Вышецки Г. Цвет в науке и технике. – М.: Мир, 1978. – 592 с. 2. Глушаков С.В., Кнабе Г.А. Компьютерная графика. – Харьков: Фолио, М.: АСТ, 2001. – 500 с. 3. Айриг С., Айриг Э. Подготовка цифровых изображений для печати. – Мн.: ООО "Попурри", 1997. – 192 с. 4. О'Квин Д. Допечатная подготовка: руководство дизайнера. – М.: Вильямс, 2002. – 506 с. 5. Иванова Т. Компьютерная допечатная подготовка. – СПб.: Питер, 2004. – 304 с. 6. Кузьменко С.Л., Холодная З.Б., Яловкина Е.Б. Предпечатная обработка цветовой информации // Системы обработки информации. – 2007. – Вып. 1 (59). – С. 69–71. 7. <http://www.color.org/wpaper1.html>. 8. Прет У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – Кн.1. – 312 с. 9. Шикин Е.В., Боресков А.В. Компьютерная графика. Полигональные модели – М.: ДИАЛОГ–МИФИ, 2000. – 461 с.

*Поступла в редакцию 20.04.2007*

*І.В. МАГДАЛИНА*, канд. техн. наук, ХНУВС (м. Харків)

## **ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ПІДРОЗДІЛІВ ОРГАНІВ ВНУТРІШНІХ СПРАВ**

Запропоновано один з можливих підходів до моделювання роботи практичних підрозділів органів внутрішніх справ, який оснований на методах імітаційного моделювання. Будується інформаційно-обчислювальна система і проводиться аналіз ефективності роботи підрозділів органів внутрішніх справ.

One of possible approaches to modeling work of practical divisions of the law-enforcement bodies, based on methods of imitating modeling is offered. The information system is under construction and the analysis of an overall performance of divisions of law-enforcement bodies is spent.

**Постановка проблеми:** у райвідділ міліції надходить інформація про події, що повинні бути оброблені працівниками ОВС. Черговий ОВС зобов'язаний прийняти інформацію, зареєструвати і при необхідності передати слідчо-оперативній групі. По приїзду слідчо-оперативної групи черговий райвідділу збирає отриманий матеріал і передає начальнику слідчого відділу (райвідділу), що може прийняти наступні рішення: порушити кримінальну справу; відмовити в порушенні кримінальної справи; передати матеріали по належності.

Збуджені кримінальні справи передаються слідчим чи у відділ дізнання для подальшого розслідування. Результатом роботи слідчого відділу можуть бути наступні рішення: припинення справи за відсутністю складу злочину; передача кримінальної справи в суд з обвинувальним вироком; припинення кримінальної справи і передача в суд для вживання примусових заходів медичного чи виховного характеру.

Також існує можливість доповнення (уточнення) кримінальних справ при проведенні додаткових слідчих дій чи передачі кримінальних справ іншому слідчому (повернення кримінальних справ на доробку).

Таким чином, необхідно побудувати імітаційну модель роботи райвідділу ОВС і визначити основні показники ефективності роботи основних компонентів моделі.

**Аналіз літератури,** пов'язаний з роботою практичних органів ОВС [1, 2] та імітаційним моделюванням [3, 4, 5] дозволяє зробити висновки про можливість застосування засобів імітаційного моделювання для проблеми, яка розглядається.

Таким чином, **метою статті** є розробка моделі роботи підрозділу ОВС засобами імітаційного моделювання та визначення основних показників роботи цього підрозділу за допомогою побудованої моделі.

Схематично модель [6, 7] розглядаємої задачі можна представити в наступному виді (рис.1):

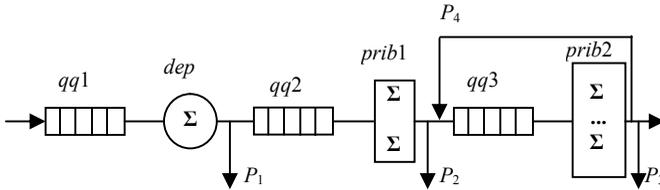


Рис. 1

На рис. 1 наведені наступні позначення:

*qq1* – черга інформації, що надходить у райвідділ;

*qq2* – черга інформації, що надійшла, яка повинна бути перевірена слідчо-оперативними бригадами;

*qq3* – черга кримінальних справ, збуджених за матеріалами перевірки слідчо-оперативних бригад;

*dep* – прилад, що обробляє інформацію, яка надходить до райвідділу (відповідна посадова особа);

*prib1* – багатоканальний прилад, що обробляє отриману інформацію (слідчо-оперативні бригади, що виїжджають на місце здійснення правопорушення);

*prib2* – багатоканальний прилад, що розслідує збуджені кримінальні справи (слідчий відділ);

$P_1$  – імовірність того, що інформація, яка надійшла, не буде розглядатися в райвідділі;

$P_2$  – імовірність того, що буде відмовлення порушення кримінальної справи після перевірки інформації, що надійшла, слідчо-оперативними бригадами;

$P_3$  – імовірність того, що після розслідування кримінальної справи вона буде припинена;

$P_4$  – імовірність того, що розслідувана кримінальна справа буде повернута на доповнення (уточнення);

В якості засобу імітаційного моделювання скористаємося системою GPSS Word Student [8] і представимо програму моделювання в наступному виді (рис. 2). Схематично програма складається з трьох частин, кожна з котрих програмує роботу відповідного пристрою (*dep*, *prib1* та *prib2*). При цьому пристрій *prib1* містить два канали, а пристрій *prib2* – п'ятнадцять каналів.

Вхідні параметри роботи системи підібрані, виходячи із середньостатистичних показників роботи одного з райвідділів ОВС м. Харкова за місяць, при цьому в якості умовного модельного часу використовуються хвилини реального часу.

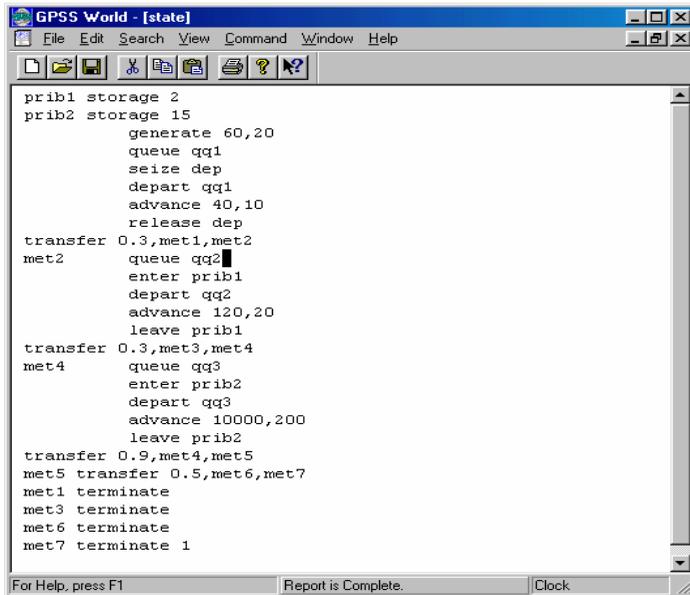


Рис. 2

Вхідні параметри наступні:

- надходження інформації в райвідділ – через кожні (40 – 80) хв.;
- реєстрація й обробка інформації, що надійшла, відповідною посадовою особою – (30 – 50) хв.;
- імовірність  $P_1$  – 70%;
- кількість слідчо-оперативних бригад – 2;
- час роботи однієї слідчо-оперативної бригади – (100 – 140) хв.;
- імовірність  $P_2$  – 70%;
- кількість слідчих райвідділу – 15;
- час розслідування однієї кримінальної справи – (8000 – 10200) хв.;
- імовірність  $P_3$  – 50%;
- імовірність  $P_4$  – 10%.

Після моделювання роботи побудованої інформаційної системи одержимо наступні результати:

- надійшло інформації про правопорушення – 1094;
- слідчо-оперативні бригади виїжджали 329 разів;
- було порушено 108 кримінальних справ;
- на етапі розслідування залишилися 25 кримінальних справ;
- доповнювалися на етапі розслідування 10 кримінальних справ;
- 38 кримінальних справ були припинені;
- 34 кримінальної справи були передані в суд.

Отримані результати моделювання відповідають середнім показникам роботи райвідділу за місяць.

Основні параметри роботи побудованої системи приведені в таблиці.

Таблиця

Пристрій / черга	Число каналів	Число заявок, що ввійшли	Число заявок з нульовими входженнями	Середнє число заявок	Середн. час перебування заявки, хв.	Макс. число заявок	КПД
Черга qq1		1094	1003	0,006	0,343	1	
Черга qq2		329	310	0,006	1,225	1	
Черга qq3		108	19	5,86	3526,494	12	
Прилад dep	1	1094			39,888		0,672
Прилад prib1	2	329		0,601		2	0,301
Прилад prib2	15	97		13,724		2	0,915

Таким чином, можна зробити **наступні висновки**.

У цілому система працює ефективно, за винятком приладу *prib1* (слідчо-оперативні бригади), коефіцієнт корисної дії якого 0,301 (що вказує на недостатню завантаженість даного приладу). Коефіцієнти корисної дії приладів *dep* (посадова особа, що приймає інформацію) і *prib2* (відділ, що проводить розслідування кримінальних справ) близькі до оптимальних значень. Черга *qq1* (черга інформації, що надходить,) і черга *qq2* (черга інформації, що підлягає перевірці) практично не затримують проходження заявок (максимальна довжина черги за весь час роботи системи – 1 заявка, що знаходиться в черзі близько 1 хвилини, середня довжина черги – 0,006 заявок). Черга *qq3* (черга розслідуваних кримінальних справ) працює менш ефективно (максимальна довжина черги – 12 заявок, середній час перебування заявки в черзі – 3526 хвилин, середнє число заявок – 5, 6), що можна пояснити недостатньою кількістю каналів приладу *prib2* (кількість слідчих слідчого відділу) чи великим часом обробки однієї заявки (час розслідування однієї кримінальної справи).

**Список літератури:** 1. Денісова О.О. Інформаційні системи і технології в юридичній діяльності. – К.: КНЕУ, 2003. – 315 с. 2. Саницький В.А. та ін. Система інформаційного забезпечення ОВС України. Навч.-практ. посібник. – К.: "АНЕТКС", 2000. – 144 с. 3. Бражнік А.Н. Имитационное моделирование: возможности GPSS WORLD. – СПб.: "Реноме", 2006. – 439 с. 4. Томашевский В., Жданова Е. Имитационное моделирование в среде GPSS. – М.: "БЕСТСЕЛЛЕР", 2003. – 416 с. 5. Кузьменко В.М. Специальные языки программирования. Программные и инструментальные средства моделирования сложных систем. – Харьков, 2001. – 244 с. 6. Томашевский В.Н., Данова Е.Г., Жолдаков А.А. Решение практических задач методами компьютерного моделирования. – К.: "Корнійчук", 2001. – 268 с. 7. Сьтнік В.Ф., Орленко Н.С. Имитационное моделирование: Учебно-методическое пособие. – Киев: КНЕУ, 1999. – 208 с. 8. Баев В.Ф. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS WORD. Уч. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 360 с.

Поступила в редакцію 10.04.2007

*Н.И. МАЗНИЧЕНКО*, НЮАУ (г. Харьков)

## **ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ И ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ БИОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЛИЧНОСТИ**

Статья посвящена практическим аспектам внедрения биометрических технологий, основным областям вживания биометрии, особенностям її використання і підходам до побудови біометричних систем. Сформульовані критерії якості біометричних систем, методи їх оцінки і визначені вимоги для того або іншого вживання.

This article is devoted to the practical aspects of introduction of biometric technologies, basic regions of the use of biometric, features of its use and approaches to construction of the biometric systems. Formulated criteria of quality of the biometric systems, methods of their estimation and the requirements for every concrete application are definite.

**Введение.** В конце XX века интерес к биометрии значительно возрос. Основное достоинство биометрии – она позволяет идентифицировать человека с помощью его самого же. Сегодня стала очевидной необходимость точной идентификации в местах массового скопления людей, при контроле пропусков и сверке документов. В первую очередь проблема коснулась безопасности транспортных, а также государственных и межгосударственных систем – паспортных, визовых, таможенных, миграционных служб. Обычных методов контроля стало явно недостаточно. Все надежды теперь связаны с использованием биометрических технологий, позволяющих проверять личности огромного количества людей, проходящих через точку контроля [1].

**Анализ литературы.** Большое количество научных исследований и публикаций по данной теме свидетельствует о повышенном интересе к данному направлению. В 2002 г. было создано Русское биометрическое общество (<http://www.biometrica.ru>), сотрудники которого: Спиридонов И.Н., Дунаев Д.Ю., Климакин С.П., Петруненко А.А. внесли значительный вклад в становление теоретических основ данного направления. Серьезные исследования данной проблемы проводили так же ученые Шаров В. [2], Лакин Г.Ф. [3], Чернявский Ю.А. [4], Федоров В.Ю. [5] и др. Компании НПО "Информация" и "A4Vision" предлагают актуальные решения в области биометрических и интеллектуальных систем безопасности. Однако необходимо, рассмотрев накопленный опыт научных исследований и практических применений, более четко сформулировать основные направления в применении современных биометрических систем, принципы их построения, обозначить перспективные направления использования.

**Цель статьи.** Несмотря на лавинный и стремительный спрос на биометрию, необходимо объективно и взвешенно ответить на главный вопрос: "Насколько готовы сами технологии справиться с возложенными на них

задачами?" Необходимо сформулировать критерии качества биометрической системы, методы их оценки и определить требования для того или иного применения. Этому и посвящена данная статья.

**Изложение основного материала.** Под биометрическими технологиями понимают автоматические или автоматизированные методы распознавания личности человека по его биологическим характеристикам или проявлениям. Основные составляющие биометрического метода – это сканер для измерения биометрической характеристики и алгоритм, позволяющий сравнить ее с предварительно зарегистрированной той же характеристикой (так называемым биометрическим шаблоном). Возможны два режима работы системы – верификация (сравнение одного с одним) и идентификация (сравнение одного с многими). При всем теоретическом многообразии возможных биометрических методов (отпечаток пальца, геометрия кисти руки, форма лица, радужная оболочка глаза, сетчатка глаза) применимых на практике среди них немного. Основных методов три – распознавание по отпечатку пальца, по изображению лица (двухмерному или трехмерному – 2D- или 3D-фото) и по радужной оболочке глаза [6].

Рассмотрим области, в которых биометрия уже активно используется на протяжении нескольких лет, и отдельно остановимся на новых перспективных направлениях ее использования.

**Компьютерная безопасность.** В этой области биометрия используется для замены (или усиления) стандартной процедуры входа в различные программы по паролю, смарт-карте и т. д.

Самое распространенное решение на базе биометрических технологий – это идентификация (или верификация) по биометрическим характеристикам в корпоративной сети или при входе на рабочую станцию (персональный компьютер, ноутбук и т. д.) [7].

При защите рабочей станции создаются шаблоны биометрических данных (например, отпечатков пальцев) зарегистрированных пользователей, которые находятся в защищенном хранилище непосредственно на рабочей станции. После успешного прохождения процедуры идентификации пользователю предоставляется доступ.

При реализации технологии в корпоративной сети шаблоны биометрических данных всех пользователей сети хранятся централизованно на специально выделенном сервере аутентификации. При входе в сеть пользователь, проходя процедуру биометрической идентификации, работает непосредственно со специализированным сервером, на котором и проверяются предоставляемые идентификаторы. Выделение в структуре корпоративной сети отдельного сервера биометрической аутентификации позволяет хранить на таком сервере конфиденциальную информацию, доступ к которой будет предоставлен только по биометрическому идентифицирующему признаку владельца информации.

В данной области нашли применение следующие технологии

распознавания: отпечаток пальца, радужная оболочка глаза, голос, почерк, клавиатурный набор.

Торговля. В нашей стране эта область пока не развита, но на Западе получила достаточно широкое распространение. В первую очередь это касается распознавания отпечатка пальца и формы руки. Внедрение биометрии в торговле идет по следующим направлениям:

- в магазинах, ресторанах и кафе биометрические идентификаторы используются как средство идентификации покупателя и последующего снятия денег;

- в торговых автоматах и банкоматах как средство идентификации человека (взамен магнитных карточек или в дополнение к ним);

- в электронной коммерции биометрические идентификаторы используются как средство дистанционной идентификации через Интернет, а в сочетании со средствами криптографии дают электронным транзакциям очень высокий уровень защиты.

Системы контроля и управления доступом в помещения. Системы на базе биометрических технологий для контроля доступа (СКУД) в принципе аналогичны решениям для входа в сеть. Цифровые шаблоны биометрических характеристик человека заносятся в память дверного замка или турникета, после чего при каждом входе (выходе) человеку нужно пройти процедуру биометрической идентификации для открытия двери (отсканировать палец, сетчатку глаза или произнести кодовую фразу) [8].

В СКУД реализуются следующие технологии распознавания: отпечаток пальца, лицо, форма руки, радужная оболочка глаза, голос.

Иногда на основе таких систем дополнительно создается подсистема учета рабочего времени. В этих случаях используются биометрические замки с сетевой архитектурой или обычные системы биометрического сканирования.

Системы гражданской идентификации и автоматизированные дактилоскопические идентификационные системы (АДИС). Системами гражданской идентификации принято называть общегосударственные биометрические системы идентификации личности при выдаче документов, пересечении границ, распределении пособий и дотаций. В настоящее время такие системы получили самое широкое распространение, поскольку они стали использоваться при въезде в некоторые страны для проверки личности въезжающих [9]. В первую очередь это касается США, в ближайшее время похожую систему планирует ввести Европейский Союз и Россия. Страны-участницы Шенгенского соглашения уже договорились изменить формат въездных виз, в которые теперь будут записываться биометрические данные. Аналогичные программы начались во многих странах Азии.

Необходимо различать системы гражданской идентификации (по принятой в зарубежных странах терминологии, системы Civil ID) и криминалистические автоматизированные дактилоскопические идентификационные системы – АДИС (AFIS). Параметры этих систем

принципиально различаются.

В отличие от криминалистических приложений, которые требуют получения отпечатков всех десяти, гражданские приложения требуют изображений отпечатков двух пальцев. Одно из наиболее важных различий этих систем – полностью автоматический поиск и принятие решения в Civil ID-системах и необходимость работы высококвалифицированного эксперта криминалиста в криминалистических АДИС [10].

Комплексные системы. Это системы, сочетающие в себе системы первых трех классов. Например, совместное использование СКУД и компьютерной безопасности с единым для обеих систем сервером аутентификации, т. е. сотрудники компании регистрируются у администратора системы всего один раз, дальше ему автоматически назначаются все необходимые привилегии как на вход в помещение, так и на работу в корпоративной сети и ее ресурсы.

Кроме этих основных секторов применения, в настоящее время начинается активное использование биометрии и в других областях:

- игровой бизнес, казино. Биометрия используется по двум направлениям: проверка всех находящихся по "черным спискам" (аналог массовой идентификации по лицам, применяемой в аэропортах), а также как система идентификации и платежное средство постоянных клиентов;

- идентификация в мобильных устройствах, таких, как мобильные телефоны, КПК и т. д.;

- в транспорте как платежное средство;

- электронные системы голосования (используются вместо карточек);

- медицина. Биометрия применяется для идентификации медицинских работников при получении доступа к закрытым данным и для электронной подписи записей в истории болезни.

Общепринятых критериев, которые можно было использовать при построении биометрических систем в масштабах какого-либо предприятия, нет. Поэтому в этой статье будут даны только рекомендации, полученные из опыта внедрения биометрических систем.

Итак, первое, с чем необходимо определиться, – это непосредственно технология распознавания, которую предстоит использовать. Для этого нужно руководствоваться сочетанием двух критериев.

Точность технологии. Качественными показателями функционирования алгоритмов биометрической идентификации служат значения: FAR (False Acceptance Rate) – достоверность ошибочного распознавания, то есть достоверность того, что система спутает два индивидуума, признав "чужого" "своим"; FRR (False Rejection Rate) – достоверность ошибочного нераспознавания, то есть того, что система не распознает знакомого ей субъекта (достоверность не пропуска "своего").

На практике уменьшение FAR всегда приводит к уменьшению чувствительности метода или, что эквивалентное, к увеличению FRR [4]. Идеальные характеристики системы – это разнесенные показатели ошибки и

отказа идентификации, когда одновременно при большой надежности идентификации (ошибка 0,0001%) достигается отказ идентификации всего доли процента.

Показатель ошибки идентификации определяется выбранным подходом, качеством реализации и настройки алгоритмов идентификации. Для каждого конкретного производителя и его оборудования FAR и FRR указываются точно. Отметим, что показатели меняются в зависимости от производителя и погрешности тестирования, но важно то, что три метода распознавания – по отпечатку пальца, по трехмерному изображению лица, по радужной оболочке глаза – обладают сравнимой точностью. При этом распознавание по двумерному изображению лица уступает перечисленным методам по точности на порядок, равно как и другие биометрические методы (расознавания по геометрии руки, по голосу и т. д.).

Удобство использования. Нужно предусмотреть, чтобы сотрудникам компании было удобно проходить биометрические процедуры идентификации в рамках решаемой задачи.

После выбора технологии предстоит выбрать изготовителя оборудования, которое удовлетворяло бы вашим требованиям, и, что не менее важно, представителя компании-производителя в стране.

Устойчивость к окружающей среде. Эксплуатационные качества разных биометрических методов сильно зависят от окружающих условий и могут терять стабильность при изменении этих условий. Так, сканеры отпечатков пальцев постоянно загрязняются и качество работы их падает, двумерные методы распознавания лица сильно зависят от внешней освещенности и т. д.

Устойчивость к подделке. Биометрическая система должна быть устойчивой к подделке (несанкционированному доступу). Систему распознавания по двумерному (2D) изображению лица можно легко "обмануть", предъявив фотографию из числа знакомых системе. Для получения несанкционированного доступа по отпечатку пальца бывает достаточно нанести графитовую пудру и надавить через тонкую пленку.

Стоимость системы. Вопреки мнению о дороговизне внедрения биометрических систем, за последние пять лет их цена в среднем снизилась в 2 – 3 раза. При оценке системы нужно учитывать, что ее стоимость складывается из многих составляющих. Например, для сетевой защиты – это считывающие устройства, сервер аутентификации и пользовательские лицензии к нему, услуги по внедрению и сопровождению и, если требуется, отдельно разработка модуля интеграции с каким-либо специальным корпоративным программным обеспечением.

Скорость работы биометрической системы. С этим критерием ситуация очевидна: чем быстрее пользователь распознается в системе, тем лучше. Нужно отметить, что скорость зависит от выбора метода распознавания: верификации или идентификации, так как очевидно, что сравнение шаблонов "один к одному" намного быстрее сравнения одного шаблона со всей базой

зарегистрированных.

Кроме этого, существует еще несколько критериев оценки биометрических систем, но они носят частный характер для каждой технологии.

**Выводы.** Применение биометрических технологий постепенно переходит из области альтернативы другим системам идентификации (карточным, парольным и т. д.) в области, в которых разворачивается конкуренция только между методами биометрической идентификации.

Одна из причин популярности биометрических систем сводится к объективной потребности заказчиков организовать современную, грамотно построенную систему безопасности у себя на предприятии, в офисе компании или в частном доме. Большинство прогнозов сводится к тому, что внедрение биометрических систем безопасности на отечественный рынок приобретет в скором будущем лавинный характер. Интенсивное развитие мультимедийных, цифровых технологий и, как следствие, их удешевление позволяют не только разработать принципиально новые подходы в проблеме идентификации личности, но и внедрить их в широкое повсеместное использование. В настоящий момент совершенствование биометрических технологий происходит ускоренными темпами. В первую очередь это приводит к тому, что повышается надёжность и снижается стоимость данных технологий.

**Список литературы:** 1. Вакуленко А., Юхин А. Биометрические методы идентификации личности: обыкновенный выбор // Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции "Мировой опыт применения биометрических решений в составе комплексных систем безопасности". – К.: "Информация-Украина". – 2006. – С. 79–82. 2. Шаров В. Биометрические методы компьютерной безопасности // "ВУТЕ". – 2005. – № 4. – С. 32–35. 3. Лакин Г.Ф. Биометрия. Учебное пособие. – М.: Высшая школа. – 1990. – 223 с. 4. Чернявский Ю.А. Способы анализа качественных характеристик автоматизированных дактилоскопических идентификационных систем. – М.: Политехник. – 2004. – 315 с. 5. Федоров В.Ю. К вопросу об исследовании идентификационных признаков папиллярных узоров в АДИС // Проблемы совершенствования правоохранительной деятельности ОВД. Межвузовский сборник научных трудов. Ч.1. – М.: МЮИ МВД России. – 2000. – С. 36–39. 6. Животовский Л.А. Популярная биометрия. – М.: Наука. – 1991. – 287 с. 7. Попов М. Технологии биометрической идентификации // СНІР. – 2005. – № 9. – С. 45–47. 8. Умнов А. Опыт применения биометрических решений в составе систем контроля доступа // Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции "Мировой опыт применения биометрических решений в составе комплексных систем безопасности". – К.: "Информация-Украина". – 2006. – С. 52–57. 9. Дудка В. Опыт и перспективы применения биометрии в системах оперативной гражданской идентификации личности // Сборник научных трудов I Международной научно-практической конференции "Мировой опыт применения биометрических решений в составе комплексных систем безопасности". – К.: "Информация-Украина". – 2006. – С. 22–25. 10. Федоров В.Ю. Об использовании оперативной идентификации в автоматизированных дактилоскопических учетах // История и современность экспертно-криминалистической службы. Межвузовский сборник научных трудов. – М.: МЮИИИ МВД России. – 1999. – С. 22–29.

*Поступила в редакцию 30.03.2007*

*И.И. ОБОД*, д-р техн. наук,  
*Д.А. ГРИБ*, канд. техн. наук,  
*В.П. ГОЛОВАНОВ*

## **ИЗМЕРЕНИЕ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ**

Надаються розрахунки показників якості вимірювання азимуту об'єктів у ідентифікаційній системі, яка утворена системами радіолокаційного опізнавання та вторинної радіолокації.

The calculations of quality indexes of objects azimuth measuring in the identification system, which formed by systems of radiolocation identification and secondary radiolocation are given.

**Постановка проблемы.** Решение задач, стоящих перед Воздушными Силами, во многом определяется информационным обеспечением (ИО). Основой ИО являются системы первичной радиолокации. Однако обеспечивающими, а иногда и основными информационными системами (ИС) являются запросные радиотехнические системы (РТС). Запросные РТС предназначены для решения следующих задач: определения координат летательного аппарата (ЛА); получения дополнительной полетной информации, необходимой для контроля и управления полетами и наведения ЛА; радиолокационного опознавания государственной принадлежности (идентификация) обнаруженных воздушных объектов (ВО); диспетчерского опознавания ЛА. Система радиолокационного опознавания (РЛО) государственной принадлежности обнаруженных объектов является важной обеспечивающей системой. Она должна решать задачу идентификации как в интересах определения степени опасности обнаруженной цели, так и при непосредственном применении оружия. Однако, принцип построения ответчиков, принцип обслуживания запросных сигналов и принцип построения сети систем РЛО [1, 2] предопределили крайне низкую помехоустойчивость рассматриваемых систем. В связи с этим вопросы, касающиеся повышению помехоустойчивости рассматриваемых систем, являются актуальными.

**Анализ литературы.** Опыт ведущих стран мира свидетельствует, что в них уже довольно длительный срок существуют национальные единые системы контроля использования воздушного пространства. Одной из составляющих такой системы является ИС систем наблюдения (СН) [1 – 3]. Сетевому построению СН уделяется значительное внимание [3, 4]. Основой при этом является – объединение в общую ИС информации существующих СН различных ведомств и централизованное управление этой сетью. Объединенная информация сети выдается потребителям. Однако низкая помехоустойчивость

идентификационных систем, информация которых крайне важна для потребителей, стимулирует поиск новых принципов организации единой ИС, в которой сочеталось бы полное и надежное информационное обеспечение потребителей, а также разрешались проблемы функционирования отдельных СН (в частности, идентификационных систем). При этом следует отметить, что идентификация объектов в ИС осуществляется путем выдачи координатной информации идентифицированных объектов.

**Цель работы.** Исследование показателей качества измерения координат ВО в СН, образованной системами РЛО и вторичной радиолокации (ВРЛ).

**Основная часть.** В настоящее время широко используется возможность к комплексированию существующих СН для повышения качества измерения координат ВО [4, 5]. Комплексирование информации при этом возможно как совместных или совмещенных, так и рассредоточенных систем наблюдения. Это несколько изменяет структуру ИС. При идентификации ВО может быть использована информация систем РЛО, систем ВРЛ, встроенного канала ВРЛ, а также канала индикации радиосистем ближней навигации [6, 7].

Предположим, что одновременно производится оценка вектора измерения  $\vec{\alpha}$  в  $M$  СН. Если задаться нормальным законом распределения каждой из составляющих вектора  $\vec{\alpha}$ , то, учитывая некоррелированность измерений в каналах обработки, логарифм отношения правдоподобия с точностью до постоянной величины можно записать как [8]

$$\ln l = \sum_{k=1}^M \ln l_k = \sum_{k=1}^M \left[ -\frac{1}{2} \left( \vec{\alpha} - \hat{\alpha}_k \right)^T \vec{C}_k \left( \vec{\alpha} - \hat{\alpha}_k \right) \right], \quad (1)$$

где  $\hat{\alpha}_k$  и  $\vec{C}_k$  – оценки и матрицы точности оценивания по сигналам каждой из рассматриваемых СН. Выражение (1) с точностью до постоянной величины можно привести к виду

$$\ln l = -\frac{1}{2} \left( \vec{\alpha} - \hat{\alpha} \right)^T \vec{C} \left( \vec{\alpha} - \hat{\alpha} \right),$$

где  $\hat{\alpha}$  – результирующая оценка,  $\vec{C}$  – матрица точности, которую можно определить из следующих выражений

$$\hat{\alpha} = \vec{C}^{-1} \sum_{k=1}^M \vec{C}_k \hat{\alpha}_k, \quad \vec{C} = \sum_{k=1}^M \vec{C}_k. \quad (2)$$

Таким образом, на основании выражений (2) возможно формирование результирующей оценки координат воздушных объектов при использовании оценки параметров сигналов в каждой из СН. Для исследования показателей качества измерения координат ВО при комплексировании информации СН (будем рассматривать комплексированную СН, образованную системами

радиолокационного опознавания и вторичной радиолокации) получим выражение для среднеквадратической ошибки (СКО) измерения азимута в такой запросной системе.

Для определения нижней границы дисперсии оценки азимута по пачке бинарно-квантованных сигналов воспользуемся известным выражением [8]

$$\sigma_{\beta}^2 = \frac{1}{\sum_{i=1}^M (dP_{2i} / d\beta)^2 \left\{ \frac{1}{[P_{2i}(1 - P_{2i})]} \right\}},$$

где  $P_{2i}$  – вероятности обнаружения сигналов.

Предположим, что с выхода приемника системы ВРЛ поступает бинарно-квантованная последовательность, содержащая  $M$   $n$ -импульсных ответных сигналов. Для удобства вычислений представим производную  $dP_{2i} / d\beta$  в следующем виде

$$dP_{2i} / d\beta = (dP_{2i} / dP_{1i})(dP_{1i} / dq_i)(dq_i / d\beta).$$

Значение вероятности  $P_{2i}$  для  $n$ -импульсного интервально-временного кода запросных систем ВРЛ определяется логикой обработки сигналов в дешифраторе и коэффициентом готовности самолетного ответчика ( $P_o$ ) и ее можно записать как

$$P_{2i} = P_o P_{1i}^n.$$

Величина  $q_i$  может быть записана как [8]  $q_i = q_o g(\alpha_i)$ , где  $g(\alpha_i)$  – диаграмма направленности антенной системы запросчика ВРЛ. Аппроксимируем диаграмму направленности антенной системы гауссовой кривой  $g(\alpha_i) = \exp(-\alpha_i^2)$  и используем для численных расчетов  $\alpha_i$  в следующем виде (при нечетном  $N$ )  $\alpha_i = i\Delta\beta / \varphi$ ,  $[-(M-1)/2 < i < (M-1)/2]$  где  $\varphi$  – половина ширины диаграммы направленности антенной системы запросчика ВРЛ,  $\Delta\beta$  – угловое расстояние между соседними импульсами пачки. Используя [8] результаты вычисления производных  $dP_{1i} / dq_i$  и  $dq_i / d\beta$ , определяем  $dP_{2i} / dP_{1i}$ , что позволяет определить выражение для  $\sigma_{\beta}$  в следующем виде:

$$\sigma_{\beta} = \frac{\varphi^2 \exp(z_o^2 / 2)}{2n\Delta\beta z_o q_o \sqrt{P_o A_{\beta}}}, \quad (3)$$

$$\text{где } A_{\beta} = \sqrt{2 \sum_{k=1}^{(M-1)/2} P_{1k}^{n-2} \exp(-q_k^2) I_1^2(q_k z_o) k^2 g^2(q_k) / (1 - P_o P_{1k}^n)}.$$

На рисунке представлены зависимости СКО измерения азимута для системы ВРЛ ( $B_2$ ), для которой  $P_0 = 0,9$ , для системы РЛО ( $B_1$ ), для которой  $P_0 = 0,7$  и при комплексировании (с) рассматриваемых систем. Кроме того, на рисунке представлены зависимости СКО измерения азимута в зависимости от отношения с/ш и для первичной РЛС (п).

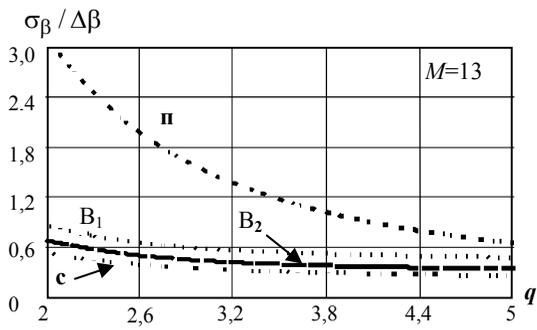


Рис. СКО измерения азимута ВО

Представленные зависимости указывают на повышение качества измерения азимута ВО при комплексировании СН для решения задачи идентификации ВО.

**Выводы.** Представленные в работе расчеты показали повышение точности измерения азимута ВО в СН, образованной системами радиолокационного опознавания и вторичной радиолокации. Таким образом, при построении единой информационной сети систем наблюдения следует учитывать особенности комплексирования информации совместных, совмещенных или рассредоточенных систем наблюдения для решения отдельных информационных задач, в частности, задачи идентификации воздушных объектов.

**Список литературы:** 1. Теоретичні основи побудови заводозахисних систем інформаційного моніторингу повітряного простору / В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 271 с. 2. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони // В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 342 с. 3. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Пер. с англ.– М.: Радио и связь, 1993. – 320 с. 4. Farina A., Studer F.A. Radar Data Processing Introduction and Tracking. Vol.1. Research Studies Press. Letch worth England, 1985. – P. 121-123. 5. Lok J.J. C<sup>2</sup> for the air warrior // Jane's International Defense Review. – October 1999. – V. 2. – P. 53-59. 6. Обод И.И. Помехоустойчивые системы вторичной радиолокации. – М.: ЦИИТ, 1998. – 118 с. 7. Рысаков Н.Д., Павленко М.И. Принципы построения вторичных РЛС. – Харьков: ХВВАУРЭ, 1986. –165 с. 8. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 453 с.

Поступила в редакцию 01.04.2007

*И.И. ОБОД*, д-р техн. наук,  
*Ю.А. ЛУЦЕНКО*

## **ИЗМЕРЕНИЕ ВЫСОТЫ ОБЪЕКТОВ В СИНХРОННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ СИСТЕМ НАБЛЮДЕНИЯ**

Надаються вимоги до потрібної стабільності формування шкал часу у синхронній інформаційній мережі при вимірюванні висоти літака по дальномірним вимірюванням.

The requirements of necessary stability of forming of time-scales in a synchronous information network at calculation of airplane height on distance measuring are given.

**Постановка задачи и обзор литературы.** В ведущих странах мира довольно длительное время существуют национальные единые системы контроля использования воздушного пространства как войсковой, так и гражданской авиацией. Очевидно, что при этом достигается максимальная эффективность использования воздушного пространства при сравнительно низких материальных, технических и людских затратах.

Одной из составляющих системы контроля использования воздушного пространства является единая информационная сеть (ЕИС) на базе существующих систем наблюдения (СН). Сетевому построению информационных средств в настоящее время уделяется значительное внимание [1 – 7]. В частности, существующие национальные единые системы контроля использования воздушного пространства, как правило, реализованы на сетевом использовании отдельных информационных средств [3] (программы 968Н, ACCS и др.). Основными задачами этих программ являются объединение в общую сеть существующих СН различных ведомств и централизованное управление этой сетью вышестоящим органом. При этом сеть реализована на несинхронном принципе и используется трехмерная система координат. Объединенная информация сети выдается потребителям. Однако такой принцип организации сети обедняет информационное обеспечение потребителей и не разрешает проблем отдельных информационных средств, в частности, систем вторичной радиолокации, совместного функционирования систем первичной и вторичной радиолокации и т.д. Переход к синхронному принципу построения сети, в которой используется четырехмерная система координат, как показано в [4 – 7] позволит обеспечить полное и надежное информационное обеспечение потребителей, а также разрешить проблемы функционирования отдельных информационных средств. Кроме того, использование четырехмерной системы координат в синхронной информационной сети (СИС) расширяет функциональные возможности такой сети, в частности, появляется возможность реализации кооперативного приема

сигналов, измерения высоты летательного аппарата (ЛА) по дальномерным измерениям и т.д.

**Цель работы.** Оценка качества измерения высоты ЛА по дальномерным измерениям в синхронной информационной сети.

**Основная часть.** Как известно из [8, 9], используя измерения наклонной дальности до ЛА нескольких пунктов СИС, можно измерить высоту полета объекта. При этом необходимо отметить, что такая задача стоит как перед первичными, так и перед вторичными радиолокаторами. Действительно, как показано в [7], СИС систем вторичной локации (ВРЛ) предполагает переход к беззапросным системам и, следовательно, требует измерения высоты излучающего объекта. В связи с этим будем решать задачу совместного измерения высоты ЛА системами как первичной, так и вторичной локации.

Рассмотрим СИС, которая состоит из  $n$  приемных пунктов (рис.1). Для первичной системы это будет  $n$  наземных приемных пунктов эхо-сигналов, один из которых – излучающий, а для вторичной системы – это  $n$  наземных приемных пунктов ответных сигналов. Таким образом, задачи измерения высоты ЛА по эхо-сигналам и ответным сигналам идентичны. Точность измерения высоты ЛА зависит от точности измерения времени приема сигнала, точности синхронизации шкал времени приемных пунктов, а также от взаимного расположения приемных пунктов и ЛА.

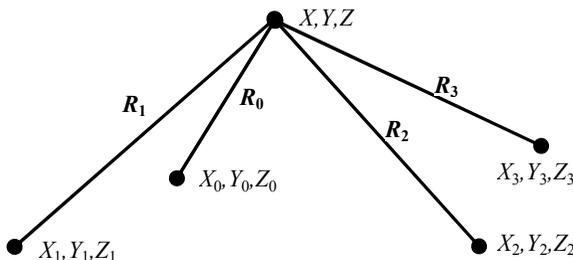


Рис.1. Геометрия системы

Предположим, что с ЛА в момент времени  $T_k(t)$  происходит излучение или эхо, или ответного сигнала. Предположим также, что имеется четыре наземных приемных пункта. Следовательно, в каждом из приемных пунктов в момент времени  $T_i(t)$  ( $i = 0, \dots, 3$ ) осуществляется прием излученного ЛА сигнала. Считая шкалы времени, формируемые в приемных пунктах СИС, высокостабильными, можно опустить зависимость временных процессов от  $t$ . Таким образом, время прибытия сигнала ЛА в каждый из приемных пунктов СИС можно записать как  $T_i = T_k + R_i / c$ , где  $c$  – скорость света.

Вычитая время прибытия в базовый пункт обработки (считаем его нулевым) из времени остальных приемных пунктов, можно записать

$$R_i - R_0 = c(T_i - T_0) = r_i, \quad i = 1, 2, 3.$$

Однако, исходя из геометрии расположения приемных и излучающего пунктов, можно записать

$$R_0^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad R_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2. \quad (1)$$

Из (1) можно получить

$$R_i^2 - R_0^2 = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - 2(x_i x + y_i y + z_i z). \quad (2)$$

Используя (2) и (1), можно записать

$$R_i^2 - R_0^2 = (R_i - R_0)(R_i + R_0) = (r_i + 2R_0)r_i. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2) и осуществляя перестановку, получаем

$$2(x_i x + y_i y + z_i z + r_i R_0) = x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - r_i^2. \quad (4)$$

Нам требуется оценить влияние ошибок синхронизации шкал времени пунктов приема, т.е.  $T_i$ , на измерение высоты, т.е. на координаты  $z$ . Дифференцирование (4) позволяет записать

$$2 \left( x_i \frac{dx}{dT_j} + y_i \frac{dy}{dT_j} + z_i \frac{dz}{dT_j} + r_i \frac{dR_0}{dT_j} + R_0 \frac{dr_i}{dT_j} \right) = -2r_i \frac{dr_i}{dT_j}, \quad (5)$$

для  $i = 1, 2, 3; j = 0, 1, 2, 3$ .

Используя результаты дифференцирования (5), а также исходя из (1)

$$x \frac{dx}{dT_j} + y \frac{dy}{dT_j} + z \frac{dz}{dT_j} - R_0 \frac{dR_0}{dT_j} = 0,$$

можно записать

$$\begin{vmatrix} x & y & z & -R_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 & r_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & r_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 & r_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} dx/dT_0 & dx/dT_1 & dx/dT_2 & dx/dT_3 \\ dy/dT_0 & dy/dT_1 & dy/dT_2 & dy/dT_3 \\ dz/dT_0 & dz/dT_1 & dz/dT_2 & dz/dT_3 \\ dR_0/dT_0 & dR_0/dT_1 & dR_0/dT_2 & dR_0/dT_3 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_1 & -R_1 & 0 & 0 \\ R_2 & 0 & -R_2 & 0 \\ R_3 & 0 & 0 & -R_3 \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Скорость света опущена из выражения (6) с учетом того, что ошибки в формировании шкал времени даны с точки зрения дальности. Если выражение (6) записать как  $\bar{D}\bar{A} = \bar{R}$ , то получим

$$\bar{A} = \bar{D}^{-1}\bar{R}. \quad (7)$$

Следовательно, для выбранного расположения приемных пунктов СИС и позиции ЛА матрицы  $\bar{D}$  и  $\bar{R}$  известны и выражение (7) можно решить. Как следует из (7), третий ряд оцененной матрицы  $\bar{A}$  представляет собой чувствительность измерения высоты ЛА к ошибкам синхронности формирования шкал времени приемных пунктов. Если все измеряемые интервалы времени одинаково чувствительны к ошибкам формирования СИС, то сумма квадратических ошибок представляет собой ни что иное, как общее

значение геометрического фактора (ГФ) [9]. Некоторые результаты расчета по выражению (7) представлены на рис. 2 и 3 при различных конфигурациях приемных пунктов и высоты ЛА. Рис.2 представлен для равномерного расположения трех пунктов на радиусе 45 км. вокруг базового приемного пункта, а рис. 3 – для треугольного. Высота полета ЛА была равной 5000 м.

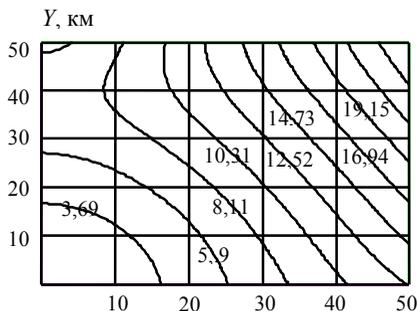


Рис. 2. Зависимость  $P=f(x,y)$

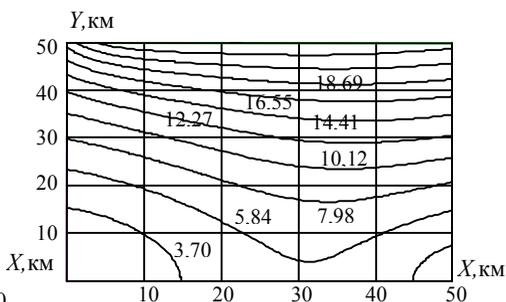


Рис. 3. Зависимость  $P=f(x,y)$

Представленные расчеты позволяют оценить требуемую точность синхронизации шкал времени приемных пунктов синхронной информационной сети систем наблюдения при вычислении высоты ЛА по дальномерным измерениям.

**Выводы.** Реализация синхронной информационной сети систем наблюдения, в которых время является одной из координат, позволяет осуществить измерение высоты летательного аппарата путем измерения наклонной дальности в пунктах сети.

**Список литературы:** 1. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с. 2. Farina A., Studer F.A. Radar Data Processing Introduction and Tracking. Vol.1. Research Studies Press. Letch worth England, 1985. – P. 121-123. 3. Lok J.J.  $C^2$  for the air warrior // Jane's International Defense Review. – October 1999. – Vol. 2. – P. 53-59. 4. Теоретичні основи побудови заводозахисних систем інформаційного моніторингу повітряного простору // В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 271 с. 5. Комплексне інформаційне забезпечення систем управління польотами авіації та протиповітряної оборони // В.В. Ткачев, Ю.Г. Даник, С.А. Жуков, І.І. Обод, І.О. Романенко. – К.: МОУ, 2004. – 342 с. 6. Обод І.І., Луценко Ю.А. Информационная сеть систем наблюдения как основа информационного обеспечения потребителей // Вестник НТУ "ХПИ". Сборник научных трудов. Тем. вып. "Информатика и моделирование". – Х.: НТУ "ХПИ", 2006. – № 40. – С. 153–156. 7. Бакуменко Б.В., Булай А.М., Обод І.І. Єдине координатно-часове забезпечення як основа розв'язування протиріч спільного функціонування систем первинної і вторинної радіолокації // Системи обробки інформації: Збірник наукових праць. – Вип. 5 (54). – Х.: ХУПС. – 2006. – С. 3–9. 8. Скольник М. Справочник по радиолокации в 4-х т. – Т.3. – М.: Сов. радио, 1978. – 475 с. 9. Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. – М.: Радио и связь, 1986. – 263 с.

Поступила в редакцию 15.04.2007

**А.И. ПОВОРОЗНЮК**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
**Ю.В. МИРГОРОД** (г. Харьков)

## **АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

У статті обґрунтована необхідність використання попередньої обробки даних у комп'ютерних діагностичних системах. Проведений огляд та порівняльний аналіз засобів обробки фізіологічних квазіперіодичних сигналів.

In article is proved the necessity of usage of primary data processing for computer diagnostic systems. The comparative analysis of methods for physiological quasi-periodic signals processing is given.

**Постановка проблемы.** Сложность решения задач обработки физиологических сигналов обусловлена тем, что биологические процессы порождают сигналы на низких уровнях амплитуды. Поэтому для их регистрации используются высокочувствительные датчики, которые, помимо полезного сигнала, фиксируют внутренние и внешние шумы. Такие помехи, неизбежно возникающие в реальных условиях регистрации физиологических сигналов, рассматриваются как шумовой компонент, искажающий полезный сигнал. Примерами фильтров могут быть: когерентные, полосовые, цифровые фильтры. Однако, не существует универсального алгоритма, который мог бы удовлетворить всем требованиям. В связи с этим актуальной является задача построения новых или адаптации старых алгоритмов подавления шумов.

**Анализ литературы.** При построении информационных технологий обработки биомедицинских данных приходится сталкиваться с решением задачи измерения параметров физиологических сигналов, которые характеризуют форму отдельных информативных фрагментов обрабатываемого сигнала. При анализе электрокардиограмм (ЭКГ) различают две задачи: выделение зубцов *R* и полный контурный анализ. Наибольшую сложность представляет вторая задача. Например, при обработке ЭКГ необходимо получать достаточно точное представление об амплитудах и продолжительностях зубца *P*, комплекса *QRS* и сегмента *ST-T*, отражающих работу предсердий и желудочков сердца в течение кардиоцикла. Недопустимое искажение таких фрагментов в процессе компьютерной обработки приводит к неверной интерпретации сигнала. Каждой задаче соответствуют свои параметры фильтрации.

В [1 – 3] рассмотрены алгоритмы сглаживания. В [4] приведен метод адаптивного скользящего среднего. В [5] рассматривается алгоритм фильтрации при использовании фильтров с конечной импульсной характеристикой (КИХ) (Finite Impulse Response Residual Filtering (FRF)), алгоритм интеллектуального переключения отведений (the Intelligent Lead

Switch algorithm). Каждый из рассмотренных алгоритмов имеет свои достоинства и недостатки.

**Цель статьи.** Выполнить сравнительный анализ существующих алгоритмов и методов предварительной обработки физиологических квазипериодических сигналов (ФКС) с целью выбора оптимального варианта для обработки ЭКГ.

**Алгоритмы сглаживания данных.** Пусть имеется последовательность из  $N$  дискретных значений сигнала  $x[1], x[2], \dots, x[N]$ , представляющих собой аддитивную смесь

$$x[n] = y[n] + \varepsilon[n] \quad (1)$$

полезного сигнала  $y$  и ограниченной по уровню помехи  $\varepsilon$ .

Будем полагать, что помеха  $\varepsilon$  имеет случайную природу и с неизвестным законом распределена на интервале  $[-\varepsilon_0, +\varepsilon_0]$ , причем  $E\{\varepsilon\} = 0$ ,  $E\{\varepsilon[i], \varepsilon[j]\} = 0$ ,  $i, j \in [-\varepsilon_0, \varepsilon_0]$ , где  $E$  – знак математического ожидания. Понятно, что для подавления такой шумовой компоненты неэффективно применять частотно-избирательные фильтры, поскольку спектр случайной помехи распределен практически во всей полосе частот от 0 до частоты Найквиста.

Один из возможных подходов к получению оценок  $y^*[n]$  по наблюдениям (1) состоит в использовании методов сглаживания данных, среди которых наибольшую популярность получили метод экспоненциального сглаживания и метод скользящего среднего. Известны несколько разновидностей метода экспоненциального сглаживания: метод Холта, а также метод Винтера.

Особенностью метода скользящего среднего является то, что в нем используются лишь предшествующие значения зашумленного сигнала.

В тех же случаях, когда не требуется вести обработку сигнала в реальном масштабе времени, для оценки очередного сглаженного значения разумно использовать не только предшествующие, но и последующие значения зашумленного сигнала. Заметим, что при сглаживании все точки в окне могут усредняться с равным весом. Такая процедура может рассматриваться как дискретная свертка обрабатываемого сигнала с ядром прямоугольной формы. Однако используются и другие симметричные ядра, в частности, с известными окнами Бартлетта (Bartlett window), Гаусса (Gaussian window), Хемминга (Hamming window), Блэкмана (Blackman window), Ханна (Hann window) и многими другими. В этом случае вес более далеких от центра окна точек будет постепенно уменьшаться, вплоть до нуля на границе окна.

Результат сглаживания ЭКГ при небольшой ширине окна не приводит к желательному сокращению шумового компонента на информативном сегменте  $ST-T$ . Только при увеличении ширины окна сглаживание приводит к желательному сокращению шумового компонента на сегменте  $ST-T$ . Однако в этом случае происходит недопустимое снижение амплитуды другого информативного фрагмента ЭКГ-комплекса  $QRS$ , измерение которого также важно для интерпретации ЭКГ.

Таким образом, при использовании традиционного алгоритма скользящего среднего для подавления шумового компонента реальных физиологических сигналов мы сталкиваемся с проблемой, обусловленной противоречием выбора оптимального значения ширины окна сглаживания: при уменьшении ширины окна не обеспечивается желательный эффект подавления шумового компонента, а при увеличении происходят недопустимые искажения полезного сигнала. Поэтому в задачах обработки физиологических сигналов известные алгоритмы сглаживания можно использовать лишь при весьма малых уровнях шумового компонента, что, естественно, ограничивает область их практического применения.

Для устранения отмеченного недостатка в [5] рассмотрен модифицированный алгоритм. Основная идея модификации состоит в том, что по ходу обработки окно сглаживания автоматически приспособливается (адаптируется) к реальному сигналу таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить максимальную степень сглаживания, а, с другой стороны, не допустить искажения сигнала, превышающее заданный порог.

**Алгоритм *FRF*.** Алгоритм уменьшает влияние шумов на сигнал ЭКГ, при этом незначительно искажая комплексы *QRS*. Алгоритм состоит из модуля обновления усредненного комплекса *QRS* и функции вычитания усредненного комплекса из текущей ЭКГ, дающей на выходе разностный сигнал. Разностный сигнал проходит через фильтры нижних и верхних частот, после чего складывается с усредненным комплексом.

**Алгоритм интеллектуального переключения отведений.** Современные ЭКГ-системы, как правило, используют многоканальную запись ЭКГ. Наиболее часто используются ЭКГ в 12-ти стандартных отведениях, хотя применяются и другие последовательности с большим или меньшим количеством отведений. Принимая во внимание избыточность многоканального сигнала ЭКГ, можно выбирать для анализа только каналы с наилучшим качеством сигнала. Можно использовать для определения *QRS* комплекса все доступные отведения. Алгоритм интеллектуального переключения отведений состоит из:

- 2-х или более одинаковых независимых модулей для детектирования комплекса *QRS*, классификации событий и определения уровня качества ЭКГ;
- логического модуля для выбора результатов из лучшего по качеству канала, корректировки классификации событий в лучшем канале и корректировки точек разметки *QRS* лучшего канала.

Уровень качества лучшего отведения ЭКГ определяется на основании интегрального показателя, который может включать: амплитуду комплекса *QRS*, уровни средне- и высокочастотного шумов, состояние электродов (присоединен/не присоединен).

**Сравнительный анализ.** Рассмотренные методы имеют свои области оптимального использования.

Метод скользящего среднего и его модификации, а именно, использующие окна Бартлетта, Гаусса, Хемминга, Блэкмана, Ханна и др., используют лишь предшествующие значения зашумленного сигнала, благодаря чему могут быть использованы в системах реального времени, что является несомненным преимуществом. Однако эти методы имеют ограничение при выборе апертуры сглаживания.

Метод скользящего среднего с переменной апертурой сглаживания решает указанную выше проблему, но он требует двойного прохода по сигналу, что увеличивает время его выполнения

При выполнении алгоритма *FRF* незначительно искажаются комплексы *QRS*, однако данный алгоритм предъявляет повышенные требования к компьютерным ресурсам.

Преимуществом алгоритма интеллектуального переключения отведений является более достоверное детектирование комплекса *QRS*. Однако алгоритм требует значительной вычислительной мощности компьютера, особенно при анализе в 15 отведениях.

**Выводы.** При обработке ЭКГ важным этапом является предварительная обработка сигнала. На сегодняшний день не существует универсального метода, позволяющего решить все проблемы обработки ЭКГ. Поэтому авторами был предложен метод, включающий в себя:

- этап использования метода скользящего среднего с переменным окном сглаживания, т.к. ЭКГ содержит в себе структурные элементы различной частоты;

- этап использования алгоритма *FRF* (особенно при зашумленных сигналах, полученных по радиоканалу или телефонной линии);

- использование алгоритма интеллектуального переключения отведений для сильно зашумленных сигналов для повышения качества обработки.

**Список литературы:** 1. Жук М.И., Семенец В.В. Методи і алгоритми обробки та аналізу медико-біологічних сигналів // Під ред. проф. А.І. Буха. – Харків: ХНУРЕ, 2006. – 268 с. 2. Franke R., Nielson G. Smooth interpolation of large sets of scattered data // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 1980. – № 15. – P. 789. 3. Daan N., Sissenwine M.P. Multispecies models relevant to management of living resources. Proceedings of a Symposium held in The Hague, 2–4 October 1989 // ICES Mar. Sci. Symp, 1991. – P. 358. 4. Файнзильберг Л.С. Адаптивное сглаживание шумов в информационных технологиях обработки физиологических сигналов // Математические машины и системы. – 2002. – № 3. – С. 96–104. 5. Willi Kaiser, Martin Findeis Novel Signal Processing Methods for Exercise ECG // Journal of Electrocardiology. – 1999. – № 32, Supplement. – P. 212–219. 6. Seber G.A.F. The estimation of animal abundance and related parameters. – London, Griffin, 1973. – 506 p. 7. Sokal, R.R., Rohlf F.J. Biometry. The principles and practice of statistics in biological research. – San Francisco, California, Freeman and Company, 1981. – 325 p. 8. Шлезингер М.И. Быстрая реализация одного класса линейных сверток // Теоретические и прикладные проблемы распознавания образов. – К.: ИК АН УССР, 1991. – С. 48–56.

Поступила в редакцию 30.03.2007

*А.И. ПОВОРОЗНЮК*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*М.Н. ШКАРУПА*

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗАЩИТЫ WEB-ПРИЛОЖЕНИЙ ОТ ВТОРЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭВРИСТИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

В статті розглядаються існуючі програмні методи захисту WEB-додатків у всесвітній мережі Internet та виявляються їх вади. Робиться аналіз деяких видів атак та сучасних тенденцій щодо їх проведення. Робляться рекомендації відносно подальшого найбільш перспективного напрямку розвитку програмних засобів захисту WEB-додатків.

In present article were overviewed software-based methods of WEB-application protections at global network Internet. At this report are analyzing some kinds of attacks and present-day tendencies for their implementation. Adduced recommendation for future trends evolution of software-based instruments of WEB-application protections.

**Постановка проблемы.** Основным средством обеспечения безопасности на современном этапе развития сети Internet является такой класс приложений как брандмауэр (часто используемые синонимы: файрвол, межсетевой экран).

В самом общем случае брандмауэр можно определить как локальное или функционально-распределенное программное, аппаратное или программно-аппаратное средство, реализующее контроль над информацией, поступающей в компьютерную систему и выходящей из нее [1].

В зависимости от уровня модели OSI, на котором происходит контроль над информацией, различают брандмауэры работающие на:

- сетевом уровне, фильтрация происходит на основе адресов отправителя и получателя пакетов, номеров портов транспортного уровня модели OSI и статических правил, заданных администратором;

- сеансовом уровне, при фильтрации не пропускаются пакеты, которые нарушают спецификации стека протоколов TCP/IP, часто используемые в злонамеренных операциях (сканирование ресурсов, взломы через неправильные реализации TCP/IP, обрыв/замедление соединений, инъекция данных);

- уровне приложений, фильтрация происходит на основе анализа данных приложения, передаваемых внутри пакета.

Следует отметить, что практически все разработчики современных брандмауэров предлагают решения, которые работают на всех отмеченных выше уровнях. Однако работа большинства "классических" брандмауэров акцентируется на сетевом и сеансовом уровне [2]. Нередко функциональные возможности работы брандмауэра на уровне приложений обеспечиваются отдельным модулем, работа которого, как правило, носит общий характер и не учитывает особенностей функционирования того или иного приложения.

Брандмауэры являются необходимым элементом первой линии обороны, но "классические" брандмауэры отлично справляются лишь с атаками на сетевом и сеансовом уровне. В случае нашествия червей или сложных атак на уровне приложений с использованием постоянно открытых портов 80 (HTTP) и 443 (HTTPS) они, как правило, беспомощны. Системы обнаружения вторжений (СОВ), входящие в состав брандмауэров, используют пассивные фильтры, через которые пропускается сетевой трафик с целью выявления активности злоумышленников. Для обнаружения атак на уровне приложений они используют технологию сигнатур и выявления аномального поведения, но в большинстве случаев они эти атаки не блокируют, а только сообщают об их осуществлении. К моменту извещения администратора предотвращать масштабные повреждения системы часто бывает слишком поздно.

**Анализ литературы.** Невысокая эффективность СОВ и проблемы с их управлением стали настолько заметны, что в отчете "Gartner Information Security Hype Cycle", опубликованном в июне 2003 года, эти системы названы провальными [3].

В 2006 году Gartner в очередном прессрелизе [4] посоветовали использовать системы предотвращения вторжений (СПВ), которые начали предлагать традиционные производители систем брандмауэров. В отличие от систем СОВ, которые просто следят за сетью и посылают сообщения о тревоге, сетевые СПВ блокируют атаки в момент их возникновения и только потом поднимают тревогу.

Следует отметить, что СПВ хорошо себя зарекомендовали как средство комплексной защиты компьютера. Однако создать полностью безопасную среду для конкретного приложения они еще не способны.

Проблему создания безопасной среды функционирования WEB-приложений централизованно стали изучать только с 2004 года. Для этого была сформирована группа "Консорциум по проблемам безопасности WEB приложений" ("Web Application Security Consortium" group). В состав этой группы вошли ряд ведущих мировых специалистов по безопасности и разработке сетевых приложений, в том числе и ведущий разработчик популярного WEB-сервера Apache Раен Барнет (Ryan Barnett).

Уже в июне 2004 года в Internet были опубликованы первые результаты работы [6] этой группы – документ под названием "Классификация угроз" ("Threat Classification").

Издание этого документа преследовало такие цели как: определение всех известных атак на WEB-приложения, согласование терминологии, определение структурированного подхода к классификации атак.

В январе 2006 года этой же группой был опубликован документ [6] под названием "Критерии оценки брандмауэров по защите WEB-приложений" ("Web Application Firewall Evaluation Criteria").

Этот документ не имеет юридической силы и носит лишь рекомендательный характер. Он не содержит ни алгоритмов, ни каких-либо

ограничений, накладываемых на разрабатываемое программное обеспечение. Документ представляет собой набор характеристик, при помощи которых станет возможно сравнивать различные брандмауэры для защиты WEB-приложений, которые были и будут разработаны. Также документ предлагает некую общую терминологию, использование которой позволит избежать разночтений в среде разработчиков и пользователей такого класса приложений защиты.

**Целью статьи** является выработка рекомендаций по дальнейшей доработке СПВ с целью повышения уровня безопасности среды для функционирования WEB-приложения.

**Основной раздел.** Проведя детальный анализ сведений о методах осуществления атак на WEB-приложения, многие специалисты в области безопасности сходятся во мнении, что возможно создать ограниченное множество отпечатков (сигнатур) атак и при их помощи с высокой вероятностью выявлять ту или иную атаку [7].

На сегодняшний день наиболее успешным и популярным программным брандмауэром, специализирующим на защите WEB-приложений, является проект ModSecurity. Этот брандмауэр представляет собой модуль для широко распространенного WEB-сервера Apache. Модуль представляет собой гибко настраиваемый фильтр POST, GET и COOKIE параметров, передаваемых между пользователем и удаленным сервером в сети Internet.

Следует заметить, что ModSecurity требует кропотливой и точной настройки с участием специалиста по безопасности [8]. Настройки модуля по умолчанию не могут использоваться для защиты критичных ко взлому WEB-приложений (например электронных банков или электронных магазинов).

Попыткой создать наиболее полную конфигурацию для ModSecurity с учетом большинства возможных вариаций атак можно считать рекомендации, опубликованные в [9]. Это облегчило работу по настройке модуля, однако услуги специалиста для адаптации общих рекомендаций по настройке под конкретные задачи все еще нужны.

ModSecurity имеет существенный недостаток – отсутствие регулярного обновления баз сигнатур атак. К недостаткам этого модуля следует также отнести то, что он оперирует лишь жестко заданными правилами и не имеет эвристических алгоритмов для детектирования видоизмененных и предсказания новых атак. Кроме того действия ModSecurity по фильтрации содержимого не учитывают индивидуальных особенностей всех WEB-приложений, которые могут обслуживаться одним WEB-сервером.

Марсель Низамутдинов, один из ведущих российских специалистов в области безопасности, указывая на недостатки ModSecurity, в своей книге опубликовал ряд теоретических примеров успешных атак на защищенное WEB-приложение [10].

Современная инфраструктура сети Internet не позволяет регулярно и систематично обновлять базы сигнатур атак на WEB-приложения. Необходимо заметить, что даже если бы была создана централизованная оперативная система обновления баз сигнатур, то это не стало бы идеальным решением проблемы хакерских атак на WEB-приложения в долгосрочной перспективе. В современном мире компьютерной преступности хакеры все чаще стали автоматизировать свои взломы, создавая подсети компьютеров-зомби, троянских коней и червей, действия которых направлены против WEB-приложений. Молниеносность и масштабы атак с каждым днем все возрастают. И иногда обновление базы сигнатур может прийти слишком поздно, уже после того как атака состоялась.

В связи с описанными выше недостатками существующих решений по защите WEB-приложений предложим рекомендации по построению системы защиты. СОВ, как уже отмечалось выше, не в состоянии создать безопасную среду функционирования WEB-приложения. СПВ имеют большой потенциал, однако точность и эффективность их работы на современном этапе их развития вызывает множество нареканий, а значит эти приложения требуют детальной проработки и внесения коренных изменений.

Доработка СПВ может быть осуществлена в двух основных направлениях: в направлении усовершенствования сигнатурного анализатора и в направлении усовершенствования анализатора аномалий.

Метод сигнатурного анализа хорошо опробован на антивирусном программном обеспечении и сейчас внедрен в СПВ, где показывает отличные результаты по отражению известных атак. Метод анализа аномалий поведения пользователя WEB-приложения заслуживает более пристального изучения.

Большая часть атак на WEB-приложения можно распознать только на уровне приложений. На рис. 1а изображена классическая схема построения защиты WEB-приложения, которая предполагает анализ данных на уровне приложений в рамках брандмауэра. Однако брандмауэр не учитывает и не может учитывать всех особенностей функционирования защищаемого WEB-приложения и, как следствие, очень часто не может отличить действия злонамеренного пользователя от действий легитимного пользователя.

Из такой ситуации возможно два выхода: "обучить" брандмауэр всем особенностям поведения пользователей каждого защищаемого WEB-приложения или же вынести контроль на уровне приложений из рамок брандмауэра в рамки самого WEB-приложения (см. рис. 1б). Второй вариант представляется наиболее логичным и удобным.

Когда анализ на уровне приложений переносится в рамки самого WEB-приложения, он приобретает иную качественную окраску, открывается ряд дополнительных возможностей для анализа и сбора информации о потенциальном атакующем.

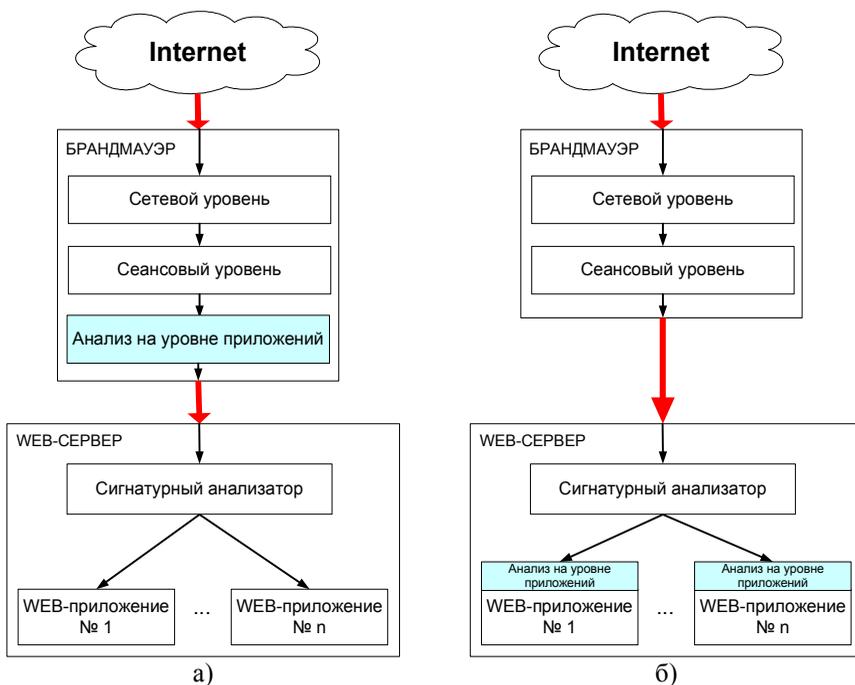


Рис. 1. Схема построения системы защите WEB-приложения  
 а) классическая схема, б) предлагаемая схема

В предложенной схеме анализ на уровне приложений осуществляется системой, которая состоит из набора так называемых "датчиков" и эвристического анализатора. Система "датчиков" собирает информацию в нескольких разрезах: POST-параметры, GET-параметры, COOKIE-параметры, операции с базой данных, операции с файловой системой, ошибки и предупреждения в процессе работы пользователя. Поступающая от "датчиков" информация и некоторая другая дополнительная информация о пользователе (такая как IP адрес, время начала сессии и пр.) является входной для эвристического анализатора.

Ядром эвристического анализатора является нейронная сеть адаптивно-резонансной теории (АРТ). Для решаемого класса задач наиболее всего подходит сеть АРТ-1 [11]. Главной задачей, которая возложена на нейронную сеть, является задача выявления атак, которые не были выявлены на этапе сигнатурного анализа.

Нужно особо отметить, что нет необходимости обучать нейронную сеть всем известным на сегодняшний день видам атак. "Знать" существующие атаки должен сигнатурный анализатор, а эвристический анализатор должен "уметь отличать" поведение легитимного пользователя от поведения

злонамеренного пользователя. Иными словами, сигнатурный анализатор должен "уметь видеть" аномалии поведения.

Однако очень важно, чтобы эвристический анализатор не был слишком "жестким" в определении отклонения поведения пользователя от нормального и в то же время он не должен быть слишком "мягким". Эту проблему можно решить двумя способами: подбором оптимального коэффициента подобия, использования различных коэффициентов подобия для различных категорий пользователей. Первый вариант недостаточно гибкий для нашей задачи, поэтому обратимся ко второму варианту.

Выделим четыре базовые категории пользователей WEB-приложения с точки зрения безопасности: проверенные пользователи (им разрешены любые действия), обычные пользователи (доступ открыт в нормальном режиме), "подозрительные" пользователи (пользователи за которыми была замечена некоторая подозрительная активность, однако собранных данных недостаточно, чтобы определить пользователя как взломщика) и взломщики (доступ блокируется полностью). К проверенным пользователям относятся администратор системы и один или более операторов, управляющих системой. От этих пользователей не может исходить угроза и поэтому эвристический анализатор не проверяет действия таких пользователей. Действия обычных пользователей проходят эвристическим анализатором проверку в штатном режиме. Действия "подозрительных" пользователей подвергаются более жесткой проверке эвристическим анализатором. Действия взломщиков блокируются полностью.

Для реализации поставленных перед ним задач эвристический анализатор должен состоять из количества нейронных сетей АРТ-1 равного количеству защищаемых страниц WEB-приложения (в среднем до 25) и еще одной нейронной сети, которая отвечает за отнесение пользователя к той или иной категории (и соответственно, определяющая коэффициент подобия для сетей, которые защищают страницы WEB-приложения).

Перед тем как WEB-приложение будет открыто для доступа из Internet, администратор проводит обучение нейронных сетей, защищающих страницы (каждая свою страницу). Администратор активизирует режим обучения и начинает работу с приложением, стараясь инициировать "крайние ситуации", т. е. такие ситуации, когда значения какого-либо параметра (например, размер передаваемого файла, количество GET параметров в одном запросе и пр.) достигают сначала разрешенного минимума, а потом разрешенного максимума. Такой режим работы с приложением обучает нейронную сеть понятию "нормальное поведение" пользователя. Понятие "нормального поведения" для разных страниц сайта может сильно отличаться, поэтому для каждой защищаемой страницы сайта предусмотрена своя нейронная сеть.

Обученная нейронная сеть может выявлять аномалии поведения пользователей и относить последних к одной из трех категорий: обычные пользователи (не найдено соответствий среди образов, которые запомнила

сеть ранее), "подозрительные" пользователи (найдено соответствие запомненному ранее вектору в рамках коэффициента подобия) или взломщики (найдено точное соответствие запомненному ранее вектору). После окончания обучения администратор переводит сеть в рабочий режим и открывает доступ к WEB-приложению из Internet.

Система "датчиков" собирает и передает в виде двоичного вектора на вход нейронной сети некоторую информацию: количество и суммарный объем GET-параметров, количество и суммарный объем POST-параметров, количество и суммарный объем COOKIE-параметров, MIME тип переданных файлов, номер ответа из заголовка HTTP, имена затронутых таблиц в базе данных, действия проводимые с таблицами в базе данных, номера ошибок, которые возникли при работе скриптов или нуль, если таковых не возникло. Вектор сравнивается с изображениями, отложенные в памяти нейронной сети в процессе обучения, и делает вывод нормальное ли поведение пользователя, которое привело к возникновению такого вектора, или нет. Если сеть не может точно сказать, что происходит атака, однако степень отклонения от модели нормального поведения достаточно велика, то данные о потенциальном атакующем запоминаются отдельной сетью, отвечающей за отнесение пользователей к той или иной категории. В следующий раз, когда пользователь вернется на сайт и будет производить некоторые вызывающие подозрения действия, нейронная сеть классифицирует его как "подозрительного" пользователя и ужесточит анализ отклонения от нормальной модели поведения путем коррекции коэффициента подобия. Если подозрения подтвердятся, то пользователь будет переведен в категорию взломщиков, и тогда все его последующие действия будут заблокированы.

Несмотря на то, что нейронная сеть, отвечающая за отнесение пользователя к той или иной категории, и нейронная сеть, которая отвечает за защиту конкретной страницы сайта, имеют разные функциональные назначения, работают они по одному и тому же принципу. Отличие этих сетей состоит лишь в тех данных, которые они запоминают. Первая сеть запоминает данные о подозрительном пользователе (IP адрес, страна, наименование и версия браузера, наименование и версия операционной системы, язык системы, есть ли поддержка Flash, есть ли поддержка Java, разрешение экрана, глубина цвета, стартовая страница браузера), а вторая – данные о нормальном поведении пользователей системы. Анализируя выход первой нейронной сети, мы делаем вывод о необходимости повышения коэффициента подобия при проверке при помощи второй нейронной сети. Анализируя выход второй нейронной сети, мы делаем вывод о том нормальное ли поведение пользователя или же оно отклоняется от нормальной схемы. Поэтому ниже будет приведен пример функционирования лишь первой нейронной сети. Будет показано, что эта нейронная сеть способна также распознать ранее проявившего активность потенциального взломщика даже если он предпринял меры, затрудняющие его идентификацию.

В реальной нейронной сети, отвечающей за идентификацию пользователя, входной вектор достаточно длинный, мы же ради простоты изложения ограничимся вектором длиной в пять бит.

Первые два бита нашего вектора определяют наименование клиента пользователя (00 – Internet Explorer, 01 – FireFox, 10 – Opera, 11 – другой), третий бит определяет установлен ли на компьютере Flash плеер (0 – не установлен, 1 – установлен), четвертый бит определяет язык системы (0 – русский, 1 – другой) и наконец последний бит определяет тип операционной системы (0 – UNIX подобная, 1 – Windows).

Предположим, что у нас имеются данные о трех пользователях, к которым необходимо применить более жесткий эвристический анализ:  $X_1 = (00001)^T$ ,  $X_2 = (00110)^T$ ,  $X_3 = (01111)^T$ . Также у нас имеются данные о пользователе  $X_3$ , который с целью маскировки сменил свой браузер с FireFox на некий другой браузер и пытается совершить некоторые несанкционированные действия. Входной вектор для этого пользователя будет иметь вид  $X_4 = (11111)^T$ .

На рис. 2 изображена упрощенная схема сети АРТ-1 [11].

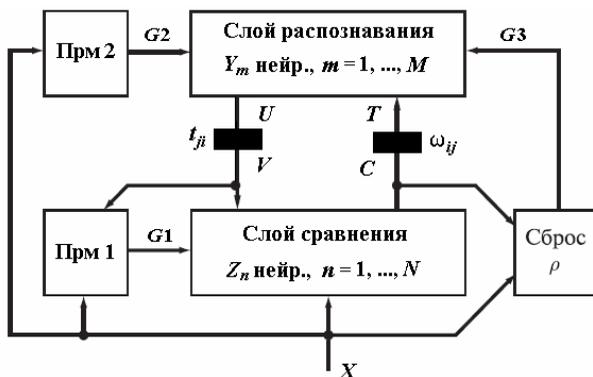


Рис. 2. Упрощенная схема нейронной сети АРТ-1

Входной вектор сети  $X = (X_1, \dots, X_n, \dots, X_N)$  имеет  $N$  компонент. В слое распознавания запоминается  $M$  классов образов, по одному классу на каждый нейрон  $m = 1, \dots, M$ . Основную работу по классификации производят слой сравнения и слой распознавания. Схемы приемников (Прм 1, Прм 2) и схема сброса управляют режимом работы сети и генерируют разрешающие сигналы  $G1$ ,  $G2$  и сигнал сброса  $G3$  соответственно. Матрица непрерывных весов и матрица двоичных весов на рис. 2 обозначены  $\omega_{ij}$  и  $t_{ji}$  соответственно.

Входной двоичный вектор  $X$ , при прохождении через сеть, претерпевает такие преобразования:  $X \rightarrow C \rightarrow T \rightarrow U \rightarrow V$ . Здесь  $C$  – выходной вектор слоя сравнения,  $T$  – входной вектор слоя распознавания,  $U$  – выходной сигнал слоя

распознавания,  $V$  – входной вектор для слоя распознавания и сигнал запрещения для Прм 1.

Параметр подобия возьмем  $\rho = 0,6$ . Матрицы  $\omega_{ij}$  и  $t_{ji}$  инициализируются начальными значениями согласно:

$$0 < \omega_{ij} < \frac{\lambda}{\lambda - 1 + N}; \quad \frac{\beta - 1}{d} < t_{ji} \leq 1,$$

где  $\lambda \in (1, 2]$ ;  $\beta$  – константа;  $d > 0$ .

Размерность вектора  $N = 5$ , примем  $\lambda = 1,5$ . Получим матрицы весов связей  $\omega_{ij} = 0,2$ ;  $t_{ji} = 1$ ,  $i = \overline{1, 5}$ ;  $j = \overline{1, 4}$ .

Обучим сеть первым трем векторам. При поступлении на слой сравнения вектора  $X_1$  на выходе слоя сравнения получаем вектор  $C_1 = X_1$ . На всех входах слоя распознавания имеем сигнал:

$$T_m = \sum_{i=1}^5 \omega_{1i} C_i = 0,2 \cdot 0 + 0,2 \cdot 0 + 0,2 \cdot 0 + 0,2 \cdot 0 + 0,2 \cdot 1 = 0,2, \quad m = \overline{1, M}.$$

Нейроном-победителем становится нейрон с наименьшим индексом, т.е. нейрон  $Y_1$ . Веса связей  $t_{1n}$  ( $n = \overline{1, N}$ ) принимают значения [12]: (0, 0, 0, 0, 1).

Вычислим параметр подобия для вектора  $X_1$ :

$$S = \frac{1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 1}{0 + 0 + 0 + 0 + 1} = 1.$$

Т.к.  $S > \rho$ , то значит поданный на вход вектор  $X_1$  создаст первый сохраненный в памяти образ. Соответственно будет откорректирована матрица  $\omega_{ij}$ :

$$\omega_{1i} = \frac{1,5 \cdot 0}{0,5 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1} = 0, \quad i = \overline{1, 4}; \quad \omega_{15} = \frac{1,5 \cdot 1}{0,5 + 0 + 0 + 0 + 0 + 1} = 1.$$

Далее на вход будут поданы вектора  $X_2$  и  $X_3$ , которые также будут запомнены сетью. В результате обучения матрицы  $\omega_{ij}$  и  $t_{ji}$  будут иметь вид:

$$\omega_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0,6 & 0,6 & 0 \\ 0 & 0,33 & 0,33 & 0,33 & 0,33 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \end{pmatrix}; \quad t_{ji} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

Атакующий  $X_4 = (11111)^T$ , сменив свой браузер, пытается остаться незамеченным сетью. В этом случае  $T_1 = 1$ ,  $T_2 = 1,2$ ,  $T_3 = 1,32$ . Выбираем нейрон  $Y_3$  с максимальным значением  $T$ . Рассчитаем для него  $S = 0,8 > \rho$ . Таким образом, вектор  $X_4$  был правильно отнесен к третьему классу, т.е. пытавшийся остаться незамеченным атакующий все же был правильно классифицирован.

Нейронные сети, которые защищают отдельные WEB страницы сайта, работают по тому же принципу, но результат их работы интерпретируется с точностью до наоборот: если было найдено соответствие входного вектора вектору в памяти сети, то это нормальная ситуация, а если соответствия не было найдено, то, возможно, мы имеем дело с атакой и необходимо "насторожиться" и более пристально следить за текущим пользователем.

Подводя итоги, перечислим достоинства и недостатки предложенной схемы.

Достоинства предложенной схемы: система имеет способность к обнаружению новых типов атак, не требует обновления сигнатур, т.к. основана на аномалиях поведения, дает возможность отслеживать действия пользователя, неоднократно совершающего попытки взлома, полностью адаптируется под особенности защищаемого WEB-приложения.

Недостатки: зависимость от языка программирования, на котором написано WEB-положение, необходимость начального обучения нейронной сети, возможность ложных срабатываний при недостаточном периоде обучения.

**Выводы.** Существующие брандмауэры, предназначенные для защиты WEB-приложений, не отвечают требованиям, предъявляемых к безопасности WEB-приложения в сфере электронной коммерции. Требуется изменение схемы построения защиты, а именно, необходимо создание эффективных работающих на уровне приложения эвристических механизмов, которые будут фокусироваться на анализе аномалий поведения пользователя, что позволит выявлять атаки, с которыми не может справиться сигнатурный анализ. Несмотря на существенные недостатки метода эвристического анализа аномалий, работа, направленная на его усовершенствование, является на сегодняшний день наиболее перспективным направлением в СПБ.

**Список литературы:** 1. *McGraw G.* Building Security In. – New-York: Addison-Wesley, 2006. – 448 p. 2. *Shah S.* Web hacking. – New-York: Addison-Wesley, 2004. – 376 p. 3. *Heiser J., Firstbrook P., Scholtz T.* Gartner Information Security Hype Cycle: [http://www.gartner.com/5\\_about/press\\_releases/pr11june2003c.jsp](http://www.gartner.com/5_about/press_releases/pr11june2003c.jsp), 2003 4. *Paul E., Amrit T.* Make Your IPS Work for You With Improved Tuning: [http://www.gartner.com/5\\_about/press\\_releases/august2006.jsp](http://www.gartner.com/5_about/press_releases/august2006.jsp), 2006 5. *Auger R., Barnett R.* Threat Classification: [http://www.webappsec.org/projects/threat/v1/WASC-TC-v1\\_0.txt](http://www.webappsec.org/projects/threat/v1/WASC-TC-v1_0.txt), 2004. 6. *Robert A., Ryan B.* Web Application Firewall Evaluation Criteria: <http://www.webappsec.org/projects/wafec/v1/wafec-v1.0.txt>, 2006. 7. *Bragg R., Strassberg K.* Network Security. – Osborne: McGraw-Hill, 2006. – 896 p. 8. *Coar C., Bowen R.* Apache Cookbook. – Sebastopol: O'Reilly, 2003. – 254 p. 9. *Ristic I.* Apache Security. – Sebastopol: O'Reilly, 2005. – 420 p. 10. *Низамутдинов М. Ф.* Тактика защиты и нападения на WEB-приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 432 с. 11. *Заинцев И. В.* Нейронные сети. Основные модели. – СПб.: БХВ-Петербург, 1999. – 458 с. 12. *Руденко О. Г., Бодянский С. В.* Штучни нейронни мрежи. – X: ТОВ "Компанія СМІТ", 2006. – 404 с.

*Поступила в редакцию 12.04.2007*

**П.Е. ПУСТОВОЙТОВ**, канд. техн. наук,  
**Н.И. ЯЩУК**

## **ТЕХНОЛОГИЯ МАРШРУТИЗАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ С УЧЕТОМ ДИНАМИКИ ТРАФИКА**

Запропоновано метод розв'язання задачі маршрутизації під час передачі сукупності пакетів з урахуванням динаміки зайнятості елементів комп'ютерної мережі. При розв'язанні задачі було запропоновано мінімаксний критерій. Показано, що задача, яку було поставлено, зводиться до послідовності двохіндексних задач призначення.

It was suggested the method of solving the routing problem during the package transfer, taking into account the dynamic of network hub overloading. Minimax criteria were suggested to solve the problem. It was shown, that the set problem comes to the sequence of two-index tasks.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** В современных компьютерных сетях в связи с непрерывным ростом объемов трафика между корреспондентами и ограниченностью пропускных способностей линий связи и узлов сети высокую актуальность приобретает проблема маршрутизации [1 – 3].

Задача маршрутизации состоит в отыскании для каждого передаваемого сообщения маршрута с указанием всех промежуточных пунктов между исходным и конечным пунктами, оптимального с точки зрения выбранного критерия.

На практике наиболее часто используемый критерий – минимизация суммарной задержки при прохождении маршрута, отождествляется с длиной маршрута. При этом традиционные алгоритмы решения задачи отыскания кратчайшего маршрута учитывают только задержки, возникающие при прохождении линий связи между узлами сети, игнорируя задержки в собственно узлах [4, 5]. Этот недостаток устраняется в [6], где поставлена и решена задача отыскания маршрута, минимизирующего соответствующую ему суммарную задержку. В этой работе рассмотрена методика расчета законов изменения во времени длины очереди сообщений, ожидающих начала обслуживания в каждом из узлов сети. Отыскиваемые законы используются в дальнейшем для построения маршрута с минимальной задержкой передаваемых сообщений. Полученный в [6] результат, помимо непосредственной полезности его использования, важен еще и потому, что выявил проблему, не рассматривавшуюся ранее. Дело в том, что при учете различий в уровне занятости узлов сети возникает необходимость отыскания рационального порядка передачи сообщений. Эта задача ранее не рассматривалась.

В связи с этим, **целью статьи** является отыскание рациональной организации работы сети при передаче совокупности пакетов от одного источника разным адресатам.

**Постановка задачи.** Пусть имеется источник сообщений, которые необходимо передать разным потребителям. Поставим задачу отыскания оптимального порядка передачи этих сообщений в предположении, что каждое из них будет доставлено адресату по оптимальному маршруту.

**Основные результаты.** При решении задачи маршрутизации для совокупности  $m$  передаваемых пакетов информации будем исходить из того, что для каждого из промежуточных узлов обработки информации известен закон изменения во времени  $g_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$  длины очереди пакетов, ожидающих начала обслуживания. Тогда, используя известную технологию [6], для любого из передаваемых пакетов можно найти маршрут, минимизирующий время доставки пакета получателю. Пусть при необходимости передачи  $m$  пакетов выбрана некоторая последовательность их передачи. Такая последовательность может быть задана следующим образом. Введем индикатор

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-й пакет передается } j\text{-м по порядку,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Тогда матрица  $X = (x_{ij})$  однозначно задает последовательность передачи пакетов, если для совокупности  $(x_{ij})$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ , выполняются ограничения

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, m; \quad (2)$$

$$x_{ij} \in \{0; 1\}, \quad i, j = 1, 2, \dots, m.$$

Выполнение совокупности ограничений (1) означает, что на каждое, например,  $j$ -е место в последовательности передаваемых пакетов назначен для передачи один пакет. Совокупность ограничений (2) определяет, что каждому пакету в общем порядке передачи назначено какое-то одно место.

Пусть теперь для конкретной пары  $(i, j)$  значение  $x_{ij} = 1$ . Примем, что длины пакетов не слишком сильно отличаются друг от друга и продолжительность передачи для любого из них равна  $\Delta$ . Тогда при передаче  $i$ -го пакета  $j$ -м по порядку с использованием [6] найдем кратчайший

маршрут, начинающийся в момент  $T_j = T_0 + (j-1)\Delta$ , и соответствующее этому маршруту время доставки  $T_{ij}$  пакета потребителю ( $T_0$  – момент начала передачи набора пакетов). Решая задачу для всех пар  $(i, j)$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, m$ , составим матрицу  $T = (T_{ij})$ .

В рассматриваемой ситуации имеется  $m!$  различных последовательностей передачи пакетов. Понятно, что при реальных значениях  $m$  их перебор бесперспективен. С целью отыскания наилучшего каким-либо разумным образом выбранного порядка передачи пакетов введем следующий естественный критерий – максимальное время доставки пакета, соответствующее этому выбранному порядку передачи пакетов. При этом для конкретного плана  $X = (x_{ij})$  значение критерия определяется соотношением

$$\eta(x) = \max_{i,j} \{T_{ij}x_{ij}\}. \quad (3)$$

Тогда задача выбора рационального порядка передачи пакетов сводится к следующей: найти план  $X = (x_{ij})$ , минимизирующий (3) и удовлетворяющий ограничениям (1) – (2). Полученная задача является минимаксной задачей назначения. Для ее решения предлагается следующая методика. Упорядочим множество значений  $T_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, m$ , следующим образом:

$$T_{i_1j_1} \geq T_{i_2j_2} \geq \dots \geq T_{i_qj_q} \geq \dots \geq T_{i_{mm}j_{mm}}.$$

С каждым элементом  $T_{i_qj_q}$ ,  $q \in \{1, 2, \dots, m^2\}$ , свяжем двухиндексную матрицу  $D^{(q)} = (d_{ij}^{(q)})$ , компоненты которой зададим соотношением

$$d_{ij}^{(q)} = \begin{cases} T_{ij}, & \text{если } T_{ij} < T_{i_qj_q}, \\ M, & \text{если } T_{ij} \geq T_{i_qj_q}, \end{cases}$$

где  $M$  – достаточно большое число (например,  $M = m^2 \max_{ij} \{T_{ij}\}$ ).

Пусть  $q = 1$ . При этом в матрице  $D^{(1)} = (d_{ij}^{(1)})$  будет один элемент, равный  $M$ , стоящий на месте  $i_1, j_1$ . Решим теперь задачу отыскания набора  $X = (x_{ij})$ , минимизирующего

$$L(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m d_{ij}^{(1)} x_{ij} \quad (4)$$

и удовлетворяющего (1) – (2). Это обычная задача назначения, которая может быть решена венгерским методом [7 – 9]. Если при этом значение  $L(X_1^*)$  на оптимальном плане задачи (1) – (2), (4) меньше  $M$ , то это означает, что

существует порядок передачи пакетов, при котором максимальное время передачи меньше  $T_{i_1 j_1}$ .

Положим теперь  $q = 2$ . В соответствующей матрице  $D^{(2)} = (d_{ij}^{(2)})$  будут два элемента, находящиеся на местах  $(i_1, j_1)$ ,  $(i_2, j_2)$ , равные  $M$ . Вновь решим задачу назначения с матрицей  $D^{(2)}$ . Аналогично предыдущему, из выполнения неравенства  $L(X_2^*) < M$  следует, что полученный на этом шаге порядок передачи пакетов  $X_2^*$  обеспечивает их передачу за время, не превосходящее  $T_{i_2 j_2}$ .

Продолжим решение задачи. Ясно, что рано или поздно найдется некоторое  $q = \bar{q}$  такое, что  $L(X_{\bar{q}}) < M$ , но  $L(X_{\bar{q}+1}) > M$ .

Это означает, что существует порядок передачи пакетов, в котором максимальное время передачи не превосходит  $T_{i_{\bar{q}}, j_{\bar{q}}}$ , но не существует порядка, для которого максимальное время меньше или равно  $T_{i_{\bar{q}+1}, j_{\bar{q}+1}}$ . Следовательно, план  $X_{\bar{q}}^*$  является искомым решением минимаксной задачи (1) – (3).

**Выводы.** Таким образом, предложен метод решения задачи маршрутизации при передаче совокупности пакетов с учетом динамики занятости элементов компьютерной сети. При решении задачи предложен минимаксный критерий. Показано, что поставленная задача сводится к последовательности двухиндексных задач назначения. Направление дальнейших исследований может быть связано с решением сформулированной задачи при учете различий в длине передаваемых пакетов.

**Список литературы:** 1. Ирвин Дж., Харль Д. Передача данных в сетях: инженерный подход. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 448 с. 2. Иртегов Д.В. Введение в сетевые технологии. – СПб.: БХВ – Петербург, 2004. – 560 с. 3. Куроуз Дж., Росс К. Компьютерные сети. – СПб.: Питер, 2004. – 765 с. 4. Столинг В. Современные компьютерные сети. – СПб.: Питер, 2003. – 783 с. 5. Таненбаум Э. Компьютерные сети. – СПб.: Питер, 2003. – 992 с. 6. Пустовойтов П.Е., Яцук Н.И. Динамическая маршрутизация в компьютерных сетях высокой размерности // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – № 3. – С. 68–71. 7. Юдин Д.Б., Гольштейн Е.Г. Задачи и методы линейного программирования. – М.: Сов. Радио, 1961. – 384 с. 8. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления. – М.: Сов. Радио, 1986. – 344 с. 9. Мину М. Математическое программирование. – М.: Наука, 1990. – 485 с.

*Поступила в редакцию 04.04.2007*

*А.Е. ПУТЯТИНА*, ХНУРЭ (г. Харьков)

## **УПРАВЛЕНИЕ НЕГОСУДАРСТВЕННЫМИ ПЕНСИОННЫМИ ФОНДАМИ В УСЛОВИЯХ РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ЭКОНОМИКИ**

Розроблені математичні моделі управління та оцінки діяльності недержавних пенсійних фондів в умовах економіки, яка розвивається. В умовах нестабільного фінансового ринку часто буває необхідним враховувати в управлінських моделях банкрутство, реструктуризацію, вливання капіталу. У статті наведені красиві задачі для визначення поточного розміру пенсійних внесків та обчислення вартості фінансових інструментів для захисту від дефолта. Наведені розв'язки рівнянь у аналітичному вигляді у формі рядов Фур'є.

The paper describes mathematical models of management and evaluating the activity of non-state pension funds in developing economy. In conditions of unstable financial market it is often necessary to take into account bankruptcy, restructuring, capital injection in management models. In this paper boundary problems that allow the manager to determine the fair value of pension policies and default hedging instruments are derived. The analytical solutions to these problems are given in the form of Fourier series.

**Постановка проблеми.** В течение многих лет в Украине и в странах СНГ основной пенсионной системой являлась солидарная пенсионная система. Однако, когда в конце прошлого столетия уровень рождаемости упал, солидарная пенсионная система перестала выполнять свои функции. Это и привело к необходимости пенсионной реформы.

Основная идея пенсионной реформы – построение трехуровневой системы пенсионного обеспечения, основным звеном которой станут негосударственные пенсионные фонды, средства которых могут стать мощным источником внутренних инвестиций.

На Украине экономика и финансовый рынок находятся на стадии развития. Поэтому в таких условиях негосударственный пенсионный фонд может попасть в ситуацию банкротства. В случае реструктуризации негосударственный пенсионный фонд забирает назад часть своих обязательств во избежание банкротства. Вливание капитала является также одной из мер для избежания дефолта.

Негосударственные пенсионные фонды играют важную роль в повышении уровня пенсионного обеспечения и улучшении социального благосостояния населения. В связи с этим в условиях перехода на новую трехуровневую систему пенсионного обеспечения, разработка стратегий эффективного управления негосударственными пенсионными фондами является актуальной задачей.

**Анализ литературы.** В работе [1] рассматриваются особенности новой трехуровневой пенсионной системы, и обосновывается необходимость применения математических методов для управления и оценки негосударственных пенсионных фондов. Большинство рыночных моделей

основываются на принципе оценки без риска и строятся на теории Блэка-Шоулза, рассмотренной в [2, 3]. Одной из модификаций модели Блэка-Шоулза является модель Мертона оценки стоимости фирмы [4, 5], которая может быть использована для управления деятельностью государственных пенсионных фондов. Однако эта модель не применима для управления негосударственными пенсионными фондами, т.к. в ней не учитывается механизм распределения прибыли фонда [6]. Математическая модель, которая позволяет оценить деятельность негосударственных пенсионных фондов с учетом механизма распределения прибыли при успешной инвестиционной деятельности фонда, была рассмотрена в статье [7]. Модель, использующая такой подход, эффективна не только в странах с устойчивой рыночной экономикой, но и в развивающихся странах.

В данной статье рассматривается модификация математической модели [7] с учетом возможного банкротства, реструктуризации и вливания капитала. К основным задачам статьи относятся постановка и решение краевых задач для управления негосударственными пенсионными фондами с использованием метода Фурье [8].

Эта модель также применима для оценки деятельности и страховых компаний.

**Цель статьи** – оптимизация размера денежных взносов в негосударственные пенсионные фонды и оптимизация стратегий страхования в условиях развивающейся экономики.

**Математическая модель.** Необходимо определить оптимальный размер пенсионных взносов и оптимальную стоимость инструмента хеджирования негосударственного пенсионного фонда с учетом банкротства, реструктуризации или вливания капитала. Уравнение имеет вид:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + r_g V \frac{\partial p}{\partial V} + rW \frac{\partial p}{\partial W} + \frac{1}{2} \sigma^2 W^2 \frac{\partial^2 p}{\partial W^2} - rp = 0,$$

где  $p$  – стоимость пенсионного полиса или опциона put-to-default (определяется граничным условием);  $V$  – пассивы фонда;  $W$  – активы фонда,  $t$  – время;  $r$  – банковская процентная ставка;  $r_g$  – процентная ставка гарантированная пенсионным полисом;  $\sigma$  – изменчивость активов.

Распределение прибыли задается краевым условием в точке  $1 + \beta$ , ( $\beta > 0$ , пороговый параметр):

$$\frac{\partial p}{\partial V} = 0 \Big|_{W/V=1+\beta}.$$

Условие банкротства задается следующей формулой

$$p = W \Big|_{W/V=1-\gamma}.$$

В случае вливания капитала краевое условие принимает вид

$$\frac{\partial p}{\partial W} = 0 \Big|_{W/V=1-\gamma}.$$

При реструктуризации краевое условие задается формулой

$$\frac{\partial p}{\partial V} = 0 \Big|_{W/V=1-\gamma}.$$

Для приведения задачи к каноническому виду используем замену переменных

$$p(W, V, t) = Vu(x, t),$$

где  $x = \ln(W/V)$ ,  $(T - t) \cdot \sigma^2 / 2 = \tau$ .

**Банкротство.** Банкротство негосударственного пенсионного фонда наступает, если количество активов фонда меньше его пассивов, и фонд не в состоянии выплатить по своим обязательствам. В случае банкротства пенсионного фонда, держатели пенсионных полисов получают все имеющиеся активы фонда.

В результате замены переменных задачу можно сформулировать следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial u}{\partial x} (k - 1) - ku,$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u \Big|_{x=\ln(1+\beta)} \quad (\text{распределение прибыли});$$

$$u = b > 0 \Big|_{x=\ln(1-\gamma)} \quad (\text{банкротство}),$$

где  $\tau$  – время;  $k = 2r - r_g / \sigma^2$ ;  $b = 1 - \gamma$  для полиса и  $b = \gamma$  для put-опциона,  $0 < \gamma < 1$ . Начальное условие для полиса имеет вид  $\min(W, V)$  или в безразмерных переменных  $\min(e^x, 1)$ , а для put-опциона  $\max(1 - e^x, 0)$ . Далее сделаем начальные условия однородными и сведем задачу к канонической форме. Подставим  $\tilde{v}(x, t)$  вместо  $u(x, t)$ . Определим  $u(x, t)$  как:

$$u(x, \tau) = \tilde{v}(x, \tau) e^{ax+c\tau},$$

$$a = -\frac{k-1}{2}, \quad c = -\frac{(k+1)^2}{4}.$$

В результате получим

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} = \varphi \tilde{v} \Big|_{x=\ln(1+\beta)} \text{ (распределение прибыли);}$$

$$\tilde{v} = \tilde{b}(\tau) > 0 \Big|_{x=\ln(1-\gamma)} \text{ (банкротство),}$$

$$\text{где } \tilde{b}(\tau) = \frac{be^{c\tau}}{(1-\gamma)^a} \text{ и } \varphi = \frac{k+1}{2}.$$

Для того, чтобы сделать граничные условия однородными, подставим  $\tilde{v}(x, \tau)$  вместо  $v(x, \tau)$ :

$$\tilde{v}(x, \tau) = \tilde{b}(\tau) + \frac{\varphi \tilde{b}(\tau)}{1-\varphi l} x + v(x - \ln(1-\gamma), \tau).$$

$$\text{где } l = \ln(1+\beta) - \ln(1-\gamma).$$

Получим

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + f(x, \tau); \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \varphi v \Big|_{x=l} \text{ (распределение прибыли);} \tag{2}$$

$$v = 0 \Big|_{x=0} \text{ (банкротство),} \tag{3}$$

$$\text{где } f(x, \tau) = -\frac{(1-\varphi)l + \varphi x}{1-\varphi l} \frac{d\tilde{b}}{d\tau} = -\frac{bce^{c\tau}}{(1-\gamma)^a} \frac{(1-\varphi)l + \varphi x}{1-\varphi l}.$$

Так как  $c < 0$ , однородная часть  $f(x, \tau)$  стремится к нулю при  $\tau \rightarrow \infty$ .

Рассмотрим задачу Штурма-Лиувилля в пространстве  $C^2(0,1)$ .

$$Dv = \lambda v; \quad D = -\frac{d^2}{dx^2},$$

где  $D$  – оператор в пространстве  $C^2(0,1)$ ;  $\lambda$  – действительное собственное число симметричного оператора  $D$ . В этом пространстве функции удовлетворяют граничным условиям (2) и (3).

Задача Штурма-Лиувилля имеет следующий набор собственных векторов  $v_k$ , и собственных чисел  $\mu_k = \lambda_k^2$ :

$$v_k(x) = \sin(\lambda_k x),$$

$$\text{где } \lambda_k > 0: \quad \varphi \tan(\lambda_k l) = \lambda_k.$$

Трансцендентное уравнение для  $\lambda_k$  имеет счетное число неотрицательных корней. Также имеется отрицательный спектр  $\mu_0 = -\lambda_0^2$  задачи Штурма-Лиувилля:

$$v_0(x) = \sinh(\lambda_0 x),$$

где  $\lambda_0 > 0$ :  $\varphi \tanh(\lambda_0 l) = \lambda_0$ .

Набор собственных функций, полученный при решении задачи Штурма-Лиувилля, образует ортогональный базис в пространстве  $L_2(0, l)$ .

Полнота ортогональной системы позволяет нам записать общее решение однородной задачи, соответствующей задаче (1), используя ряды Фурье [6]:

$$v_{hom}(x, \tau) = B_0 e^{\lambda_0^2 \tau} \sinh(\lambda_0 x) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k e^{-\lambda_k^2 \tau} \sin(\lambda_k x),$$

где  $B_k$ ,  $k = \overline{0, \infty}$  определяется начальными условиями,

$$B_0 = \frac{2}{\sinh(2\lambda_0 l)/(2\lambda_0) - l} \int_0^l v(0, x) \sinh(\lambda_0 x) dx;$$

$$B_k = \frac{2}{1 - \sinh(2\lambda_k l)/(2\lambda_k)} \int_0^l v(0, x) \sinh(\lambda_k x) dx \quad \text{для } k \geq 1.$$

Рассмотрим теперь неоднородную часть системы. Для этого разложим неоднородную часть  $f(x, \tau)$ , используя тот же набор собственных функций.

Предположим, что  $f_k(\tau)$  являются коэффициентами разложения, тогда будем решать систему обыкновенных дифференциальных уравнений для  $z_k = z_k(\tau)$ , с нулевым начальным условием

$$\frac{dz_k}{d\tau} = -\mu_k z_k + f_k(\tau), \quad k = \overline{0, \infty}, \quad z_k(0) = 0.$$

Решение этой системы уравнений получается из формулы Коши

$$z_k(\tau) = \int_0^{\tau} f_k(s) e^{-\mu_k(\tau-s)} ds, \quad k = \overline{0, \infty}.$$

Частное решение неоднородной задачи (1) выглядит так:

$$v_{inhom}(x, \tau) = z_0(\tau) \sinh(\lambda_0 x) + \sum_{k=1}^{\infty} z_k(\tau) \sin(\lambda_k x).$$

Решение задачи (1) может быть представлено как сумма однородных и неоднородных частей

$$v(x, \tau) = (B_0 e^{\lambda_0^2 \tau} + z_0(\tau)) \sinh(\lambda_0 x) + \sum_{k=1}^{\infty} (B_k e^{-\lambda_k^2 \tau} + z_k(\tau)) \sin(\lambda_k x).$$

**Вливание капитала.** Негосударственный пенсионный фонд может получать мгновенную финансовую инъекцию  $\Delta W > 0$  от спонсора каждый раз, когда наступает банкротство (т.е. когда  $W/V < 1 - \gamma$ ). Краевая задача в этом случае имеет вид:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial u}{\partial x}(k-1) - ku;$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u \Big|_{x=\ln(1+\beta)} \quad (\text{распределение прибыли});$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0 \Big|_{x=\ln(1-\gamma)} \quad (\text{вливание капитала}).$$

Далее, обозначим

$$u(x, \tau) = v(x - \ln(1-\gamma), \tau).$$

В результате этой замены переменных получим

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \varphi v \Big|_{x=1} \quad (\text{распределение прибыли});$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0} \quad (\text{вливание капитала}).$$

Положительный спектр задачи Штурма-Лиувилля ( $\mu_k = \lambda_k^2$ ) удовлетворяет следующему трансцендентному уравнению  $\varphi \tan(\lambda_k l) = -\lambda_k$  и имеет собственные функции  $v_k(x) = \cos(\lambda_k x)$ . Как и в предыдущем случае, существует и отрицательное собственное значение  $\mu_0 = -\lambda_0^2$ , которое удовлетворяет уравнению  $\varphi \tanh(\lambda_0 l) = \lambda_0$  и соответствует собственной функции  $v_0(x) = \cosh(\lambda_0 x)$ . Как и раньше, решение запишем с использованием ортогонального множества собственных функций на  $[0, l]$ , которые удовлетворяют соответствующим граничным условиям

$$v(x, \tau) = B_0 e^{\lambda_0^2 \tau} \cosh(\lambda_0 x) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k e^{-\lambda_k^2 \tau} \cos(\lambda_k x),$$

где  $B_k$ ,  $k = 0, \infty$  получено из начального условия для собственных функций;

$$B_0 = \frac{2}{l + \sinh(2\lambda_0 l)/(2\lambda_0)} \int_0^1 v(x, 0) \cosh(\lambda_0 x) dx;$$

$$B_k = \frac{2}{l + \cos(2\lambda_k l)/(2\lambda_k)} \int_0^1 v(x, 0) \cos(\lambda_k x) dx, \quad k \geq 1.$$

**Реструктуризация.** Когда отношение активов негосударственного пенсионного фонда к его пассивам становится ниже определенного порога, и вливание капитала невозможно, негосударственный пенсионный фонд вынужден взять некоторые обязательства назад. Это не очень хороший способ решения проблемы, в результате применения которого пенсионный фонд

может быть вынужден защищать правомерность своих действий в суде, однако иногда такие действия лучше, чем банкротство. Математически задача может быть сформулирована следующим образом

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial u}{\partial x} (k-1) - ku;$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u \Big|_{x=\ln(1-\beta)} \quad (\text{распределение прибыли});$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = u \Big|_{x=\ln(1-\gamma)} \quad (\text{реструктуризация}).$$

Задача формулируется следующим образом:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 v}{\partial x^2};$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \varphi v \Big|_{x=l} \quad (\text{распределение прибыли});$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \varphi v \Big|_{x=0} \quad (\text{реструктуризация}).$$

Задача Штурма-Лиувилля имеет следующий набор собственных функций:

$$v_k(x) = \frac{k\pi}{\phi l} \cos\left(\frac{\pi k}{l} x\right) + \sin\left(\frac{\pi k}{l} x\right); \quad (4)$$

$$\mu_k = \left(\frac{\pi k}{l}\right)^2, \quad k = 1, \dots, \infty;$$

$$v_0(x) = e^{\varphi x}, \quad \mu_0 = -\varphi^2. \quad (5)$$

Система этих функций является ортогональной и полной в пространстве  $L_2(0, l)$ . Это позволяет представить решение задачи в виде ряда Фурье

$$v(x, \tau) = B_0 e^{\varphi^2 \tau} v_0(x) + \sum_{k=1}^{\infty} B_k e^{-(\pi k/l)^2 \tau} v_k(x).$$

Коэффициенты  $B_k$ ,  $k = 0, \infty$  определяются следующим образом:

$$B_k = \frac{2}{l + l(\pi k/\phi l)^2} \int_0^l v(x, 0) v_k(x) dx, \quad B_0 = \frac{2\varphi}{\exp(2\varphi l) - 1} \int_0^l v(x, 0) v_0(x) dx.$$

**Выводы.** В статье разработаны и обоснованы математические модели, которые могут быть применены для управления (определения оптимального размера пенсионных взносов и оптимальной стоимости инструментов для защиты от риска дефолта) негосударственными пенсионными фондами в условиях развивающейся рыночной экономики.

Полученные математические модели могут применяться для управления негосударственными пенсионными фондами в условиях банкротства, реструктуризации и вливания капитала. Применение управленческих подходов, которые уже долгое время используются для управления пенсионными фондами в Европе, может быть очень актуальным и полезным в рамках новой пенсионной системы.

**Список литературы:** 1. *Юровский Б.С.* Пенсии государственные и негосударственные: на что можно рассчитывать. – Харьков: Центр «Консульт», 2005. – 248 с. 2. *Black, F., Scholes, M.* The pricing of Options and Corporate Liabilities // *Journal of Political Economy.* – 1973. – Vol. 81. – 637 p. 3. *Hull John C.* Options, Futures, and other Derivative Securities. New Jersey: Prentice Hall Inc. – 1993. – 492 p. 4. *Merton R.C.* On pricing of corporate debt: the risk structure of interest rates // *Journal of Finance* – 1974. – Vol. 29. – P. 449–470. 5. *Schonbucher Philipp J.* Credit Derivatives Pricing Models; Models, Pricing and Implementation. Chichester: Wiley Finance. – 2003. – 375 p. 6. *Prieul D.* On Pricing and Reserving with-profits Life Insurance Policies // *Applied Mathematical Finance.* – 2001. – № 8. – P. 145–166. 7. *Putyatina Oleksandra.* Designing an Information System for Pension Fund Management // *Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference CADSM.* – 2007. – Lviv-Polyana, Ukraine. – P. 404–405. 8. *Hildebrand Francis. B.* Methods of Applied Mathematics. – Dover Publications, Inc. New York – 1992.

*Поступила в редакцию 06.04.2007*

*О.В. СЕРАЯ*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*АМЕР ШАДИ*, НТУ "ХПИ"

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПО МАЛОЙ ВЫБОРКЕ НАБЛЮДЕНИЙ**

Розглянуто проблему відшукування аналітичного опису залежності щільності розподілу безвідмовної роботи системи від режиму її експлуатації. Показано, що ця задача може бути розв'язана шляхом параметризації шуканої щільності.

The search task of analytical description of dependence of probability density of faultless work parameters from the mode exploitation is considered. It is shown that this task can be decided by parametrization of the desired dependence of probability.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Эффективность функционирования сложных комплексов технических средств определяется их техническим состоянием (ТС), под которым понимается совокупность подверженных изменению свойств изделия, характеризуемая признаками, установленными технической документацией [1]. Признаками технического состояния могут быть [2] значения наработки, показатели надежности, значения показателей технического состояния. В связи с тем, что продолжительность, режим и условия эксплуатации различных ОЭ могут существенно отличаться друг от друга, соответствующие отличия будут иметь и зависимости, описывающие эволюцию показателей ТС. По этой причине статистические данные об отказах различных образцов однотипных ОЭ не могут расцениваться как выборки из одной и той же генеральной совокупности. При этом использование традиционных методов статистической обработки результатов контроля технического состояния, ориентированных на однородные выборки [3, 4], приводит к необходимости формирования групп объектов контроля, режимы и условия эксплуатации которых одинаковы или близки, то есть к дроблению исходного статистического материала, делая однородные выборки малыми. Точность оценивания показателей ТС при этом, естественно, уменьшается. Таким образом, чем более индивидуализированной по режимам и условиям эксплуатации является оценка показателей ТС, тем хуже ее качество. С учетом этого в [5] предложена методика, суть которой состоит в отказе от групповой обработки однородных выборок данных и в переходе к совместной обработке результатов контроля не отдельных групп, а всех ОЭ с учетом условий и режимов их эксплуатации. В этой работе показатели технического состояния системы, в частности, закон изменения интенсивности отказов, описаны как функции набора факторов, задающих режим и условия эксплуатации ОЭ. Совместная обработка данных о результатах контроля разных ОЭ, эксплуатируемых в разных условиях, позволяет найти зависимости параметров

ТС от численных значений характеристик режима и условий эксплуатации. К сожалению, эта идея не может быть непосредственно использована для решения многих важных надежности задач, например, долгосрочного прогнозирования безотказности ОЭ. Для решения этой задачи нужно уметь рассчитывать плотность распределения работы ОЭ до отказа в зависимости от режима и условий эксплуатации.

**Цель статьи** – отыскание зависимости плотности распределения безотказной работы системы по данным об ее эксплуатации в разных условиях.

**Постановка задачи.** Пусть в эксплуатации находится некоторое количество однотипных систем (например, станков на крупном промышленном предприятии). Для каждой системы интервал от момента начала функционирования до текущего момента может быть разбит на подынтервалы, в пределах которых условия и режим эксплуатации не меняются. Если этих подынтервалов несколько, то условно можно считать, что имеется соответствующее количество однотипных систем, эксплуатируемых в соответствующих условиях. Введем набор  $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)$  характеристик режима и условий эксплуатации ОЭ. К их числу можно отнести: общую продолжительность эксплуатации, общую наработку под током, среднюю наработку под током в единицу времени (например, сутки), среднее число включений в единицу времени и т.п. Пусть в эксплуатации находятся  $n$  систем, режим и условия эксплуатации которых описывается набором векторов

$$\begin{aligned}
 \Phi_1 &= (F_{11}, F_{12}, \dots, F_{1m}); \\
 \Phi_2 &= (F_{21}, F_{22}, \dots, F_{2m}); \\
 &\dots\dots\dots \\
 \Phi_j &= (F_{j1}, F_{j2}, \dots, F_{jm}); \\
 &\dots\dots\dots \\
 \Phi_n &= (F_{n1}, F_{n2}, \dots, F_{nm}).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Техническое состояние этих ОЭ контролируется и имеются данные об отказах каждого из них. Общий интервал наблюдения  $[0, T_{\max}]$  за техническим состоянием всех ОЭ разбит на  $N$  подынтервалов длиной  $\Delta$  следующим образом  $[0, \Delta], [\Delta, 2\Delta], \dots, [(N-1)\Delta, T_{\max}]$ . Для каждого ОЭ независимо оценивается значение параметра потока отказов на каждом из подынтервалов

$$\hat{w} = \frac{r_{jk}}{\Delta},$$

где  $\hat{w}_{jk}$  – оценка параметра потока отказов  $j$ -го ОЭ на  $k$ -м подынтервале;  $r_{jk}$  – число отказов  $j$ -го ОЭ на  $k$ -м подынтервале. Введем плотность распределения продолжительности безотказной работы  $j$ -го ОЭ в виде [6]

$$\varphi_j(t) = A_j \left[ 1 + \theta_{4j}(\Phi_j) \frac{(t - \theta_{1j}(\Phi_j))^2}{2\theta_{2j}^2(\Phi_j)} \times \exp \left\{ -\frac{(t - \theta_{1j}(\Phi_j))^2}{2\theta_{2j}^2(\Phi_j)} \times (1 + \theta_{3j}(\Phi_j)(t - \theta_{1j}(\Phi_j))) \right\} \right]. \quad (2)$$

Множитель  $A_j$  находится из условия нормировки. Задача формулируется следующим образом: с использованием приведенных исходных данных найти зависимости  $\theta_1(F)$ ,  $\theta_2(F)$ ,  $\theta_3(F)$ ,  $\theta_4(F)$ . Знание этих зависимостей обеспечивает возможность расчета важнейших надежностных характеристик ОЭ: вероятности безотказной работы в заданных условиях, среднее число отказов в течение заданного временного интервала при эксплуатации ОЭ в заданном режиме и т.п.

**Основные результаты.** Введем модель изменения параметра потока отказов в виде

$$w(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_d t^d. \quad (3)$$

Параметры модели (3) для каждого конкретного ОЭ найдем, обрабатывая данные об отказах этого объекта, с использованием метода наименьших квадратов (МНК). Введем матрицу  $H$  и векторы  $A_j$ ,  $\hat{w}_j$

$$H = \begin{pmatrix} 1 & \Delta & \Delta^2 & \dots & \Delta^d \\ 1 & 2\Delta & (2\Delta)^2 & \dots & (2\Delta)^d \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & (N\Delta) & (N\Delta)^2 & \dots & (N\Delta)^d \end{pmatrix}; \quad A_j = \begin{pmatrix} a_{0j} \\ a_{1j} \\ \dots \\ a_{dj} \end{pmatrix}; \quad \hat{w}_j = \begin{pmatrix} \hat{w}_{j1} \\ \hat{w}_{j2} \\ \dots \\ \hat{w}_{jN} \end{pmatrix}.$$

Тогда наилучшие в смысле МНК оценки  $\hat{A}_j$  найдем по формуле

$$\hat{A}_j = (H^T H)^{-1} H^T \hat{w}_j, \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

Подстановка (4) в (3) дает закон изменения параметра потока отказов для  $j$ -го ОЭ. Как известно [7, 8], закон изменения параметра потока отказов  $w(t)$  и плотность распределения наработки до отказа связаны интегральным уравнением Вольтерры второго рода с разностным ядром

$$w(t) = \varphi(t) + \int_0^t \varphi(t-\tau)w(\tau)d\tau, \quad (5)$$

откуда для  $j$ -го ОЭ

$$\varphi_j(t) = w_j(t) - \int_0^t w_j(t-\tau)\varphi_j(\tau)d\tau. \quad (6)$$

Для решения уравнения (5) используем метод Нелдера-Мида [9, 10]. С этой целью введем матрицу

$$D = \begin{pmatrix} \theta_1^{(0)} & \theta_1^{(0)} + d_1 & \theta_1^{(0)} + d_2 & \theta_1^{(0)} + d_2 & \theta_1^{(0)} + d_2 \\ \theta_2^{(0)} & \theta_2^{(0)} + d_2 & \theta_2^{(0)} + d_1 & \theta_2^{(0)} + d_2 & \theta_2^{(0)} + d_2 \\ \theta_3^{(0)} & \theta_3^{(0)} + d_2 & \theta_3^{(0)} + d_2 & \theta_3^{(0)} + d_1 & \theta_3^{(0)} + d_2 \\ \theta_4^{(0)} & \theta_4^{(0)} + d_2 & \theta_4^{(0)} + d_2 & \theta_4^{(0)} + d_2 & \theta_4^{(0)} + d_1 \end{pmatrix},$$

$$d_1 = \frac{1}{4\sqrt{2}}(\sqrt{5} + 3), \quad d_2 = \frac{1}{4\sqrt{2}}(\sqrt{5} - 1),$$

задающую набор векторов  $\underline{\theta}^{(1)}, \underline{\theta}^{(2)}, \underline{\theta}^{(3)}, \underline{\theta}^{(4)}, \underline{\theta}^{(5)}$  параметров распределения (2). Для каждого из полученных при этом распределений  $\varphi_j(\underline{\theta}^{(s)}, t)$ ,  $s = \overline{1, 5}$ , решается интегральное уравнение

$$w_j^{(s)}(t) = \varphi_j(\underline{\theta}^{(s)}t) + \int_0^t w_j^{(s)}(t-\tau)\varphi_j^{(s)}(\underline{\theta}^{(s)}, \tau)d\tau, \quad s = \overline{1, 5}. \quad (7)$$

Введем критерий качества плотности распределения продолжительности безотказной работы, численное значение которого определяется различием между наблюдаемым законом изменения параметра потока отказов  $w_j(t)$  и получающимся в результате решения уравнения (7). Этот критерий имеет вид

$$J^{(s)} = \int_0^{\Delta} [w_j(t) - w_j^{(s)}(t)]^2 dt, \quad s = \overline{1, 5}. \quad (8)$$

Далее выполняется процедура Нелдера-Мида. В результате ее реализации получим набор  $(\theta_{j1}, \theta_{j2}, \theta_{j3}, \theta_{j4})$ , однозначно задающий искомую плотность распределения безотказной работы для  $j$ -го ОЭ. Решим эту задачу для всех подконтрольных объектов эксплуатации. Теперь зададим зависимости параметров плотности распределения продолжительности безотказной работы от характеристик режима и условий эксплуатации:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= b_{10} + b_{11}F_1 + \dots + b_{1m}F_m; & \theta_2 &= b_{20} + b_{21}F_1 + \dots + b_{2m}F_m; \\ \theta_3 &= b_{30} + b_{31}F_1 + \dots + b_{3m}F_m; & \theta_4 &= b_{40} + b_{41}F_1 + \dots + b_{4m}F_m. \end{aligned} \quad (9)$$

Параметры уравнений регрессии (9) найдем, вновь используя метод наименьших квадратов.

Введем матрицу  $M$ , а также векторы  $\hat{\theta}_k$ ,  $\hat{B}_k$ ,  $k=1, 2, 3, 4$ , следующим образом

$$M = \begin{pmatrix} 1 & F_{11} & F_{12} & \dots & F_{m1} \\ 1 & F_{21} & F_{22} & \dots & F_{m2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & F_{j1} & F_{j2} & \dots & F_{jm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & F_{n1} & F_{n2} & \dots & F_{nm} \end{pmatrix}; \hat{\theta}_k = \begin{pmatrix} \theta_{k1} \\ \theta_{k2} \\ \dots \\ \theta_{kj} \\ \dots \\ \theta_{kn} \end{pmatrix}; \hat{B}_k = \begin{pmatrix} b_{k0} \\ b_{k1} \\ b_{k2} \\ \dots \\ b_{km} \end{pmatrix}, k=1, 2, 3, 4.$$

Теперь

$$\hat{B}_k = (M^T M)^{-1} M^T \hat{\theta}_k, k=1, 2, 3, 4. \quad (10)$$

Подстановка (10) в (9) дает описание искомой зависимости параметров плотности распределения продолжительности безотказной работы для любого набора характеристик режима и условий эксплуатации.

**Выводы.** Таким образом, получена методика, обеспечивающая возможность отыскания зависимости плотности распределения продолжительности безотказной работы системы от режима и условий ее эксплуатации. Показано, что задача может быть решена путем параметризации искомой зависимости в результате обработки реальных данных об отказах систем, эксплуатируемых в разных условиях. Дальнейшие исследования этой проблемы связаны с использованием полученной плотности распределения безотказной работы для расчета оставшегося ресурса системы в зависимости от режима ее эксплуатации.

**Список литературы:** 1. ГОСТ 27002-83. Надежность в технике. Термины и определения. – М., 1983. – 300 с. 2. ГОСТ 19919-74. Контроль автоматизированный технического состояния. Термины и определения. – М., 1974. – 12 с. 3. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалевский А.В. Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1974. – 224 с. 4. Лавриненко В.Ю. Основы эксплуатации аппаратуры. – М.: Высшая школа, 1998. – 320 с. 5. Зубарев В.В., Ковтуненко А.П., Раскин Л.Г. Математические методы оценки и прогнозирования технических показателей эксплуатационных свойств радиоэлектронных систем. – К.: Изд.-во НАУ, 2005. – 184 с. 6. Серая О.В. Модели и информационные технологии оценки и прогнозирования состояния многомерных динамических объектов в условиях нечетких входных данных: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06. – Х., 2001. – 252 с. 7. Вопросы теории эксплуатации автоматизированных транспортных систем управления / Под ред. Л.Г. Раскина – Х.: Изд. ХВУ, 2000. – 266 с. 8. Михайлов А.В. Надежность радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 2002. – 264 с. 9. Раскин Л.Г. Математическое программирование. – Х.: НТУ "ХПИ", 2002. – 124 с. 10. Косоруков О.А., Мищенко А.В. Исследование операций. – М.: Экзамен, 2003. – 448 с.

Поступила в редакцию 29.03.2007

**А.Н. РЫСОВАНЬИЙ**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
**В.В. ГОГОТОВ**, НТУ "ХПИ"

### **ВЫБОР ПОЛИНОМОВ ДЛЯ СИГНАТУРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ В ПОЛЕ ГАЛУА $GF(3)$ ПО КРИТЕРИЮ СЛОЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ**

Показаний підхід до вибору поліномів з  $degP(x) = 4$  для регістрів із зворотними зв'язками по критерію складності технічної реалізації на основі повного списку поліномів для кінцевого поля Галуа  $GF(3)$ .

Approach is shown to the choice of polynomials with  $degP(x) = 4$  for registers with feed-backs on the criterion of complication of technical realization on the basis of complete list of polynomials for the eventual field of Galua of  $GF(3)$ .

**Постановка проблемы.** Широкое распространение радиоэлектронных устройств с применением цифровой обработки сигналов обуславливает повышенный интерес к вопросам диагностирования их технического состояния.

Одной из разновидностей диагностирования цифровых узлов и блоков является тестовое диагностирование, применение которого на этапе проектирования и изготовления цифровых узлов позволяет определить правильность их функционирования и осуществить процедуру поиска неисправностей. При разработке тестовой диагностики возникает сложность в определении эталонных реакций при тестировании существующих схем, в определении оптимального числа контрольных точек для снятия выходной реакции диагностируемой цифровой схемы. Это можно сделать, либо создавая прототип разрабатываемого цифрового устройства и проводя его диагностику аппаратными методами, либо осуществляя моделирование на персональном компьютере как цифрового устройства, так и процесса диагностики. Наиболее рациональным является второй подход, который предполагает создание автоматизированных систем диагностики, позволяющих производить диагностику цифровых схем на стадии проектирования. Наибольший интерес представляют системы диагностики с использованием нелинейных регистров сдвига с обратными связями [1 – 4], вопросы синтеза и применения которых нуждаются в дальнейших совершенствованиях.

До настоящего времени не существовало полного списка полиномов для конечного поля Галуа  $GF(3)$ , которые обладали бы определенными обнаруживающими способностями и возможностью определять классы ошибок в зависимости от длины исследуемой последовательности.

Таким образом, возникает необходимость в разработке методики выбора полиномов для конечного поля  $GF(p^m)$ , которая бы позволяла находить полиномы с генерацией последовательности максимальной длины.

**Анализ литературы.** Регистры сдвига с обратными связями находят широкое применение при построении тестовых генераторов [5, 6], при этом, наиболее простой путь заключается в построении линейных регистров сдвига с обратными связями [7, 8]. Однако [9, с. 61] "... в настоящее время мы располагаем весьма скудной информацией о построении нелинейных кодеров". В работе [10, с. 3] речь идет о том, что "... разрыв между практикой и математической теорией недвоичного помехоустойчивого кодирования не сокращается или сокращается недостаточно быстрыми темпами". Общие принципы построения и применения сигнатурного анализа приводятся в работе [11]. Однако, в этих работах не рассматриваются вопросы выбора полиномов для конечного поля  $GF(p^m)$ , ответы на которые позволяли бы находить полиномы с генерацией последовательности максимальной длины, а в дальнейшем, и определять полиномы с определенным классом обнаруживаемых ошибок.

**Целью статьи** является получение полного списка полиномов на примере конечного поля Галуа  $GF(3)$  с анализом длин последовательностей.

**Основная часть.** Современные цифровые устройства, как правило, являются многовыходными. Поэтому на этапе их контроля возникает задача анализа реакций по всем выходам цифрового устройства на подачу на входы по определенному закону тестовых последовательностей. Такое исследование можно осуществить с помощью применения многоканальных сигнатурных анализаторов.

Математическая запись полиномов для регистров сдвига имеет вид:  $P(x) = a_0x^n \oplus_k a_1x^{n-1} \oplus_k \dots \oplus_k a_n$ , где при  $k = 2$  выполняется сложение по mod2. Если коэффициент при нулевой степени аргумента  $a_n = 1$ , то такой полином называется характеристическим. Для нелинейных регистров сдвига с обратными связями для конечного поля Галуа  $GF(3)$   $a_n, a_0 \in \{1, 2\}, a_i \in \{0, 1, 2\}$  при  $i = \overline{1, n-1}$ . Таким образом, нелинейные регистры сдвига с обратными связями могут и не быть характеристическими.

Функциональная схема одноканального нелинейного сигнатурного анализатора с полиномом  $P(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1$  приведена на рис.

В общем случае число состояний  $l$  для конечного поля  $GF(p^m)$  будет определяться выражением:

$$l = p^m - 1. \quad (1)$$

Таким образом, число состояний  $l$  при  $\deg P(x) = 4$  в поле  $GF(3)$  равно:

$$l = 3^n - 1 = 80.$$

Следовательно, к полиномам максимальной длины при  $\deg P(x) = 4$  в конечном поле  $GF(3)$  необходимо относить полиномы, которые генерируют число своих состояний  $l = 80$ .

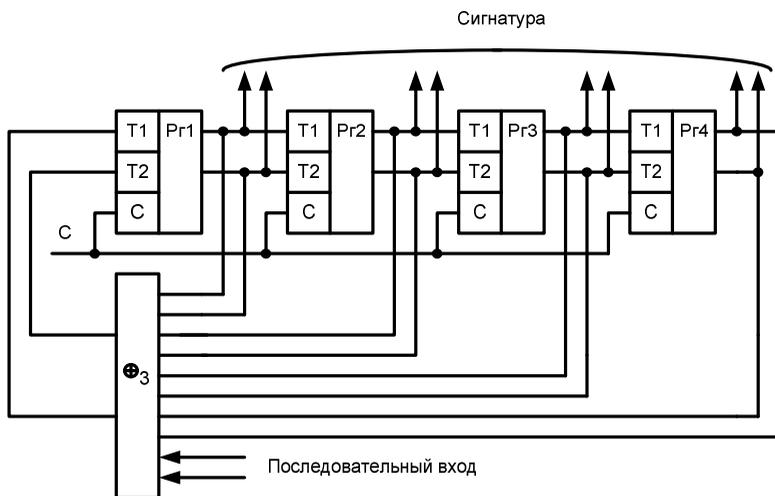


Рис. Функциональная схема

Если на вход нелинейного сигнатурного анализатора, описанного многочленом  $P(x) = x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1$ , подать логическую 1, а потом производить сдвиги, то получится следующая матрица состояний N:

1	1	2	1	2	0	2	2	0	1	2	2	2	1	1	0	1	0	2	0	0	2	1	0	0	0
0	1	1	2	1	2	0	2	2	0	1	2	2	2	1	1	0	1	0	1	0	0	2	1	0	0
0	0	1	1	2	1	2	0	2	2	0	1	2	2	2	1	1	0	1	0	2	0	0	2	1	0
0	0	0	1	1	2	1	2	0	2	2	0	1	2	2	2	1	1	0	1	0	2	0	0	2	1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26

Полный список полиномов на примере поля Галуа  $GF(3)$  с анализом длин последовательностей можно получить с помощью программы, реализованной по алгоритму:

1. Перебор весовых коэффициентов: для старшего и свободного от 1 до 2, для остальных от 0 до 2.
2. Установка флага окончания генерирования последовательностей.
3. Подача входного сигнала.
4. Проверка существования обратных связей.
5. Вывод на экран последовательности с увеличением содержимого счетчика длины генерируемых последовательностей.
6. Запоминание текущего состояния регистров.
7. Проверка на весовые коэффициенты.
8. Вычисление нового состояния регистров.

Результатом выполнения программы, которая использует алгоритм, являются полиномы с  $\deg P(x) = 4$  с указанием длин последовательностей  $l$ :

$l = 80:$ $x^4 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 1;$	$2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 1;$ $l = 20:$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $l = 18:$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $l = 16:$ $x^4 \oplus_3 x^2 \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 1;$ $l = 13:$ $x^4 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 1;$
$l = 40:$ $x^4 \oplus_3 x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 1;$	$l = 12:$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^2 \oplus_3 1;$ $l = 10:$ $2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $l = 9:$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $l = 8:$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 1;$
$l = 26:$ $x^4 \oplus_3 x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 1;$	$l = 6:$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $x^4 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 1;$ $l = 5:$ $x^4 \oplus_3 x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $l = 4:$ $x^4 \oplus_3 1.$
$l = 24:$ $x^4 \oplus_3 2x^3 \oplus_3 x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 x^2 \oplus_3 2x \oplus_3 1;$ $2x^4 \oplus_3 2x^2 \oplus_3 x \oplus_3 1;$	

Полученные полиномы генерируют последовательности с длинами от  $l = 4$  до  $l = 80$ .

**Выводы.** В результате исследований был получен полный список полиномов с  $\deg P(x) = 4$  для конечного поля Галуа  $GF(3)$ . Установлено, что количество полиномов с последовательностью максимальной длины, равной 80, не равно восьми. Выяснено, что значение свободного коэффициента  $a_n$  при  $x^n$  (кроме  $a_n \neq 0$ ) не влияет на длину генерируемой последовательности, а последовательности при  $a_n = 1$  и  $a_n = 2$  повторяют друг друга. Также было установлено, что на сложность технической реализации существенно влияет только количество входов сумматоров по модулю выбранного полинома.

**Список литературы:** 1. *Латыпов Р.Х.* Воспроизведение тестовых наборов и сжатие данных нелинейными регистрами сдвига // Автоматика и телемеханика. – М.: Наука. – 1989. – № 10. – С. 167 – 172. 2. *Барашко А.С.* Характеристическая функция нелинейного сигнатурного анализатора // Электронное моделирование. – 2000. – Т. 22. – № 6. – С. 59 – 65. 3. *Барашко А.С.* Об одной гипотезе, касающейся нелинейных аналогов примитивных сигнатурных анализаторов // Электронное моделирование. – 2000. – Т. 22. – № 6. – С. 84 – 89. 4. *Рысованый А.Н., Гоготов В.В.* Выбор полиномов для нелинейных регистров сдвига с обратными связями по критерию формирования последовательности максимальной длины // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління, 2007. – Вип.1.– С. 77 – 79. 5. *Питерсон У.* Коды, исправляющие ошибки. – М.: Мир, 1976. – 594 с. 6. *Науменко М.І., Стасев Ю.В., Кузнцов О.О.* Теоретичні основи та методи побудови алгебраїчних блокових кодів. – Х.: ХУПС, 2005. – 267 с. 7. Основы теорії синтезу сигнатурних аналізаторів. Навчальний посібник / За ред. *О.М. Рисованого.* – Харків: ХВУ, 1998. – 122 с. 8. *Тупкало В.Н.* Основы теории сигнатурного контроля цифровых систем. – К.: МО Украины, 2004. – 324 с. 9. *Блейхут Р.* Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. – М.: Мир, 1986. – 576 с. 10. *Муттер В.М.* Основы помехоустойчивой телепередачи информации. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с. 11. *Ярмолик В.Н.* Контроль и диагностика цифровых узлов ЭВМ. – Мн.: Наука и техника, 1988. – 240 с.

*Поступила в редакцию 11.04.2007*

*А.И. ТОРЯНИК*, доктор хим. наук, ХГАТП,  
*А.Г. ДЬЯКОВ*, канд. техн. наук, ХГАТП,  
*А.Ф. ДАНИЛЕНКО*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*А.А. ФИОФИЛОВА* (г. Харьков)

## **ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОДИФФУЗИИ СПЕКТРОМЕТРОМ ЯМР**

Запропоновано і обгрунтовано підхід для автоматизованого визначення коефіцієнта самодифузії методом спінової луни. Основна увага зроблена на застосування комп'ютерних технологій при виконанні досліджень шляхом спрощення методики вимірювань. Показано, що запропонований метод дозволяє обійти складні обчислення визначення коефіцієнта самодифузії та зменшити вимоги до технічних параметрів вимірювальної системи установки ЯМР.

The automated determination of coefficient of self-diffusion by the method of spinecho is offered and grounded. Basic attention is spared to application of computer technologies at to conducting of researches by simplification of measuring method. It is shown, that the offered method allows going round the difficult calculations of determination of coefficient of self-diffusion and lowering the requirements to the technical parameters of the measuring system of the NMR setting.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** Метод ядерного магнитного резонанса (ЯМР) является одним из современных методов исследования свойств веществ. Учитывая сложность проведения данных исследований, в настоящее время ведутся интенсивные работы по их автоматизации на основе использования компьютерных технологий [1]. Однако непосредственное их применение без учета особенностей проведения измерений вызывает значительные сложности. Примером таких измерений является определение коэффициента самодиффузии, который позволяет оценить молекулярную подвижность в исследуемых веществах.

В соответствии с теоретическими положениями, приведенными в [2], для измерения коэффициента самодиффузии исследуемый образец помещают в радиочастотную катушку, которая находится в постоянном магнитном поле. Сигнал спинового эха появляется после воздействия на образец двух радиочастотных импульсов, следующих друг за другом через интервал времени  $\tau$ , частота заполнения, которых  $\omega$  соответствует резонансной частоте ядер исследуемого вещества в образце и определяется из соотношения:

$$\omega = \gamma H_0, \quad (1)$$

где  $\gamma$  – гиромагнитное отношение ядер спиновой системы исследуемого образца (в данном спектрометре производятся исследования на ядрах водорода);  $H_0$  – напряженность внешнего магнитного поля в образце.

Длительность радиочастотных импульсов, подаваемых на катушку с помещенным в нее образцом, определяется известными соотношениями [2, 3].

Амплитуда эхо-сигнала, возникающего в приемной катушке после импульсного воздействия магнитного поля, через время  $2\tau$ , определяется функциональной зависимостью:

$$A(\tau) = A_0 \exp\left(\frac{-2\tau}{T_2} - \frac{2}{3}\gamma^2 G^2 D\tau^3\right), \quad (2)$$

где  $\tau$  – время между первым и вторым радиочастотным импульсом;  $T_2$  – время спин-спиновой релаксации;  $D$  – искомый коэффициент самодиффузии;  $G$  – градиент магнитного поля.

После логарифмирования и преобразования выражение (2) можно представить в виде:

$$y(\tau) = y_0 + k_1\tau + k_2\tau^3, \quad (3)$$

где  $y(\tau) = \ln A(\tau)$  – амплитуда эхо-сигнала;  $y_0 = \ln A_0$  – постоянный для данного образца коэффициент;  $k_1 = 2/T_2$  – коэффициент, определяющий значение  $T_2$ ;  $k_2$  – коэффициент, определяющий значение коэффициента самодиффузии  $D$ .

Выражение (3) линейно относительно неизвестных коэффициентов  $y_0$ ,  $k_1$  и  $k_2$ , которые легко можно определить после проведения серии испытаний с различными значениями  $\tau$  регрессионными методами [4].

Принимая во внимание традиционный подход определения коэффициента самодиффузии [5], оценим возможность его реализации с применением компьютерных технологий.

На каждом отдельном образце проводится измерение эхо-сигнала  $A_1$  и  $A_2$  при определенном значении  $\tau$  между первым и вторым импульсом и при различных значениях градиента постоянного магнитного поля  $G_1$  и  $G_2$ . Взяв отношение  $A_1$  к  $A_2$  можно получить значение для  $D$  в виде:

$$D = \frac{3}{2\gamma^2\tau^3} \cdot \frac{\ln(A_1 / A_2)}{(G_2^2 - G_1^2)}. \quad (4)$$

Таким образом, коэффициент самодиффузии можно определить путем измерения времени  $\tau$  между первым и вторым радиоимпульсами, градиентов магнитного поля  $G_1$  и  $G_2$  и амплитуд сигналов спинового эха  $A_1$  и  $A_2$ . Наиболее сложной задачей для данной методики проведения исследования является определение градиентов магнитного поля. Градиент поля создается двумя катушками Гельмгольца, которые включены встречно. Сложность его определения состоит в том, что помимо градиента, создаваемого катушками, необходимо учесть и естественный градиент в зазоре постоянного магнита. Существующие методики таких измерений требуют применения дополнительной аппаратуры, эталонных образцов, изготовленных с высокой точностью, и высокой квалификации исследователя.

**Целью работы** является рассмотрение вопросов разработки автоматизированной измерительной системы определения относительных коэффициентов самодиффузии для исследуемых образцов без предварительной градуировки градиента постоянного магнитного поля.

**Решение проблемы.** Предпосылкой разработки данного метода является то, что в подавляющем большинстве случаев (например, при исследовании технологических параметров пищевых продуктов) необходимо знать не абсолютное значение коэффициента самодиффузии, а соотношение этих коэффициентов между некоторым эталоном и исследуемым образцом. Таким образом, можно определить тенденцию изменения качественных показателей образца в зависимости от его структуры.

Вопросы автоматизации процесса определения параметров вещества с применением спектрометра ЯМР достаточно полно рассмотрены в [6 – 7]. При этом предполагалось, что время  $\tau$ , используемое при проведении исследований, мало и коэффициент  $k_2$  можно не учитывать в расчетах.

Вопрос о применении подобного подхода для оценки значения  $D$  может быть решен только после дополнительного анализа влияния погрешностей измерения амплитуды на коэффициент самодиффузии, обусловленных воздействием внешних помех, что требует дальнейших изысканий. Подробный анализ этого в рамках данной работы не проводился. Запишем выражения для коэффициента самодиффузии известного образца  $D_E$  и исследуемого  $D_X$ :

$$D_E = \frac{3}{2\gamma^2 \tau^3} \cdot \frac{\ln(A_{1E} / A_{2E})}{(G_2^2 - G_1^2)}; \quad (5)$$

$$D_X = \frac{3}{2\gamma^2 \tau^3} \cdot \frac{\ln(A_{1X} / A_{2X})}{(G_2^2 - G_1^2)}. \quad (6)$$

Взяв отношение величин (5) и (6) получим:

$$\frac{D_X}{D_E} = \frac{\ln(A_{1X} / A_{2X})}{\ln(A_{1E} / A_{2E})}. \quad (7)$$

Следовательно, величина

$$K = \frac{\ln(A_{1X} / A_{2X})}{\ln(A_{1E} / A_{2E})} \quad (8)$$

определяет относительное изменение коэффициента самодиффузии по отношению к эталону. Для автоматизации проведения измерений аппаратная часть измерительной системы ЯМР должна быть дополнена генератором стабильного тока для создания необходимого постоянного значения градиента. В данной системе генератор тока подключен к источнику питания и

управляется от сигналов, получаемых от ПК, благодаря параллельному порту последнего. Преобразование кода в необходимое значение тока для задания величины градиента осуществляется ЦАП непосредственно в самом генераторе тока.

Предлагаемый подход требует определенной переработки и дополнения измерительной системы ЯМР, предложенной в [8]. В этом случае и программное обеспечение дополнено модулями, позволяющими производить вычисления по приведенным выше математическим соотношениям. Обобщенная структурная схема разработанной измерительной системы приведена на рис. 1.

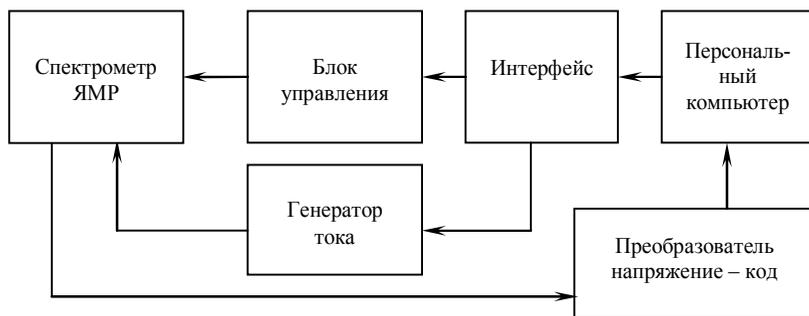


Рис. 1. Структурная схема измерительной системы ЯМР

Особенностью проводимых измерений является то, что при изменении градиента происходит изменение формы импульса (пример изменения приведен на рис. 2).

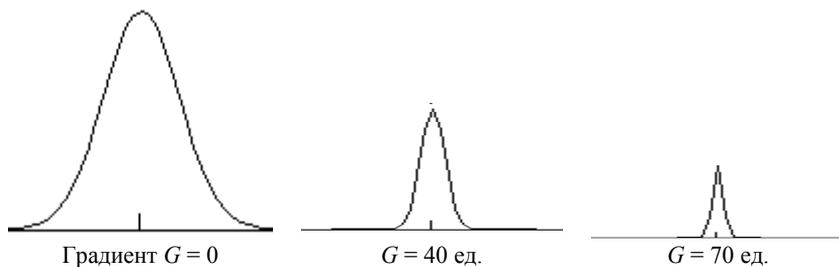


Рис. 2. Импульсы эхо-сигнала при различных значениях градиента

Из приведенных на рис. 2 графиков можно сделать вывод, что сигнал с нулевым градиентом поля, очевидно, имеет более узкий спектр, чем сигналы, фиксируемые при наличии градиента. Эта особенность приводит к необходимости проведения дополнительного анализа частотных свойств измерительного канала с целью исключения ограничения спектра

исследуемых импульсов, что могло бы привести к ошибкам определения амплитуд измеряемых сигналов. Для устранения возможных возникающих погрешностей предлагается следующий подход: при возможности выбора АЦП желательно использовать такой, который имеет максимально высокое быстродействие, возможно даже за счет уменьшения дискретности преобразования. Опытная эксплуатация измерительной системы, с учетом указанных рекомендаций, показала ее работоспособность и проверена при исследовании растворов сахарозы на установке ЯМР

**Выводы.** Обоснован и предложен подход для определения коэффициента самодиффузии веществ, реализуемый на спектрометре ЯМР. Показано, что при определенных допущениях можно исключить необходимость точного измерения градиента магнитного поля в зоне исследуемого образца и ограничиться измерением относительного коэффициента самодиффузии. Установлено, что в этом случае погрешность определения коэффициента самодиффузии определяется только погрешностью измерения амплитуды эхосигнала, которая, в свою очередь, может зависеть от спектра пропускания измерительного канала.

Предложенный подход не снижает ценности получаемых результатов и существенно упрощает процесс измерения коэффициента самодиффузии вещества. В целом подобная методика сокращает время измерений и повышает эффективность проведения исследований.

**Список литературы:** 1. Байбалов С.П., Гаун Д.Д. Управление установкой импульсного спектрометра ЯМР // Электронный журнал "ИССЛЕДОВАНО В РОССИИ", <http://zhurnal.ape.relam.ru/articles/2001/068.pdf>. 2. Фаррар Т., Беккер Э. Импульсная и Фурье-спектроскопия ЯМР. – М.: Мир, 1973. – 164. 3. Вацман А.А., Пронин И.С. Ядерная магнитная релаксация и её применение в химической физике. – М.: Наука, 1979. – 223. 4. Методы исследований и организация экспериментов / Под ред. проф. К.П. Власова – Х.: Изд-во "Гуманитарный Центр", 2002. – 256 с. 5. Торяник А.И. Методы измерения коэффициентов диффузии // Экспериментальные методы химии растворов. Денсиметрия, вискозиметрия, кондуктометрия и другие методы. – М.: Наука, 1997. – С. 308 – 343. 6. Дьяков А.Г., Даниленко А.Ф. Информационно-измерительная система установки ЯМР // Вестник НТУ "ХПИ". – Х.: НТУ "ХПИ", 2003. – № 19. – С. 69 – 72. 7. Дьяков А.Г., Даниленко А.Ф. Система управления спектрометром ЯМР // Вестник НТУ "ХПИ". – Х.: НТУ "ХПИ", 2004. – № 26. – С. 119 – 123. 8. Дьяков А.Г., Даниленко А.Ф. Повышение точности измерений в ЯМР спектрометре // Вестник НТУ "ХПИ". – Х.: НТУ "ХПИ", 2005. – № 46. – С. 83 – 86.

*Поступила в редакцию 28.03.2007*

**В.М. УДОВИЧЕНКО**, канд. техн. наук, НТУ "ХПІ", (м. Харків)

## **ОПЕРАТОРИ ФУР'Є ТА ХАРТЛІ, ПОБУДОВАНІ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ФАЙЛОНА ТА КУБІЧНИХ В-СПЛАЙНІВ, ТОЧНІ НА ТРИГОНОМЕТРИЧНИХ ПОЛІНОМАХ ЗАДАНОГО СТЕПЕНЯ**

Побудовано оператори Фур'є та Хартлі на основі методу Файлона (Filon) обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів. Дані оператори є точними на тригонометричних поліномах заданого степеня. Приведені співвідношення між розглянутими операторами, графік їх дискретних нормованих амплітудно-частотних характеристик, теореми та приклад.

In this article operators Fourier and Hartley are considered. These operators are constructed on the basis of Filon's method calculations of integrals from trigonometric functions and cubic B-splines. These operators possess property - they are exact on trigonometrical polynoms of the set degree. The theorems and an example are given.

**Проблема**, яку ми розв'язуємо в даній роботі, полягає в побудові інструментарію інформаційних технологій в базисах Фур'є та Хартлі – операторів дискретно-неперервних та дискретних перетворень Фур'є (ДПФ), а також дискретно-неперервних та дискретних перетворень Хартлі (ДПХ) на основі методу Файлона та кубічних В-сплайнів, які б мали кращі характеристики точності, ніж "класичні" ДПФ та ДПХ. Тому проблема є актуальною.

**В літературі**, присвяченій дискретному перетворенню Фур'є та Хартлі, основними напрямками досліджень є різноманітні варіанти реалізації швидких алгоритмів ДПФ та ДПХ [1 – 3], порівняння швидких алгоритмів ДПФ та ДПХ [4], створення багатовимірних варіантів ДПФ та ДПХ [5]. В прикладних задачах, орієнтованих на інформаційні технології, ДПФ [2, с. 58] використовують у вигляді:

$$X[k] = T \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \exp(-j2\pi k n / N), \quad k = \overline{0, (N-1)}, \quad j = \sqrt{-1};$$

$$x[n] = (NT)^{-1} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \exp(j2\pi k n / N), \quad n = \overline{0, (N-1)},$$

а ДПХ [3, с. 34] – у вигляді:

$$H[v] = N^{-1} \sum_{\tau=0}^{N-1} f[\tau] \operatorname{cas}(2\pi v \tau / N), \quad v = \overline{0, (N-1)};$$

$$f[\tau] = N^{-1} \sum_{v=0}^{N-1} H[v] \operatorname{cas}(2\pi v \tau / N), \quad \tau = \overline{0, (N-1)},$$

де  $\text{cas}(\alpha) = \cos(\alpha) + \sin(\alpha) = \sqrt{2} \cos(\alpha - \pi/4)$ , [3].

Безпосереднє використання "класичних" ДПФ та ДПХ, з точки зору характеристик точності, не є ефективне. В роботах [6, 7] запропоновано оператори дискретно-неперервних та дискретних перетворень Фур'є [6] та Хартлі [7] (скорочено  $F \& H$ ), які побудовані на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів, або скорочено  $b_{Mp, N}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  та  $L_{Mp, N}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$ , де  $F/H$  – Фур'є або Хартлі.

**Метою роботи** є побудова операторів  $F \& H$ , на основі методу Файлона та кубічних В-сплайнів, точних на тригонометричних поліномах заданого степеня, або скорочено  $g_{Mp, N}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  та  $U_{Mp, N}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$ , де  $g_{Mp, N}^{F, 1d, Sp^3}(f)$  та  $U_{Mp, N}^{F, 1d, Sp^3}(f)$  – відповідно прямі та обернені оператори Фур'є,  $g_{Mp, N}^{F, 1d, Sp^3}(f)$  та  $U_{Mp, N}^{F, 1d, Sp^3}(f)$  – відповідно прямі та обернені оператори Хартлі, які мають специфічні характеристики точності в порівнянні з [6, 7].

**Побудова** операторів  $F \& H$  на основі методу Файлона та кубічних В-сплайнів, точних на тригонометричних поліномах заданого степеня. Під фінітними перетвореннями  $F \& H$  ми розуміємо перетворення  $F \& H$  від фінітної, дійсної або комплексної функції дійсного аргумента. Не зменшуючи загальності ми вважаємо, що носій функції  $f(x)$ ,  $\text{supp } f(x) = D$ ,  $D = [-\pi, \pi]$ . Хай  $f(x) \in C^r(D) \cap L_p(D)$ ,  $r = 1, 2, 3, \dots$ ;  $p = 1, 2$  задовольняє вимогам теореми Найквіста [8]. (Умова 1). Областю визначення дискретизованої функції  $f(x_i)$  є множина елементів  $\{i \Delta\}$ ,  $i = \overline{-Mp, Mp}$ ,  $Mp = M + 1$ , яка при  $\Delta = 2\pi / (2Mp + 1)$ , знаходиться на інтервалі  $x \in [-\pi + \Delta/2, \pi - \Delta/2]$  з кроком  $\Delta$ . (Умова 2). Для подальшого застосування умови 1 і 2 позначимо як умову "V".

**Теорема 1.** Оператори дискретно-неперервних перетворень  $F \& H$ , побудовані на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів, які задовольняють умову "V":

$$U_{Mp, N}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(v) = \sum_{k=-N}^N g_{Mp, N, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f) \left[ \frac{\exp(jkv)}{\sqrt{2} \cos(kv - \pi/4)} \right], \quad (1)$$

$$v \in \mathfrak{R}, N = Mp,$$

де

$$g_{Mp, Mp, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f) = \begin{cases} D(k, M, \Delta) \sum_{p=-Mp}^{Mp} z_p(f) \left[ \begin{array}{l} \exp(-j k p \Delta) \\ \sqrt{2} \cos(k p \Delta - \pi/4) \end{array} \right], k \neq 0; \\ \sum_{p=-Mp}^{Mp} f(x_p), k = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{де } D(k, M, \Delta) = \frac{3}{(2Mp+1)[4 - \cos(k \Delta)]}, k = \overline{-Mp, Mp}, \Delta = \frac{2\pi}{2Mp+1};$$

$$z_p(f) = 4f(x_p)/3 - [f(x_{p-1}) + f(x_{p+1})]/6, x_p = p \Delta;$$

$$x_p \in [-\pi + \Delta/2, \pi - \Delta/2], Mp = M+1,$$

отримані як результат обчислення функціоналу [9]:

$$g_{Mp, N, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f) = \frac{\sum_{p=-Mp}^{Mp} z_p(f) \int_{(p-2)\Delta}^{(p+2)\Delta} h3(x, p, \Delta) \left[ \begin{array}{l} \exp(-j k x) \\ \text{cas}(k x) \end{array} \right] dx}{\sum_{p=-Mp}^{Mp} \left[ \begin{array}{l} \exp(j k x_p) \\ \text{cas}(k x_p) \end{array} \right] \int_{(p-2)\Delta}^{(p+2)\Delta} h3(x, p, \Delta) \left[ \begin{array}{l} \exp(-j k x) \\ \text{cas}(k x) \end{array} \right] dx}, N \leq Mp,$$

$$\text{де } h3(x, p, \Delta) = \frac{1}{6} \begin{cases} 0, x \leq x_{p-2}; \\ t^3, x_{p-2} < x \leq x_{p-1}, t = (x - x_{p-2})/\Delta; \\ 1 + 3t + 3t^2(1-t), x_{p-1} < x \leq x_p, t = (x - x_{p-1})/\Delta; \\ 1 + 3(1-t) + 3t(1-t)^2, x_p < x \leq x_{p+1}, t = (x - x_p)/\Delta; \\ (1-t)^3, x_{p+1} < x \leq x_{p+2}, t = (x - x_{p+1})/\Delta; \\ 0, x > x_{p+2}, p = -Mp, -M, \dots, -1, 0, 1, \dots, M, Mp; \end{cases}$$

$$x_p = p \Delta,$$

мають властивості:

$$1: U_{Mp, Mp}^{F, 1d, Sp^3} f(x) = U_{Mp, Mp}^{H, 1d, Sp^3} f(x). \quad (3)$$

Якщо  $f(x) \in T_N$ , де  $T_N$  є множина тригонометричних поліномів степеня  $N$ , при  $N = Mp$ :

$$2: U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x) = f(x). \quad (4)$$

Тобто оператори  $U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x)$  є точними на тригонометричних поліномах степеня  $N$ . Доведення виконується безпосереднім обчисленням.

При обчисленні (2) значення функції  $f(x_p)$ , які виходять за межі інтервалу  $[-\pi, \pi]$  приймаємо:  $f[x_{(M+2)}] = f(x_{-Mp})$  та  $f[x_{-(M+2)}] = f(x_{Mp})$ . При цьому ми користуємося властивістю періодичності частотних характеристик перетворень  $F \& H$ .

Оператори дискретних перетворень  $F \& H$ , побудовані на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів, точні на тригонометричних поліномах заданого степеня, отримуюмо з (1), замінюючи  $v \in \mathfrak{R}$  на  $x_p = p\Delta$ ,  $p = \overline{-Mp, Mp}$ :

$$U_{Mp, N}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x_p) = \sum_{k=-N}^N g_{Mp, N, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f) \left[ \begin{array}{c} \exp(jk p \Delta) \\ \sqrt{2} \cos(k p \Delta - \pi / 4) \end{array} \right], \quad (5)$$

$$N \leq Mp, \quad p = \overline{-Mp, Mp}.$$

$g_{Mp, N, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  визначаються (2).

**Теорема 2.** Оператори дискретних перетворень  $F \& H$ , побудовані на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів, точні на тригонометричних поліномах заданого степеня, на інтервалі  $x_p \in [-\pi + \Delta / 2, \pi - \Delta / 2]$  мають властивості:

$$U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x_p) = f(x_p), \quad p = \overline{-Mp, Mp}, \quad (6)$$

для функцій  $f(x)$ , які задовольняють умову "V". Доведення виконується безпосереднім обчисленням.

Для наступного застосування скористаємося властивістю  $cas(\alpha)$ :

$$cas(-\alpha) = \cos(\alpha) - \sin(\alpha) = \sqrt{2} \cos(\alpha + \pi / 4). \quad (7)$$

З урахуванням (7) маємо наступні теореми:

**Теорема 3.**

$$\exp(\pm jx) = \left( \frac{1 \pm j}{2} \right) cas(x) + \left( \frac{1 \mp j}{2} \right) cas(-x), \quad x = \sum_{s=1}^n z_s, \quad z_s \in \mathfrak{R}. \quad (8)$$

Доведення виконується із застосуванням формули Ейлера. 3 (8) отримуюмо:

**Теорема 4.**

$$cas(\pm x) = \left( \frac{1 \mp j}{2} \right) \exp(jx) + \left( \frac{1 \pm j}{2} \right) \exp(-jx), \quad x = \sum_{s=1}^n z_s, \quad z_s \in \mathfrak{R}. \quad (9)$$

Теорема 3 та теорема 4 визначають зв'язок між ядрами одновимірних ( $n=1$ ) та  $n$ -вимірних перетворень  $F$  &  $H$ .

**Теорема 5.** Для операторів дискретно-неперервних та дискретних перетворень  $F$  &  $H$ , побудованих на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів [6, 7], на інтервалі  $x \in [-\pi + \Delta/2, \pi - \Delta/2]$  виконується наступне:

$$\begin{aligned} b_{Mp, Mp, -k}^{F, 1d, Sp^3}(f) &= \left(\frac{1-j}{2}\right) b_{Mp, Mp, -k}^{H, 1d, Sp^3}(f) + \left(\frac{1+j}{2}\right) b_{Mp, Mp, +k}^{H, 1d, Sp^3}(f), \\ b_{Mp, Mp, +k}^{F, 1d, Sp^3}(f) &= \left(\frac{1+j}{2}\right) b_{Mp, Mp, -k}^{H, 1d, Sp^3}(f) + \left(\frac{1-j}{2}\right) b_{Mp, Mp, +k}^{H, 1d, Sp^3}(f), \end{aligned} \quad (10)$$

$$k = \overline{1, Mp},$$

для функцій  $f(x)$ , які задовольняють умову "i". Доведення отримуємо при застосуванні до  $b_{Mp, Mp, \pm k}^{F, 1d, Sp^3}(f)$  теореми 3.

**Теорема 6.** Для операторів дискретно-неперервних та дискретних перетворень  $F$  &  $H$ , побудованих на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів [6, 7], на інтервалі  $x \in [-\pi + \Delta/2, \pi - \Delta/2]$  виконується наступне:

$$\begin{aligned} b_{Mp, Mp, -k}^{H, 1d, Sp^3}(f) &= \left(\frac{1+j}{2}\right) b_{Mp, Mp, -k}^{F, 1d, Sp^3}(f) + \left(\frac{1-j}{2}\right) b_{Mp, Mp, +k}^{F, 1d, Sp^3}(f), \\ b_{Mp, Mp, +k}^{H, 1d, Sp^3}(f) &= \left(\frac{1-j}{2}\right) b_{Mp, Mp, -k}^{F, 1d, Sp^3}(f) + \left(\frac{1+j}{2}\right) b_{Mp, Mp, +k}^{F, 1d, Sp^3}(f), \end{aligned} \quad (11)$$

$$k = \overline{1, Mp},$$

для функцій  $f(x)$ , які задовольняють умову "V". Доведення отримуємо при застосуванні до  $b_{Mp, Mp, \pm k}^{H, 1d, Sp^3}(f)$  теореми 4.

**Теорема 7.** Для операторів дискретно-неперервних та дискретних перетворень  $F$  &  $H$ , побудованих на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів, точних (операторів) на тригонометричних поліномах заданого степеня, на інтервалі  $x \in [-\pi + \Delta/2, \pi - \Delta/2]$  виконується наступне:

$$\begin{aligned} g_{Mp, Mp, -k}^{F, 1d, Sp^3}(f) &= \left(\frac{1-j}{2}\right) g_{Mp, Mp, -k}^{H, 1d, Sp^3}(f) + \left(\frac{1+j}{2}\right) g_{Mp, Mp, +k}^{H, 1d, Sp^3}(f), \\ g_{Mp, Mp, +k}^{F, 1d, Sp^3}(f) &= \left(\frac{1+j}{2}\right) g_{Mp, Mp, -k}^{H, 1d, Sp^3}(f) + \left(\frac{1-j}{2}\right) g_{Mp, Mp, +k}^{H, 1d, Sp^3}(f), \end{aligned} \quad (12)$$

$$k = \overline{1, Mp},$$

для функцій  $f(x)$ , які задовольняють умову "V". Доведення отримуємо при застосуванні до  $g_{M_p, M_p, \pm k}^{F, 1d, Sp^3}(f)$  теореми 3.

**Теорема 8.** Для операторів дискретно-неперервних та дискретних перетворень  $F \& H$ , побудованих на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів, точних (операторів) на тригонометричних поліномах заданого степеня, на інтервалі  $x \in [-\pi + \Delta/2, \pi - \Delta/2]$  виконується наступне:

$$g_{M_p, M_p, -k}^{H, 1d, Sp^3}(f) = \left(\frac{1+j}{2}\right) g_{M_p, M_p, -k}^{F, 1d, Sp^3}(f) + \left(\frac{1-j}{2}\right) g_{M_p, M_p, +k}^{F, 1d, Sp^3}(f),$$

$$g_{M_p, M_p, +k}^{H, 1d, Sp^3}(f) = \left(\frac{1-j}{2}\right) g_{M_p, M_p, -k}^{F, 1d, Sp^3}(f) + \left(\frac{1+j}{2}\right) g_{M_p, M_p, +k}^{F, 1d, Sp^3}(f), \quad (13)$$

$$k = \overline{1, M_p},$$

для функцій  $f(x)$ , які задовольняють умову "V". Доведення отримуємо при застосуванні до  $g_{M_p, M_p, \pm k}^{H, 1d, Sp^3}(f)$  теореми 4.

Користуючись твердженнями теореми 5 та теореми 7, для порівняння властивостей операторів  $g_{M_p, M_p, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  та  $b_{M_p, M_p, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  на рис. приведено графіки односторонніх, дискретних амплітудно-частотних характеристик  $g_{M_p, M_p, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  та  $b_{M_p, M_p, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  [6, 7].

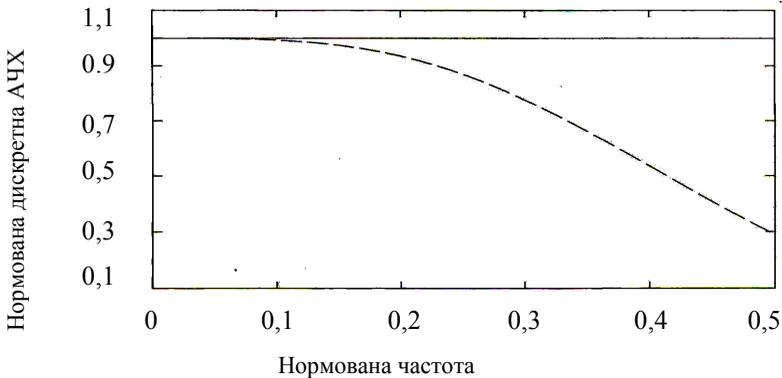


Рис. Оператори  $b_{M_p, M_p, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  -line dash,  $g_{M_p, M_p, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  -line solid.

Дискретні амплітудно-частотні характеристики  $g_{M_p, M_p, k}^{H, 1d, Sp^3}(f)$  та  $b_{M_p, M_p, k}^{H, 1d, Sp^3}(f)$  приведені до базису Фур'є.

В табл. 1 наведені значення  $K\_PosL$  – коефіцієнта послаблення на кінці частотного діапазону односторонніх, дискретних АЧХ для операторів  $b_{M_p, M_p, k}^{F\setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  (в децибелах).

Таблиця 1

$M$	10	30	50	70	90
$K\_PosL$	-9,81	-10,71	-10,92	-11,01	-11,06

**Тестовий приклад.** В табл. 2 наведені результати обчислення оцінки приведених похибок наближення модуля функції  $f(x)=u(x)-Tr[u(x)]$ , де:  $u(x)=x^2 e^{-0,37x} \sin(13x/\sqrt{7}+0,23)+j e^{0,71x} (x-1) \cos(29x/\sqrt{11}-0,47)$ .  $Tr[u(x)]$  є лінійний тренд  $u(x)$  [8].

Таблиця 2

$M$	$R$	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$kCzU$	$kCwU$	$kL2U$
10	55	1,14 E-1	9,14 E-2	7,8 E+13	1,02	1,65
30	155	2,76 E-2	2,69 E-2	2,0 E+13	1,23	2,32
60	305	1,37 E-2	1,32 E-2	3,0 E+12	1,30	2,39

Продовження таблиці 2.

$\beta 1U$	$\beta 2U$	$\beta 1$	$\beta 2$	$kL2L$	$k\_vdL$
1,12 E-1	1,2 E-15	2,22 E-1	1,49 E-1	0,415	2,63
2,25 E-2	1,7 E-15	3,01 E-2	2,24 E-2	1,04	7,21
1,05 E-2	4,2 E-15	1,19 E-2	7,86 E-3	1,46	14,1

В табл. 2 використанні наступні позначення:

$\alpha 1 = \max_{-R \leq r \leq R} |\mu(x_r)| / \Theta$ ;  $\alpha 2 = \max_{-M_p \leq r \leq M_p} |\mu(x_r)| / \Theta$ ;  $\mu(x_r) = f(x_r) - S_{M_p}^{F\setminus H} f(x_r)$ ;  
 $S_{M_p}^{F\setminus H} f(x_r)$  – сума Фур'є (Хартлі) відповідно.  $N$  – порядок тригонометричного полінома (для  $N = M_p$ ,  $R = k M_p$ , де  $k = 5$  – кількість інтервалів інтерполяції на інтервалі  $[x_k, x_{k+1}]$  довжини  $\Delta = 2\pi / (2M + 3)$ );

$$\Theta = \max_{-R \leq r \leq R} |f(x_r)|, \quad \beta 1U = \max_{-R \leq r \leq R} |\lambda(x_r)| / \Theta; \quad \lambda(x_r) = f(x_r) - U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x_r);$$

$$\beta 2U = \max_{-Mp \leq r \leq Mp} |\lambda(x_r)| / \Theta; \quad \beta 1 = \max_{-R \leq r \leq R} |\chi(x_r)| / \Theta; \quad \beta 2 = \max_{-Mp \leq r \leq Mp} |\chi(x_r)| / \Theta;$$

$$\chi(x_r) = f(x_r) - L_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x_r); \quad \Omega 1 = \int_{-Mp \Delta}^{Mp \Delta} [f(x) - S_{Mp}^{F \setminus H} f(x)]^2 dx;$$

$$\Omega 2U = \int_{-Mp \Delta}^{Mp \Delta} [f(x) - U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x)]^2 dx; \quad \Omega 2L = \int_{-Mp \Delta}^{Mp \Delta} [f(x) - L_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x)]^2 dx$$

– оцінки похибки наближення функції  $f(x)$ ,  $x \in [-\pi + \Delta/2, \pi - \Delta/2]$  в нормі  $L_2$  за допомогою суми Фур'є (Хартлі) та операторів  $U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$ ,  $L_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  відповідно.  $U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  – оператори, що визначаються (1).  $L_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  – оператори, що визначаються [6, 7].  $kCwU = \alpha 1 / \beta 1U$ ,  $kCzU = \alpha 2 / \beta 2U$ ,  $kL2U = \Omega 1 / \Omega 2U$ ,  $kL2L = \Omega 1 / \Omega 2L$  – оцінки ефективності наближення функції  $f(x)$  операторами  $U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  та  $L_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  відповідно, в порівнянні з наближенням функції  $f(x)$  за допомогою сум Фур'є (Хартлі) відповідно, на інтервалі  $x \in [-\pi + \Delta/2, \pi - \Delta/2]$  в нормі  $C$  та в нормі  $L_2$ .  $k\_vdL$  – кількість відліків на один період компоненти  $f(x)$  з максимальною частотою.

**Висновки.** 1. Побудовано оператори дискретно-неперервних перетворень  $F \& H$  на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів, точні на тригонометричних поліномах заданого степеня  $U_{Mp, N}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(v)$ ,  $g_{Mp, Mp, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$ . Визначено їх властивості (3), (4), (6). Наведено графіки односторонніх, дискретних АЧХ  $g_{Mp, Mp, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  та  $b_{Mp, Mp, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$  та оцінки коефіцієнта послаблення АЧХ на кінці частотного діапазона для операторів  $b_{Mp, Mp, k}^{F \setminus H, 1d, Sp^3}(f)$ . 2. Побудовано оператори дискретних перетворень  $F \& H$  на основі методу Файлона обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій та кубічних В-сплайнів, точні на тригонометричних поліномах заданого степеня  $U_{Mp, Mp}^{F \setminus H, 1d, Sp^3} f(x_p)$ . 3. Наведено теореми 3, 4, які визначають зв'язок між ядрами одновимірних ( $n=1$ ) та  $n$ -вимірних перетворень  $F \& H$ . 4. Наведени співвідношення (10), (11) між операторами  $b_{Mp, Mp, \pm k}^{F, 1d, Sp^3}(f)$  та  $b_{Mp, Mp, \pm k}^{H, 1d, Sp^3}(f)$ .

5. Наведени співвідношення (12), (13) між операторами  $g_{M_p, M_p, \pm k}^{F, 1d, Sp^3}(f)$  та  $g_{M_p, M_p, \pm k}^{H, 1d, Sp^3}(f)$ . 6. Наведено тестовий приклад, який підтверджує отримані теоретичні твердження. 7. Отримані оператори  $U_{M_p, N}^{F, 1d, Sp^3}f(v)$  та  $U_{M_p, N}^{H, 1d, Sp^3}f(v)$  доповнюють існуючий інструментарій інформаційних технологій в базисах  $F \& H$ . 8. Побудовані оператори  $F \& H$  є подальшим розвитком методу Файлона [10] обчислення інтегралів від швидко осцилюючих функцій.

**Перспективи досліджень** у даному напрямку автор вбачає у застосуванні запропонованих оператори  $F \& H$  при вирішенні деяких задач інформаційних технологій, наприклад, в системах автоматичного управління та регулювання, які застосовують сигнальні методи; у задачах математичного моделювання та комп'ютерної діагностики, у відомих непараметричних та параметричних методах спектрального оцінювання сигналів у цифровій обробці сигналів, у вимірювальній техніці при побудові комп'ютерних вимірювальних засобів, при побудові різноманітних систем кріптографії тощо.

**Список літератури:** 1. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с. 2. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990. – 684 с. 3. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. – М.: Мир, 1990. – 175 с. 4. Болд Э.Дж. Сравнение времени вычисления БПХ и БПФ // ТИИЭР. – 1985. – № 12. – С. 184–185. 5. Маккланн Дж.Х. Многомерный спектральный анализ // ТИИЭР. – 1982 – Т. 70. – № 9. – С. 139–152. 6. Литвин О.М., Удовиченко В.М. Оператори обчислення одновимірного фінітного дискретно-неперервного перетворення Фур'є на основі В-сплайнів третього степеня // Вестник НТУ "ХПИ". Сб. научных трудов. Тематический выпуск "Электроэнергетика и преобразовательная техника". – 2004. – № 4. – С. 59–65. 7. Литвин О.М., Удовиченко В.М. Оператори обчислення одновимірного фінітного дискретно-неперервного перетворення Хартлі на основі В-сплайнів третього степеня // Вестник НТУ "ХПИ". Сб. научных трудов. Тематический выпуск "Информатика и моделирование". – 2003. – № 19. – С. 95–100. 8. Отнес Р., Энксон Л. Прикладной анализ временных рядов. – М.: Мир, 1982. – 428 с. 9. Балакришнан А.В. Прикладной функциональный анализ. – М.: Наука, 1980. – 383 с. 10. Filon L.N.G. On a quadrature formula for trigonometric integrals // Proc. Roy.Soc. Edinburgh. – 1928. – P. 38–47.

Поступила в редакцію 28. 03. 2007

**А.Е. ФИЛАТОВА**, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
**А.Е. ИГНАТЬЕВА**

## **МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ БИОХИМИЧЕСКОГО СКРИНИНГА В ПРЕНАТАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКЕ**

У статті розглядаються методи біохімічного скринінгу в пренатальній діагностиці у другому триместрі вагітності. Описано методи розрахунку та корекції *MoM* (multiple of median), розрахунок вікового ризику та ризику виникнення синдрому Дауна.

The present article reviews methods of biochemical screening in prenatal diagnostics in the II term of pregnancy. Methods of *MoM* (multiple of median) calculation and correction, age risk and risk in Down's syndrome calculation.

**Постановка проблеми.** Мировая тенденция последнего времени показывает постоянное увеличение числа врожденных аномалий развития, связанных как с единичными мутациями, так и с системной хромосомной патологией. Таким образом, актуальным является поиск ранних информативных неинвазивных методов диагностики и прогнозирования данного вида заболеваний и усовершенствование медико-генетических программ для скрининга. Пренатальным скринингом называются исследования, проводимые беременным женщинам с целью выявления групп риска осложнений беременности. Частным случаем пренатального скрининга является скрининг по выявлению групп риска развития врожденных пороков у плода.

Некоторые виды врожденных пороков у плода встречаются довольно часто, например, синдром Дауна (трисомия по 21-й паре хромосом), в одном случае на 600 – 800 новорожденных. Это заболевание, так же как и некоторые другие врожденные заболевания, возникает в момент зачатия или на самых ранних стадиях развития зародыша и с помощью инвазивных методов пренатальной диагностики (биопсии ворсин хориона и амниоцентеза) может быть диагностировано на достаточно ранних сроках беременности. Однако такие методы сопряжены с риском целого ряда осложнений беременности: выкидыша, развития конфликта по резус-фактору и группе крови, инфицирования плода, развития тугоухости у ребенка и т. д. В частности, риск развития выкидыша после таких исследований составляет 1:200. Методы скрининга позволяют с очень большой степенью вероятности выявить группы женщин с риском синдрома Дауна, которым может быть показано проведение биопсии ворсин хориона или амниоцентеза.

**Анализ литературы.** На сегодняшний день основными методами скрининга наличия аномалий развития являются: 1) биохимический скрининг первого триместра – определение ассоциированного с беременностью

плазменного протеина А (РАРР-А) в комплексе с бета-субъединицей хорионического гонадотропина человека (бета-ХГЧ); 2) биохимический скрининг второго триместра: определение уровней бета-ХГЧ, альфа-фетопротеина (АФП) и неконъюгированного (свободного) эстриола (НЭ); 3) динамическая эхография, начиная с первого триместра; 4) комплексная (интегрированная) оценка уровня риска рождения ребенка с хромосомными аномалиями на основании данных анамнеза, УЗИ и показателей биохимического скрининга; 5) инвазивная пренатальная диагностика с проведением медико-генетических исследований [1 – 3].

Риск обнаружения у плода таких патологий как синдром Дауна и Эдвардса можно рассчитать еще в первом триместре. Однако риск дефектов нервной трубки рассчитывается только начиная со второго триместра, так как ключевым показателем для определения этого риска является  $\alpha$ -фетопротеин, который начинают определять только со второго триместра беременности [4].

**Целью данной статьи** является исследование методов биохимического скрининга во втором триместре беременности, а именно, расчет возрастного риска и риска возникновения синдрома Дауна.

**Расчет и коррекция *MoM*.** *MoM* (multiple of median) – коэффициент, показывающий степень отклонения значения одного из маркерных белков (АФП, ХГЧ, НЭ) от среднего значения (медианы) для срока беременности. *MoM* рассчитывается по следующей формуле:

$$MoM_{sm} = \frac{V_{sm}}{Me},$$

где  $V_{sm}$  – значение маркерного белка;  $Me$  – медиана маркерного белка для текущей недели беременности [3, 4].

В чистом виде *MoM* почти никогда не используются в расчете рисков аномалий плода, так как при наличии целого ряда факторов средние значения *MoM* отклоняются от средних в популяции. Поэтому после получения значений *MoM* необходимо сделать поправку на все эти факторы, в результате чего получается так называемое скорригированное значение *MoM*, которое и используется в формулах расчета рисков.

Коррекция *MoM* осуществляется по следующим факторам:

1) вес и курение (для белков АФП, ХГЧ, НЭ):

$$MoM'_{АФП} = \frac{MoM_{АФП}}{e^{a_{АФП} + b_{АФП}W + c_{АФП}n_{cig}}}; \quad (1)$$

$$MoM'_{ХГЧ} = \frac{MoM_{ХГЧ}}{e^{a_{ХГЧ} + b_{ХГЧ}W}}; \quad (2)$$

$$MoM'_{НЭ} = MoM_{НЭ} + a_{НЭ} + b_{НЭ}W, \quad (3)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  – статистические значения, полученные для каждого белка;  $W$  – вес;  $n_{cig}$  – количество сигарет, выкуриваемых за сутки;

2) наличие диабета у пациентки (только для белка АФП)

$$MoM'_{АФП} = \frac{MoM_{АФП}}{0,78};$$

3) многоплодная беременность (для белков АФП, ХГЧ, НЭ)

$$MoM'_{sm} = \frac{MoM_{sm}}{Kt_{sm}}, \quad (4)$$

где  $Kt_{sm}$  – статистическое значение, полученное для каждого белка;

4) расовая принадлежность (для белков АФП, ХГЧ, НЭ)

$$MoM'_{sm} = Kr_{sm} \times MoM_{sm}, \quad (5)$$

где  $Kr_{sm}$  – статистическое значение, полученное для каждого белка.

Значения констант в (1) – (5) для европейских стран приведены в [5, 6].

**Расчет возрастного риска.** Для расчета возрастного риска необходимо найти вероятность возникновения патологии у плода по следующему выражению:

$$p = 0,000627 + e^{-16,2395 + 0,286 \times (Age - 0,5)},$$

где  $Age$  – возраст беременной (полное количество лет).

Возраст беременной может быть задан как на момент взятия анализа, так и на момент предположительных родов.

Если вероятность посчитана на дату взятия анализа, тогда необходима следующая коррекция:

$$p' = p \times (0,2718 \times \log_{10}(g^2) - 1,023 \times \log_{10}(g) + 0,9425),$$

где  $g$  – срок беременности в полных неделях.

Тогда возрастной риск рассчитывается следующим образом:

$$a = \frac{1-p}{p}. \quad (6)$$

Полученное значение  $a$  используется для расчета риска возникновения патологий плода [7].

**Расчет риска возникновения синдрома Дауна.** Задача диагностики в данном случае сводится к тому, чтобы отнести неизвестный объект к одному из классов  $\omega_1$  (здоровые) и  $\omega_2$  (с синдромом Дауна). При этом для маркерных белков АФП и ХГЧ используются не значения  $MoM_{sm}$ , а их логарифмы, то есть  $MoM_{sm}^{lg} = \log_{10} MoM_{sm}$ . Обозначим  $\vec{x} = (x_1, x_2, x_3)^T$ , где  $x_1 = MoM_{АФП}^{lg}$ ,  $x_2 = MoM_{ХГЧ}^{lg}$ ,  $x_3 = MoM_{НЭ}$ ;  $\vec{m} = (m_1, m_2, m_3)^T$ ;  $m_1, m_2$  – средние значения в популяции для  $MoM_{АФП}^{lg}$  и  $MoM_{ХГЧ}^{lg}$  соответственно;  $m_3$  – среднее значение в популяции для  $MoM_{НЭ}$ ;  $\vec{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)^T$ ;  $\sigma_1, \sigma_2$  – стандартные отклонения для  $MoM_{АФП}^{lg}$  и  $MoM_{ХГЧ}^{lg}$  соответственно;  $\sigma_3$  – стандартное отклонение для

$$MoM_{НЭ}; \quad \mu = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \rho_{13}\sigma_1\sigma_3 \\ \rho_{12}\sigma_1\sigma_2 & \sigma_2^2 & \rho_{23}\sigma_2\sigma_3 \\ \rho_{13}\sigma_1\sigma_3 & \rho_{23}\sigma_2\sigma_3 & \sigma_3^2 \end{pmatrix}, \quad \rho_{12}, \rho_{13}, \rho_{23} - \text{коэффициенты}$$

корреляции между АФП и ХГЧ, АФП и НЭ, ХГЧ и НЭ соответственно.

Правдоподобие  $\omega_i$  ( $i = 1, 2$ ) при данном  $\vec{x}$  с учетом закона распределения Гаусса определяется следующим образом:

$$f_i(\vec{x}) = \sqrt{\frac{|\mu_i^{-1}|}{(2\pi)^3 e^{(\vec{x}-\vec{m}_i)^T \mu_i^{-1} (\vec{x}-\vec{m}_i)}}},$$

где  $\mu_i$  – ковариационная матрица, для класса  $\omega_i$ ;  $\vec{m}_i$  – вектор средних значений в популяции для  $\omega_i$ .

Тогда отношение правдоподобия находится следующим образом:

$$L(\vec{x}) = \frac{f_1(\vec{x})}{f_2(\vec{x})}.$$

Таким образом, риск возникновения синдрома Дауна рассчитывается по следующему выражению:

$$R = a \times L(\vec{x}),$$

где  $a$  – возрастной риск, рассчитанный по (6).

При этом риск считается значимым, если  $R < 200$ . В этом случае необходимо проводить дополнительные исследования для выявления патологий развития плода, в том числе и инвазивными методами [8].

**Выводы.** В данной работе рассмотрены методы биохимического скрининга в пренатальной диагностике. Описаны методы расчета и коррекции *MoM*, расчета возрастного риска и риска возникновения синдрома Дауна во втором триместре беременности.

**Список литературы:** 1. *Graves J., Miller K., Sellers A.* Maternal serum triple analite screening in pregnancy // *Am Fan Phisican.* – 2002. – № 65. – P. 15 – 20. 2. *Wald N., Cucle H., Densem J.* Maternal serum screening for Down's syndrome: the effect of routine ultrasound scan determination of gestational age and adjustment for maternal weight // *BJOG.* – 1992. – № 99. – P. 9 – 44. 3. *Wenstrom K., Owen J., Boots L.* The influence of maternal weight on human chorionic gonadotropin in the multiple-marker screening test for Down's syndrome // *Am JObstet Gynecol.* – 1995. – № 173. – P. 297 – 300. 4. *Neveux L.M., Palomaki G.E., Larrivee D.A.* Refinements in managing weight adjustment fir interpreting prenatal screening results // *Prenatal Diagn.* – 1996. – № 16. – P. 115 – 119. 5. *Vranken G., Reynolds T., Van Nueten G.* Medians for second-trimester maternal serum markers: geographical differences and variation causes by median multiples-of-median equations // *J. Clin Pathol.* – 2006. – № 6. – P. 639 – 644. 6. *Reynolds T.M., Penney M.D., Boots L.* The mathematical basis of multivariate risk analysis: with special reference to screening for Down's syndrome associated pregnancy // *Am Clin Biochem.* – 1990. – № 27. – P. 8 – 52. 7. *Wald N.J., Kennard A., Hackshow A.* Antenatal screening for Down's syndrome // *Health Technol Assess.* – 1998. – № 2. – P. 1 – 112. 8. *Cuckle H.* Improved parameters for risk estimation in Down's syndrome screening // *Prenatal Diagn.* – 1995. – № 15. – P. 57 – 65.

Поступила в редакцию 12.04.2007

*Н.А. ЧИКИНА*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",  
*И.В. АНТОНОВА*, НТУ "ХПИ"

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНУТРЕННИХ ФАКТОРОВ РИСКА НА РАЗВИТИЕ АЛЛЕРГОДЕРМАТОЗОВ У РАБОЧИХ ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Стаття присвячена вивченню впливу внутрішніх чинників ризику на розвиток алергодерматозів у робітників в умовах хіміко-фармацевтичного виробництва. На основі аналізу даних, одержаних в результаті обстеження робітників і співробітників підприємства, виявлялися чинники ризику і робилися висновки про їх роль в розвитку алергічного захворювання.

The article is devoted to the study of influencing of internal factors of risk on development of allergical dermatoses at workings in the conditions of chemical and pharmaceutical enterprise. On the basis of data got as a result of inspection of workings and employees of enterprise analysis, risk factors came to light and was drawn conclusions about their role in development of allergic disease.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** В настоящее время в условиях стремительного развития химико-фармацевтического производства и практически ежедневного появления новых лекарственных препаратов особенно остро встает вопрос о профессиональных заболеваниях работников, имеющих постоянный контакт с лекарственными препаратами растительного и химического происхождения, используемыми в химико-фармацевтическом производстве [1].

В соответствии с современными представлениями о факторах риска возникновения и развития различных заболеваний всё многообразие факторов, влияющих на здоровье, можно разделить на две основные группы [2]: внутренние (биологические) и внешние (природные и социальные).

К первой группе относятся пол, возраст, конституциональные особенности, наследственность, тип высшей нервной деятельности. Вторая группа факторов, касающихся окружающей среды обитания и образа жизни, более обширна и включает природные (географические, метеорологические, климатические, экологические и др.) и социальные (производственно-трудоустроенные, общественно-политические, социально-культурные, связанные с бытом и медицинской активностью) факторы.

Прогнозирование риска возникновения заболевания и разработка рекомендаций по его первичной профилактике имеет большое значение для службы здравоохранения, где приоритетность профилактической медицины должна в ближайшее время стать безусловной, так как она при значительно более высокой эффективности требует меньших экономических затрат, чем вторичная профилактика [3]. Первичная профилактика является тем инструментом, который позволяет сохранить здоровье населения страны на основе таких направлений своей деятельности, как профилактика причин,

факторов риска, формирование условий и факторов здорового образа жизни, здорового быта, развития личности [4].

**Целью настоящей работы** является изучение влияния внутренних факторов риска на развитие аллергодерматозов у рабочих предприятий химико-фармацевтической отрасли.

**Математические и программные модели и методы.** Изучение влияния внутренних факторов риска проводилось по данным, полученным в результате профилактических обследований рабочих и служащих химико-фармацевтических предприятий г. Харькова. В качестве объекта исследования были выбраны рабочие и служащие фармацевтической фирмы "Здоровье", фармацевтического предприятия "Эндокринное производство".

Как показали исследования [3], у рабочих и служащих химико-фармацевтической отрасли впервые аллергические заболевания (АЗ) проявляются в течение первых двух лет работы на предприятии. Далее возможны рецидивы данного заболевания, что в последствии может привести к профессионально обусловленным аллергодерматозам.

Традиционно в аллергологии задача ранней диагностики заболевания связана с анализом факторов риска [5], количество которых за последние годы резко возросло. Наличие факторов риска и факторов предрасположенности к различным аллергическим заболеваниям, оценка уровня адаптационно-компенсаторных возможностей организма дает возможность с определенной степенью уверенности индивидуально прогнозировать возможность развития профессионально обусловленных аллергодерматозов.

Пусть для описания множества  $\Omega$ , состоящего из  $m$  объектов  $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_m\}$ , используется  $n$  признаков (предполагаемых факторов риска):  $\{X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_n\}$ . Каждому объекту  $A_i$  ( $i = \overline{1, m}$ ) соответствует некоторое значение целевого признака  $X_0$ . Признаки  $X_j$  ( $j = \overline{1, n}$ ) измерены в порядковой или номинальной шкале. Целевой признак  $X_0$  имеет  $k_0$  градаций, т.е. принимает  $k_0$  различных значений:  $X_0^{(1)}, X_0^{(2)}, \dots, X_0^{(l_0)}, \dots, X_0^{(k_0)}$ . Тогда для решения поставленной задачи множество объектов  $\Omega$  необходимо разбить на  $k_0$  подмножеств  $\Omega_p$  ( $p = \overline{1, k_0}$ ), таких, что  $\Omega_p \cap \Omega_q = \emptyset$ ,  $\bigcup_p \Omega_p = \Omega$ . Далее в каждом из подмножеств  $\Omega_p$  ( $p = \overline{1, k_0}$ ) определить частоты появления  $n_j^{(p)}$  ( $p = \overline{1, k_0}$ ) контролируемых признаков  $X_j$  ( $j = \overline{1, n}$ ) или их градаций  $X_j^{(l)}$  ( $l = \overline{1, k_j}$ ). Дальнейшее сравнение частот будет проводиться с помощью соответствующих таблиц сопряженности.

В настоящем исследовании все обследованные были разделены на 2 ( $k_0 = 2$ ) группы:  $\Omega_1$  – больные аллергодерматозами (или имеющие АЗ в анамнезе);  $\Omega_2$  – практически здоровые (ПЗ) или имеющие различные соматические заболевания. Такое разбиение множества  $\Omega$  соответствует значениям целевого признака  $X_0$ :  $X_0^{(1)} = \text{"Больные АЗ"}$ ,  $X_0^{(2)} = \text{"ПЗ"}$ .

Существует несколько методов оценки влияния того или иного фактора риска на целевой признак  $X_0$ . Одним из таких методов является дисперсионный анализ. Общий многофакторный дисперсионный анализ позволяет выявить наиболее информативные факторы риска из общего числа анализируемых признаков [6]. Существует формализованная процедура дисперсионного анализа, которая сводится к проверке гипотез относительно влияния рассматриваемых факторов. Гипотеза  $H_0$  выдвигается об отсутствии указанного влияния. Если гипотеза отвергнута, то математическая статистика предлагает методы дальнейшего исследования, позволяющие определить те эффекты, которые вызвали отказ от гипотезы. Это, в свою очередь, позволит оценить влияющие факторы по изменчивости целевого признака  $X_0$ . Таким образом, дисперсионный анализ следует рассматривать как метод предварительного исследования, позволяющий в принципе ответить на вопрос, оказывают ли влияние на целевую переменную рассматриваемые факторы или это влияние на имеющемся фактическом материале уловить не удастся.

Исследование проводилось по следующему плану:

1. Проведение однофакторного дисперсионного анализа с целью определения наличия влияния отдельного фактора на развитие АЗ.
2. Проведение двухфакторного дисперсионного анализа с целью определения совместного влияния двух факторов на развитие АЗ.
3. Анализ таблиц сопряженности для установления силы влияния (меры риска) фактора  $X_j$  или его градации  $X_j^{(l)} (l = \overline{1, k_j}, j = \overline{1, n})$ .

В соответствии с приведенной схемой однофакторный дисперсионный анализ выявляет факторы, влияние которых на целевой признак  $X_0$  значимо.

К двухфакторному анализу приводит ситуация, в которой сравниваемые совокупности наблюдений разбиты по двум признакам, анализируется же поведение третьего признака [7]. В случае двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями предполагается, что имеется несколько двумерных выборок, в которых каждое выборочное значение соответствует одной комбинации двух исследуемых факторов  $X_i$  и  $X_j$ , т.е. теперь в каждой ячейке таблицы данных, соответствующей  $l_i$ -му уровню фактора  $X_i$  и  $l_j$ -му уровню фактора  $X_j$ , будет находиться не одно значение  $t_{ij}$ , а  $k_0$  значений  $t_{ijk}$  ( $k = \overline{1, k_0}$ ), где  $k_0$  – количество выборок.

Те факторы, для которых не выявлено влияние, могут оказаться значимыми при различных их комбинациях. Совместное влияние каждой из комбинаций признаков анализируется с использованием двухфакторного дисперсионного анализа.

Сумма квадратов  $SS$ , измеряющая совместное влияние двух факторов  $X_i$  и  $X_j$  на целевой признак  $X_0$  определяется по формуле:

$$SS = k_0 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (\bar{t}_{ij*} - \bar{t}_{i**} - \bar{t}_{*j*} + \bar{t})^2,$$

где  $\bar{t}_{ij*}$  – значение по каждой ячейке;  $\bar{t}_{i**}$  – средние по строкам;  $\bar{t}_{*j*}$  – средние по столбцам;  $\bar{t}$  – общее среднее;  $r$  – размерность выборки для  $X_i$ ;  $s$  – размерность выборки для  $X_j$ .

Для отобранных на основании одно- и двухфакторного анализа признаков определялась количественная оценка сравнения рисков – мера риска [8].

При расчете меры риска анализируется так называемая переменная риска, которая имеет две градации и указывает, произошло ли некоторое событие или нет. Независимые переменные, характеризующие переменную риска, должны быть также дихотомическими.

При аналогичных настоящим когортных исследованиях [8] с помощью меры риска определяется, в каких случаях данное событие произошло, а в каких нет, и различается ли риск наступления события между различными градациями независимой переменной.

При стандартной структуре и обозначениях частот в таблице сопряженности

Фактор риска $X_j$	Да	Нет
Значение $X_j^{(1)}$	$a$	$b$
Значение $X_j^{(2)}$	$c$	$d$

коэффициенты (меры) относительного риска вычисляются по формулам:

$$R_1 = \frac{a/(a+b)}{c/(c+d)} \text{ и } R_2 = \frac{b/(a+b)}{d/(c+d)}.$$

Для настоящих исследований были отобраны такие внутренние факторы:  $X_1$  = "Пол",  $X_2$  = "Группа крови",  $X_3$  = "Конституционные особенности" (с градациями астеник, нормостеник, гиперстеник),  $X_4$  = "Цвет волос" (с градациями блондин, брюнет, шатен),  $X_5$  = "Знак зодиака",  $X_6$  = "Год рождения" по восточному календарю,  $X_7$  = "Тригоны" (с градациями воздух, вода, земля, огонь). Для проведения дисперсионного анализа по каждому из

рассматриваемых факторов риска были сформированы соответствующие таблицы данных.

В результате однофакторного дисперсионного анализа было установлено влияние факторов, связанных с датой рождения:  $X_5$ ,  $X_6$  и  $X_7$ .

Следовательно, признаки  $X_5$ ,  $X_6$  и  $X_7$  могут расцениваться как факторы риска развития АЗ.

При исследовании влияния фактора  $X_2$ , оказалось, что влияние значения его градации  $X_2^{(2)}$ , соответствующего группе крови 2 (А), не значимо. В то же время однофакторный дисперсионный анализ показал значимое различие в распределениях признака  $X_2$  в группах  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  по градациям  $X_2^{(1)}$ ,  $X_2^{(3)}$  и  $X_2^{(4)}$ , что соответствует группам крови 1 (0), 3 (В), 4 (АВ).

Чтобы использовать информацию о рабочих с группой крови 2 (А), был проведен дисперсионный анализ между теми же группами  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  при условии объединения данных об обследуемых с различными группами крови. Значимое различие в распределениях оказалось лишь при условии объединения данных по правилам  $\{X_2^{(1)} \cup X_2^{(3)}\}$  и  $\{X_2^{(2)} \cup X_2^{(4)}\}$ . Результаты однофакторного анализа приведены ниже в табл. 1 ( $\alpha = 0,05$ ).

Таблица 1

Внутренние факторы риска	$F_{\text{набл}}$	$F_{\text{кр}}$
Фактор $X_5$	21,67	4,30
Фактор $X_6$	14,44	4,30
Фактор $X_7$	36,86	5,99
Градации фактора $X_2$ : $X_2^{(1)}$ , $X_2^{(3)}$ , $X_2^{(4)}$	11,48	9,55
Объединение градаций $\{X_2^{(1)} \cup X_2^{(3)}\}$ и $\{X_2^{(2)} \cup X_2^{(4)}\}$	57,84	18,51

Однофакторный дисперсионный анализ, к сожалению, не выявил значимого влияния на развитие АЗ факторов  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X_4$ .

Для выявления возможного их попарного влияния был проведен двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями.

Наиболее значимым оказалось влияние сочетания факторов  $X_1$  и  $X_4$ , а также, хотя и менее значимым, сочетание  $X_1$  и  $X_3$ . Результаты анализа этого взаимодействия признаков приведены в табл. 2 ( $\alpha = 0,05$ ).

Далее, для тех признаков, которые получили статус факторов риска по результатам однофакторного и двухфакторного дисперсионного анализа,

определялись меры риска, которые позволяют количественно оценить влияние градиций рассматриваемых факторов риска на развитие заболевания.

Таблица 2

Взаимодействие факторов	$F_{\text{набл}}$	$F_{\text{кр}}$
$X_1$ и $X_4$	13,40	5,14
$X_1$ и $X_3$	6,11	5,14

В данном исследовании в качестве порогового значения для меры риска были приняты значения меры, равные 2, т.е. шансы оказаться в состоянии "Больной АЗ" должны быть, как минимум, в 2 раза выше шансов остаться в состоянии "Практически здоровый".

Оказалось, что на развитие АЗ у рабочих и служащих химико-фармацевтических предприятий оказывают значимое влияние следующие факторы: дата рождения (факторы  $X_5$ ,  $X_6$  и  $X_7$ ); некоторые сочетания градиций факторов  $X_1$  и  $X_2$ ,  $X_1$  и  $X_3$ ,  $X_1$  и  $X_4$ ,  $X_2$  и  $X_4$ .

**Выводы.** Проведенные исследования показали, что среди биологических признаков существуют значимые внутренние факторы риска, роль которых в этиологии развития АЗ возрастает на фоне агрессивной среды по месту работы и общей экологической загрязненностью города. Дальнейшее изучение выявленных факторов риска возможно с целью ранжирования их по силе влияния. Для этого, например, могут быть использованы так называемые диагностические коэффициенты.

**Список литературы:** 1. Солошенко Э.Н., Чикина Н.А. Определение факторов риска развития аллергодерматозов у рабочих предприятий химико-фармацевтической промышленности с помощью математических методов // Тезисы докладов научно-практической конференции "Метагигиена-93", 1993. – С. 137–138. 2. Мавров И.И., Чикина Н.А., Каменев В.И. Анализ факторов риска заболеваемости сифилисом // Дерматология и венерология. – 2006. – 4 (36). – С. 49–53. 3. Овчаров Е.А. Охрана здоровья нефтяников Западной Сибири в производственном объединении // Здравоохран. Рос. Федерации. – 1998. – № 4. – С. 29–31. 4. Выбор факторов риска и оценка их диагностической значимости / Мануйлова А.М., Воробьев Ф.П., Долюницкая Л.П., Чикина Н.А. // Кибернетика и вычислительная техника. – 1987. – Вып. 74. – С. 33–35. 5. Миндлин Я.С., Кальмыков А.А., Утенков А.В. Больные хроническими заболеваниями: образ жизни, состояние здоровья, профилактика и организация медицинской помощи. – М.: Медицина, 1991. – 208 с. 6. Кальман О.Г., Дарногих Г.Ю., Христич І.О., Чікіна Н.О. Кримінологічні проблеми прогнозування економічної злочинності, планування і координації заходів боротьби з нею / Монографія;. – Харків: Інститут вивчення проблем злочинності Академії правових наук України, 2003. – 266 с. 7. Солошенко Е.М., Чікіна Н.О., Долюницкая Л.П. Застосування математичних методів аналізу та обробки результатів досліджень в медицині і біології / Навчально-методичний посібник. – Харків: Харківський національний університет ім. Каразіна В.Н., 2002. – 45 с. 8. Флетчер Р., Флетчер С., Вагнер Э. Клиническая эпидемиология. Основы доказательной медицины. – М.: Медиа Сфера, 2004. – 347 с.

Поступила в редакцию 10.04.2007

## Содержание

<i>Аврунин О.Г., Носова Т.В.</i> Принципы построения автоматизированных нейрохирургических комплексов .....	3
<i>Бабій А.С.</i> Програмна система для аналізу злочинності .....	12
<i>Букатова И.Л.</i> Теория целостно-эволюционной интеллектуализации как основа эффективного решения задач социальных систем .....	17
<i>Бых А.И., Высоцкая Е.В., Козина О.А., Нужнова С.В., Чебанов К.В., Коновалов М.С.</i> Биотехническая система выявления фатальных нарушений ритма, предупреждения и профилактики внезапной коронарной смерти .....	26
<i>Бычков А.М., Кучук Г.А., Можжев А.А.</i> Метод прогноза магистрального трафика критического участка мультисервисной сети .....	30
<i>Гавриленко С.Ю., Филоненко А.М., Комарев Р.Ю.</i> Оптимизация организации таблиц символов при построении компиляторов .....	38
<i>Грбовський Є.М.</i> Принципи побудови мультимедійних інформаційних систем електронної комерції .....	44
<i>Далека В.Д., Вдовиченко С.С.</i> Исследование распределения памяти компьютера при объектно-ориентированном программировании .....	48
<i>Даниленко А.Ф., Фиофилова А.А.</i> Автоматизация управления ЯМР спектрометром .....	54
<i>Дмитриенко В.Д., Хавина И.П.</i> Вычислительная сеть для решения задач распознавания с несколькими решениями .....	58
<i>Дмитриенко В.Д., Заковоротный А.Ю.</i> Линеаризация математической модели привода методами дифференциальной геометрии .....	64
<i>Ерохин А.Л., Турута А.П.</i> Оценки эффективности работы компонент WEB .....	78
<i>Заполовский Н.И., Липчанский М.В., Пинчук Н.А.</i> Синтез терминальных управлений движением поезда .....	82
<i>Заполовский Н.И., Мезенцев Н.В.</i> Исследование работоспособности нечеткого регулятора электропривода переменного тока при различных функциях принадлежности .....	89
<i>Иванов В.Г., Любарский М.Г., Ломоносов Ю.В.</i> JPEG и вейвлет-копрессия объекта и фона изображения с различной степенью качества .....	94
<i>Карасюк В.В., Пазыч В.А.</i> Анализ защищенности локальной сети вуза ....	106
<i>Корсунов А.Р.</i> Разработка метода измерения напряженности электромагнитного поля в пространстве телекоммуникационных средств комплекса электромагнитного воздействия на биоструктуры .....	111

<i>Козин И.В., Осипов С.А.</i> О мере неустойчивости выбора в моделях матричных игр .....	115
<i>Кузьменко С.Л., Яловкина Е.Б.</i> Система обработки цветовой информации в глубокой печати .....	119
<i>Магдаліна І.В.</i> Використання засобів імітаційного моделювання для оцінки ефективності роботи підрозділів органів внутрішніх справ .....	123
<i>Мазниченко Н.И.</i> Области применения и принципы построения биометрических систем идентификации личности .....	127
<i>Обод И.И., Гриб Д.А., Голованов В.П.</i> Измерение координат воздушных объектов в комплексированной идентификационной системе .....	133
<i>Обод И.И., Луценко Ю.А.</i> Измерение высоты объектов в синхронной информационной сети систем наблюдения .....	137
<i>Поворознюк А.И., Миргород Ю.В.</i> Алгоритмы и методы предварительной обработки физиологических квазипериодических сигналов .....	141
<i>Поворознюк А.И., Шкарупа М.Н.</i> Совершенствование защиты web-приложений от вторжений на основе эвристического подхода .....	145
<i>Пустовойтов П.Е., Яцук Н.И.</i> Технология маршрутизации в компьютерных сетях с учетом динамики трафика .....	155
<i>Путятіна А.Е.</i> Управление негосударственными пенсионными фондами в условиях развивающейся экономики .....	159
<i>Серая О.В., Амер Шади.</i> Восстановление плотности распределения безотказной работы системы по малой выборке наблюдений .....	167
<i>Рысованый А.Н., Гоготов В.В.</i> Выбор полиномов для сигнатурных анализаторов в поле Галуа GF(3) по критерию сложности технической реализации .....	172
<i>Торяник А.И., Дьяков А.Г., Даниленко А.Ф., Фиофилова А.А.</i> Измерение коэффициента самодиффузии спектрометром ЯМР .....	177
<i>Удовиченко В.М.</i> Оператори Фур'є та Хартлі, побудовані на основі методу Файлона та кубічних В-сплайнів, точні на тригонометричних поліномах заданого степеня .....	182
<i>Филатова А.Е., Игнатьева А.Е.</i> Методы проведения биохимического скрининга в пренатальной диагностике .....	191
<i>Чикина Н.А., Антонова И.В.</i> Изучение влияния внутренних факторов риска на развитие аллергодерматозов у рабочих химико-фармацевтических предприятий .....	195